

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y  
AGROINDUSTRIA**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONSUMO DE RECURSOS EN  
PROCESOS QUE SIGUEN UNA RUTA TRADICIONAL O  
BIOTECNOLÓGICA**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONSUMO DE RECURSOS  
ENTRE DOS PROCESOS TRADICIONALES Y UNO  
BIOTECNOLÓGICO EMPLEADOS PARA LA REMOCIÓN DE LA  
CAPA DE CELULOSA EN ENVASES ASÉPTICOS TETRA PAK®  
RECICLADOS**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA  
AGROINDUSTRIAL**

**DIANA ESTEFANÍA DÍAZ PAUCAR**

**sthef\_98@hotmail.com**

**DIRECTOR: MARY CASA VILLEGAS, PhD.**

**mary.casa@epn.edu.ec**

**DMQ, febrero 2022**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Diana Estefanía Díaz Paucar declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**Diana Estefanía Díaz Paucar**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Diana Estefanía Díaz Paucar, bajo mi supervisión.

---

**Mary Casa Villegas, PhD.**  
**DIRECTOR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Diana Estefanía Díaz Paucar

Mary Casa Villegas

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Iván y Blanca. Gracias por sus consejos, su amor y apoyo incondicionales. Gracias por incentivarme a ser un mejor ser humano cada día y por brindarme las posibilidades para convertirme en una profesional.

A mi hermano, Patricio, por ser mi compañero en la vida, brindarme alegrías y fortaleza en los momentos difíciles.

A mi abuelito Francisco, mi angelito en el cielo. Por tu inmerso amor, cuidados y consejos.

A Abigail y Steeven, por su cariño, consejos y compañía en los momentos exactos.

A Samanta y Nathaly, por ser las mejores amigas y compañeras que pude tener durante este largo camino universitario.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, a mis padres y abuelitos por su amor, cuidado y protección para poder llegar a este punto de mi vida.

A mi directora de proyecto, la Dra. Mary Casa, por su tiempo, paciencia y enseñanzas.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VI
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Alcance .....	2
1.4 Marco teórico .....	2
1.4.1 Origen y estructura de los envases asépticos Tetra Pak .....	2
1.4.2 Manejo posconsumo de envases asépticos Tetra Pak.....	4
1.4.3 Remoción de la capa de celulosa en envases asépticos Tetra Pak.....	5
1.4.3.1 Métodos clásicos .....	5
1.4.3.2 Métodos biotecnológicos .....	8
2 METODOLOGÍA.....	10
2.1 Hidropulpeo.....	10
2.1.1 Hidropulpeo por lotes.....	10
2.1.2 Hidropulpeo continuo .....	13
2.2 Deslaminación con solventes orgánicos.....	14
2.3 Acción directa del hongo <i>Trichoderma reesei</i> en un sistema de fermentación líquida.....	19
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	21
3.1 Resultados .....	21
3.1.1 Evaluación de los insumos materiales .....	21
3.1.2 Evaluación de los insumos energéticos .....	23
3.2 Conclusiones.....	24
3.3 Recomendaciones .....	25
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26
5 ANEXOS.....	31

## RESUMEN

Los envases Tetra Pak asépticos son globalmente usados, principalmente por las propiedades de sus materiales constitutivos. En 2020, de las 4 millones de toneladas producidas solo el 26 % fue reciclado, pues su compleja estructura representa un reto al establecer protocolos de reciclaje. Generalmente, previo al aprovechamiento del polialuminio, la capa de cartón es la primera en removerse del envase. En este trabajo se analizaron los insumos materiales y energéticos demandados para procesar 1 kg de envases mediante tres métodos que tienen este propósito. En el hidropulpeo se suspenden a los envases en agua y agitan vigorosamente para que las fibras se hidraten y desprendan del envase. La deslaminación con solventes separa a los tres materiales constitutivos, lixivia el polietileno con xileno en ebullición y separa a la celulosa del aluminio mediante  $\text{CCl}_4$  como medio de suspensión. El tercer método, implica la hidrólisis enzimática de la celulosa al incubar directamente el hongo *T. reesei* en un sistema de fermentación líquida. El hidropulpeo recuperó un 70 % de la celulosa, fue el método más rápido y menos demandante de recursos. La deslaminación recuperó el 90 % del homopolímero, es decir 20 % más que el hidropulpeo y 5 % más que la ruta biotecnológica, pero utilizó reactivos más contaminantes. El método biotecnológico recuperó el 85 % de la celulosa, pero requirió un 38 % y un 35 % más agua que el hidropulpeo y la deslaminación con solventes, respectivamente; además, demandó más energía y tiempo de proceso.

**PALABRAS CLAVE:** Tetra Pak, celulosa, hidropulpeo, deslaminación, *T. reesei*.

## ABSTRACT

Tetra Pak aseptic packaging is widely used, mainly by its materials properties, but its complex structure has been a challenge at the moment to define recycling guidelines. Thus, in 2020, just the 26 % of the 4 million tons of Tetra Pak packaging produced were recycled. Generally, prior to the PEAI transformation process, the cellulose layer is the first to be removed from the package. The aim of this work was to calculate an approximation of the material and energy requirements needed to process 1 kg of Tetra Pak by three different recycling alternatives that serves this purpose. For hydropulping, in the presence of water, Tetra Pak are subjected to vigorous centrifugal forces to hydrate and remove cardboard layer. Solvent delamination allows separately recovers the three constituent materials by the dissolution of LDPE in boiling xylene, and the separation of aluminum from cellulose in the presence of  $\text{CCl}_4$ . The third method involves the enzymatic hydrolysis of cellulose by direct action of *T. reesei* in a liquid fermentation system. Hydropulping reclaimed 70 % of cellulose, was the fastest and less resource consuming method. Delamination recovered 90 % of the homopolymer, that was 20 % more than hydropulping and 5 % more than the biotechnological alternative but required more polluting reagents. The biotechnological procedure achieved 85 % of cellulose recovery but demanded 38 % and 35 % more water than hydropulping and solvent delamination, respectively; it also took more time and energy.

**KEYWORDS:** Tetra Pak, cellulose, hydropulping, delamination, *T. reesei*.



# 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Los envases Tetra Pak son empleados globalmente por las industrias de bebidas y alimentos líquidos al ser envases asépticos que facilitan el transporte, almacenamiento y distribución sin necesidad de refrigeración (Ma, 2018). En 2020 se estimó que se produjeron a nivel mundial alrededor de 4 millones de toneladas, de las cuales el 26 % fue reciclado (Zúñiga et al., 2021).

Tradicionalmente, para el tratamiento de los envases asépticos Tetra Pak posconsumo, previo al aprovechamiento del polialuminio (material resultante de la unión entre las capas de polietileno y aluminio) o a la recuperación del aluminio o de la parafina procedente del polietileno de baja densidad (LDPE), se emplea el proceso mecánico de repulpeo (*repulping*) o hidropulpeo (*hydropulping*) para generar fuerzas de cizallamiento entre las fibras que provocan la paulatina hidratación y separación del 55 – 85 % de la capa de cartón (Fatoki y Omoniyi, 2015). Entre las alternativas químicas, se ha planteado separar simultáneamente los 3 elementos constitutivos de este empaque mediante el uso de solventes orgánicos como el xileno para remover al LDPE y el tetracloruro de carbono para separar al aluminio de la celulosa por diferencia de densidades, alcanzándose una remoción del 90 % de celulosa (Grzybowski, 2016).

Como alternativas biotecnológicas, se ha considerado el uso de extractos enzimáticos del hongo *Trichoderma reesei*, obtenidos en fermentación sólida, en presencia y ausencia de células de *Saccharomyces cerevisiae*, alcanzando una remoción de la capa de cartón de aproximadamente un 70 % y 40 %, respectivamente. La remoción incompleta se atribuye a la probable inhibición de las enzimas a causa de la acumulación de celulosa y celobiosa en el medio de cultivo. Adicionalmente, en un sistema de fermentación líquida (FL) se probó la incubación directa del hongo *T. reesei* sobre diferentes consistencias del material aséptico, logrando la separación del 85 % de la capa de cartón del polialuminio, apuntando a que el propio hongo evita la inhibición de las enzimas al consumir la glucosa (Guevara, 2020; Yépez, 2021).

De esta manera, en este trabajo se analizaron los principales insumos demandados por el hidropulpeo, la deslaminación con solventes y la incubación directa del hongo *T. reesei* en un sistema de FL, mediante una comparación basada en el tratamiento de una cantidad equivalente de 1 kg de material aséptico Tetra Pak.

## **1.1 Objetivo general**

Analizar los principales recursos demandados por dos procesos tradicionales (uno mecánico y otro químico-mecánico) respecto a un proceso biotecnológico, empleados en la remoción de la capa de celulosa de envases asépticos.

## **1.2 Objetivos específicos**

- 1) Estimar los principales insumos necesarios en las dos rutas tradicionales: mecánica (hidropulpeo) y químico-mecánica (deslaminación con solventes orgánicos).
- 2) Estimar los insumos necesarios en la ruta biotecnológica: acción directa del hongo *Trichoderma reesei* en un sistema de fermentación líquida.
- 3) Comparar los insumos estimados en las diferentes rutas, considerando una cantidad equivalente de material aséptico.

## **1.3 Alcance**

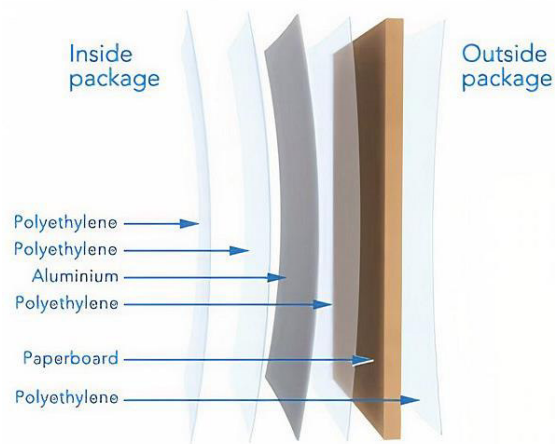
Principalmente, este trabajo se abordó desde una perspectiva cualitativa al recurrir a una revisión bibliográfica acerca de las alternativas tradicionales y biotecnológicas empleadas para la remoción de la capa de celulosa de los empaques asépticos Tetra Pak posconsumo. Se analizaron 2 rutas clásicas, una mecánica o hidropulpeo y una químico-mecánica de deslaminación con solventes orgánicos, y 1 ruta biotecnológica que implica la acción directa del hongo *Trichoderma reesei* en un sistema de fermentación líquida. Para cada alternativa, se describió el proceso, las condiciones de operación, se identificaron y estimaron cuantitativamente los principales insumos requeridos para el procesamiento de una cantidad inicial equivalente de 1 kg de material aséptico. Finalmente, se compararon los datos obtenidos para las rutas clásicas y biotecnológica.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Origen y estructura de los envases asépticos Tetra Pak**

Desde hace miles de años, los alimentos y las bebidas han sido envasados de múltiples maneras con diversos fines como facilitar su transporte, evitar su contaminación por animales o agentes ambientales y prolongar su tiempo de almacenamiento. De acuerdo con Tetra Pak (2021a), Ruben Rausing en 1952 lanzó al mercado los primeros envases de cartón y polietileno con forma tetraédrica empleados exclusivamente en la industria láctea. Conforme al paso de los años, la idea original evolucionó hasta llegar a los envases Tetra Pak asépticos constituidos principalmente por cartón, polietileno de baja densidad y

aluminio en porcentajes aproximados de 75 %, 20 % y 5 %, respectivamente, dispuestos en 6 láminas como lo indica la Figura 1.1.



**Figura 1.1.** Distribución de los materiales que conforman un envase multicapa aséptico

Nota: Adaptado de *Material para envasado para envases de cartón Tetra Pak*, por Tetra Pak, 2021b, <https://www.tetrapak.com/es-ec/solutions/packaging/packaging-material/materials#>

Posterior al tratamiento térmico de Ultra Alta Temperatura (UHT), cuyo objetivo es reducir al máximo la presencia de microorganismos patógenos con la mínima alteración organoléptica y nutricional, es necesario el uso de los envases multicapa asépticos. Estas prácticas en conjunto buscan preservar las propiedades antes mencionadas en el alimento o bebida por varios meses (Sánchez et al., 2016). Para esto, Tetra Pak ideó su diseño de envases asépticos de acuerdo con las propiedades de los diferentes materiales constitutivos.

La capa de cartón se encuentra en una cantidad predominante en la estructura del envase, con el fin de proporcionar flexibilidad y resistencia. Esta lámina proviene de una pulpa celulósica virgen no blanqueada, como requisitos necesarios para el contacto con alimentos (Martínez et al., 2019; Turrado et al., 2012).

El polietileno de baja densidad constituye 4 de las 6 capas de este empaque, se caracteriza por ser una excelente barrera contra el paso de la humedad y un medio de adherencia entre las diferentes láminas constituyentes (Martínez et al., 2019).

El aluminio es el componente minoritario y más ligero encargado de proteger al alimento o bebida contra la entrada de oxígeno, aromas externos, luz solar y humedad, y evitar la salida de aromas intrínsecos. Este material es clave para que un alimento procesado por tratamiento UHT logre una mayor vida útil sin la necesidad de usar preservantes ni una cadena de frío (Hidalgo et al., 2013).

#### **1.4.2 Manejo posconsumo de envases asépticos Tetra Pak**

Ma (2018) sostiene que los envases Tetra Pak son empleados globalmente por las industrias de bebidas y alimentos líquidos pues gracias a sus materiales constitutivos ofrecen un envasado aséptico que mantienen el valor nutricional y organoléptico del producto, facilitan el transporte, almacenamiento y distribución sin necesidad de refrigeración. Desde el punto de vista de Tetra Pak (2021c), la pandemia por COVID 19 ha generado que los consumidores aumenten la demanda de alimentos y bebidas procesados de larga vida útil que garanticen la inocuidad alimentaria. Esto ha desencadenado el incremento de envases Tetra Pak enviados a los rellenos sanitarios. De acuerdo con cifras estimadas por Tetra Pak (2021d) para el año 2020, esta empresa produjo a nivel mundial más de 183 mil millones de empaques asépticos multicapa, lo que para Zúñiga et al. (2021) representa alrededor de 4 millones de toneladas, de las cuales aproximadamente solo el 26 % fue reciclado.

Ma (2018) y Robertson (2021) concuerdan en que posterior al consumo del contenido del envase Tetra Pak, éste puede ser aprovechado para generar energía mediante su incineración, elaborar otros objetos como aglomerados mediante el prensado y calentamiento o para recuperar sus elementos constitutivos (polietileno, aluminio y celulosa). Pese a que las fibras celulósicas no pueden ser reincorporadas en la producción de envases para alimentos, Riveros (2018) y Robertson (2021) mencionan que sí son útiles para la manufactura de servilletas, pañuelos de papel, cajas de cartón, papel de oficina, cartones de huevos, entre otros. Las propiedades del polialuminio han permitido la elaboración de tejas termoacústicas y láminas empleadas en carpintería y construcción (Hidalgo et al., 2013). Cabe mencionar que la recuperación exclusiva de aluminio es altamente atractiva debido a las múltiples aplicaciones de este metal en el sector de la construcción, el ensamblaje de maquinarias y el eléctrico (Estrella, 2013)

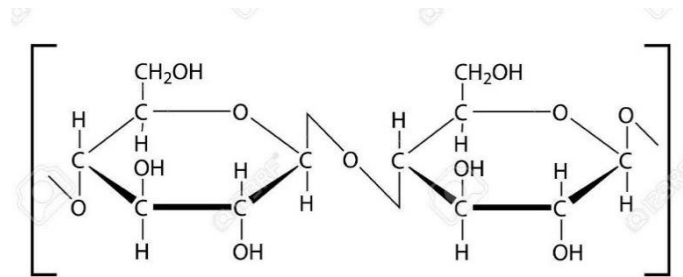
En los últimos años, el reciclaje de envases multicapa busca disminuir el impacto medioambiental a través de la reducción en el consumo de agua, energía y de la emisión de gases de combustión, y de la recuperación y reutilización de materiales (Ma, 2018; Martínez et al., 2019).

En opinión de Kaiser et al. (2018) y Yan et al. (2015), existe un número reducido de procedimientos definidos para llevar a cabo la separación y reaprovechamiento de cada uno de los componentes de éste envase en vista de su compleja estructura. Actualmente, las técnicas de reciclaje se basan en la molienda mecánica, para la reducción de tamaño,

y el uso de sustancias químicas y agua como medio de disolución para el desprendimiento de los componentes.

### 1.4.3 Remoción de la capa de celulosa en envases asépticos Tetra Pak

La celulosa es un polisacárido estructurado exclusivamente por moléculas de D-glucosa unidas mediante enlaces glucosídicos  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 4) (Figura 1.2). Este homopolisacárido es difícil de hidrolizar debido a su estructura semicristalina (70 % cristalina y 30 % amorfa) y a la presencia de puentes de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals. La presencia de los grupos -OH y -CH<sub>2</sub>OH le dan un carácter polar a la celulosa y por tanto tiene afinidad por sustancias polares como el agua y ciertos solventes orgánicos, sobre todo si la matriz inicial de la celulosa es alterada (Jordan et al., 2012; Ma, 2018).



**Figura 1.2.** Unidad estructural y repetitiva de la celulosa

Nota: Adaptado de Polymeric structures of cellulose and hemicellulose chains, por Jordan et al., 2012, Biochemical Journal

En vista de que el 75 % del Tetra Pak está conformado básicamente por fibras de celulosa, tradicionalmente, el primer paso para la recuperación de los materiales constitutivos corresponde a la separación de la capa de cartón de la capa de polialuminio.

#### 1.4.3.1 Métodos clásicos

Fatoki y Omoniyi (2015) mencionan que el proceso más difundido para la remoción de la capa de cartón es el hidropulpeo (*hydropulping*), que consiste en suspender a los envases en agua dentro de un tanque en el que se generan fuerzas de cizallamiento provocadas por un rotor helicoidal (proceso por lotes) o por placas deflectoras y movimientos rotatorios (proceso continuo). La continua fricción altera el ordenamiento de las fibras de celulosa, los grupos polares son atraídos por las moléculas de agua y paulatinamente el polisacárido se hidrata y se separa de la matriz de polialuminio. Este procedimiento, ya sea por lotes o continuo, es ampliamente practicado ya que el tiempo de operación no excede los 60 minutos, no emplea sustancias químicas adicionales ni una maquinaria altamente sofisticada. Sin embargo, en cierto porcentaje las fibras de celulosa recuperadas tienen

una longitud reducida y están mezcladas con restos de polietileno y tintas por lo que es común refinarlas antes de utilizarlas como materia prima en la elaboración de nuevos productos.

A partir de esta idea base, Turrado et al. (2012) plantea la sustitución de las cuchillas por un molino de bolas y NaOH como catalizador para la ruptura de los puentes de hidrógeno que mantienen a las fibras celulósicas entrelazadas. Estos cambios presuntamente acelerarían la hidratación, disminuirían el acortamiento de las fibras y aumentarían el porcentaje de recuperación, pero no evitarían la contaminación con residuos de polietileno y demandarían una continua reposición de NaOH en cada nuevo lote a ser procesado.

En la última década se ha buscado plantear métodos para separar y recuperar simultáneamente cada uno de los materiales del envase Tetra Pak aséptico con elevados porcentajes de recuperación. Es así que Mukhopadhyay (2010) plantea el uso de bases inorgánicas para disolver el aluminio y los adhesivos y así lograr que las capas de cartón y polietileno se desliguen y puedan ser recuperadas por sedimentación y decantación, respectivamente. Por su parte Grzybowski (2016) patenta un método basado en la alta solubilidad del polietileno en xileno a temperaturas cercanas a la de su punto de ebullición y en la diferencia de densidades entre la celulosa ( $1,5 \text{ g/cm}^3$ ) y el aluminio ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ). El método implica el uso de tetracloruro de carbono ( $1,6 \text{ g/cm}^3$ ) como medio de suspensión para separar al aluminio de las fibras celulósicas, recuperándolos por sedimentación y decantación, respectivamente. En la Tabla 1.1 se mencionan las condiciones experimentales y el porcentaje de recuperación de algunos de los componentes presentes en los envases multicapa asépticos utilizando un método mecánico y otros químico-mecánicos.

**Tabla 1.1.** Métodos tradicionales para remoción de capa celulósica procedente de envases asépticos Tetra Pak

Método	Tetra Pak empleado (% p/p)	Insumos	Descripción del proceso	Recuperación de componentes (%)	Referencias
Repulpeo	6 - 20	Agua	Los envases troceados en tamaños aproximados de 3 x 3 cm se someten a agitación durante 30 a 45 min, en el medio acuoso. Las fibras celulósicas hidratadas se separan de la matriz de polialuminio.	Celulosa: 55 - 85	Diop y Lavoie, 2017; Fatoki y Omoniyi, 2015
Deslaminado con solución de sosa	2,97 - 4,6	Solución de NaOH 0,1-0,3 (% p/p)	En un molino de bolas, los envases desdoblados junto con la solución de sosa son procesados entre 20 a 37 min. La lámina de cartón se separa del resto de la estructura.	Celulosa: 53,6 - 92	Turrado et al., 2012
Deslaminado con bases inorgánicas	2 - 5	Proporción de bases inorgánicas 3:3:1 (p/p). Sulfito de sodio: sulfato de sodio: hidróxido de sodio Proporción NaOH: agua 10:1 (p/v).	Los empaques recortados en tamaños de 1,5 x 3 cm son incubados en la solución de bases inorgánicas por 24 a 48 h con agitación vigorosa. La capa de cartón sedimenta, el polietileno flota y el aluminio se disuelve	Celulosa: 80 - 95	Mukhopadhyay, 2010; Raj et al., 2020
Deslaminado con solventes orgánicos	58	Xileno Agua Tetracloruro de carbono Aire	Durante 3 horas se mantiene al xileno caliente junto a los envases para disolver al LDPE. Las capas restantes se sumergen en tetracloruro de carbono para separar por diferencia de densidades al aluminio de la capa de celulosa	Polietileno: 95 Aluminio: 95 Celulosa: 90	Grzybowski, 2016

### 1.4.3.2 Métodos biotecnológicos

Mayoritariamente las investigaciones biotecnológicas se han centrado en las industrias de alimentos, bebidas y farmacéutica, pero desde 1980 los esfuerzos también se han dirigido a las industrias de combustibles y de pulpa y papel mediante la incorporación de organismos vivos, especialmente hongos y enzimas en procesos alternativos de descomposición de material lignocelulósico con mira hacia una producción sostenible y sustentable. Varios estudios han reportado que los hongos *Aspergillus niger*, *Trichoderma longibrachiatum* y *Trichoderma reesei* presentan una considerable actividad celulolítica por lo que generalmente son empleados para la producción de cócteles enzimáticos comerciales. Sin embargo, dicha actividad suele inhibirse fácilmente por factores físicos y químicos que dificultan su aplicabilidad a nivel industrial. Es así como continuamente se busca aislar cepas que generen enzimas más estables, eficaces y económicas (Gutiérrez et al., 2015).

El *bio-pulping* corresponde a la hidrólisis de la biomasa celulolítica a través de un proceso secuencial y sinérgico de un conjunto de enzimas celulasas producidas por los hongos antes mencionados. Primeramente, las secciones amorfas de la celulosa son atacadas y cortadas al azar por las endoglucanasas (EG) liberando oligosacáridos de diferentes longitudes. Seguidamente, las celobiohidrolasas (CBH) actúan sobre los extremos reductores y no reductores generando el disacárido celobiosa. La  $\beta$ -glucosidasa (BGL) culmina el proceso al romper el enlace  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 4) liberando glucosa (Gutiérrez et al., 2015).

En vista de lo anterior, se ha estudiado la actividad celulolítica de extractos enzimáticos obtenidos a partir de procesos de fermentación líquida (FL) y sólida (FS) del hongo *T. reesei*, empleando como fuente de celulosa a cartón dúplex o papel filtro (Casa, 2018; Guevara, 2020). Los extractos celulolíticos provenientes de FS con papel filtro usualmente presentan mayor actividad y se han usado, en presencia y ausencia de células de *Saccharomyces cerevisiae*, para retirar la capa de celulosa de envases asépticos Tetra Pak alcanzando un 70 % y 40 % de remoción, respectivamente. Esta remoción parcial sucede probablemente por la acumulación de glucosa y la consecuente inhibición de la BGL (Guevara, 2020; Yépez, 2021).

Adicionalmente, en un sistema de FL se probó la incubación directa del hongo *T. reesei* sobre distintas consistencias del material aséptico Tetra Pak, logrando la separación del 85 % de la capa de cartón del polialuminio, apuntando a que el propio hongo evita la inhibición de las enzimas al consumir la glucosa (Guevara, 2020; Yépez, 2021). A



continuación, en la Tabla 1.2 se especifican algunas de las condiciones experimentales con las que trabajaron estas alternativas biotecnológicas.

**Tabla 1.2.** Métodos biotecnológicos alternativos para remover la capa celulósica presente en envases asépticos Tetra Pak

Método	Tetra Pak <sup>a</sup> empleado (% p/p)	Insumos	Descripción del proceso <sup>d</sup>	Remoción de celulosa (%)	Referencias
Incubación con extractos enzimáticos celulolíticos	3,30	Extracto enzimático de <i>T. reesei</i> <sup>b</sup>	El material Tetra Pak se incuba con el extracto enzimático.	28	Guevara, 2020; Yépez, 2021
	6,58			41	
	9,78			32	
Incubación de extractos enzimáticos celulolíticos y células de levadura	3,30	Extracto enzimático de <i>T. reesei</i> <sup>b</sup>	Al envase aséptico y al extracto enzimático se añadieron las células de levadura.	72	Yépez, 2021
	6,58	Células de levadura		64	
	9,78	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>		66	
Acción directa del hongo <i>Trichoderma reesei</i> en un sistema de fermentación líquida	3,30	Medio de cultivo YPS <sup>c</sup>	El envase multicapa se humedece con medio YPS y se inocula con las esporas del hongo.	85	Guevara, 2020; Yépez, 2021
	6,58	Esporas activadas de <i>T. reesei</i>		65	
	9,78			49	

<sup>a</sup> Los envases lavados son recortados en cuadrados de 1 cm<sup>2</sup>.

<sup>b</sup> Producidos en un sistema de FS.

<sup>c</sup> Extracto de levadura 1,0 %; peptona 2,0 % y almidón 0,5 %.

<sup>d</sup> El sistema se mantiene durante 72 h a 30 °C con agitación orbital de 200 rpm.

## 2 METODOLOGÍA

Con base en información bibliográfica se abordó de manera cualitativa el proceso y las condiciones de operación de dos rutas clásicas (una mecánica y una químico-mecánica) y una ruta biotecnológica aplicadas en la remoción de la capa de celulosa de los envases asépticos Tetra Pak reciclados; y de manera cuantitativa se estimaron los principales insumos requeridos por dichas rutas.

A partir de la esquematización de las principales operaciones unitarias y la estimación de los flujos de insumos y subproductos correspondientes a las rutas clásicas y biotecnológica, se contrastaron y analizaron los requerimientos de cada uno de estos procesos.

A continuación, se detalló al hidropulpeo (proceso mecánico tradicional), a la deslaminación con solventes orgánicos (alternativa química), y a la acción directa del hongo *Trichoderma reesei* en un sistema de fermentación líquida (alternativa biotecnológica).

### 2.1 Hidropulpeo

Para la obtención de pulpa celulósica a partir de materiales como papel de oficina, cartón y envases de bebidas se opta por un proceso mecánico denominado repulpeo (*re-pulping*) o hidropulpeo (*hydropulping*) (Integrated Pollution Prevention and Control [IPPC], 2006). Usualmente, en los envases asépticos Tetra Pak se emplea este proceso anexando un tamiz para retirar la capa celulósica previo al aprovechamiento del polialuminio o a la recuperación del aluminio y parafina procedente del LDPE. A manera general, el hidropulpeo permite que paulatinamente la capa de cartón se hidrate y se desligue de las capas de aluminio y polietileno, para luego ser removida a través de las ranuras del tamiz. (Robertson, 2021)

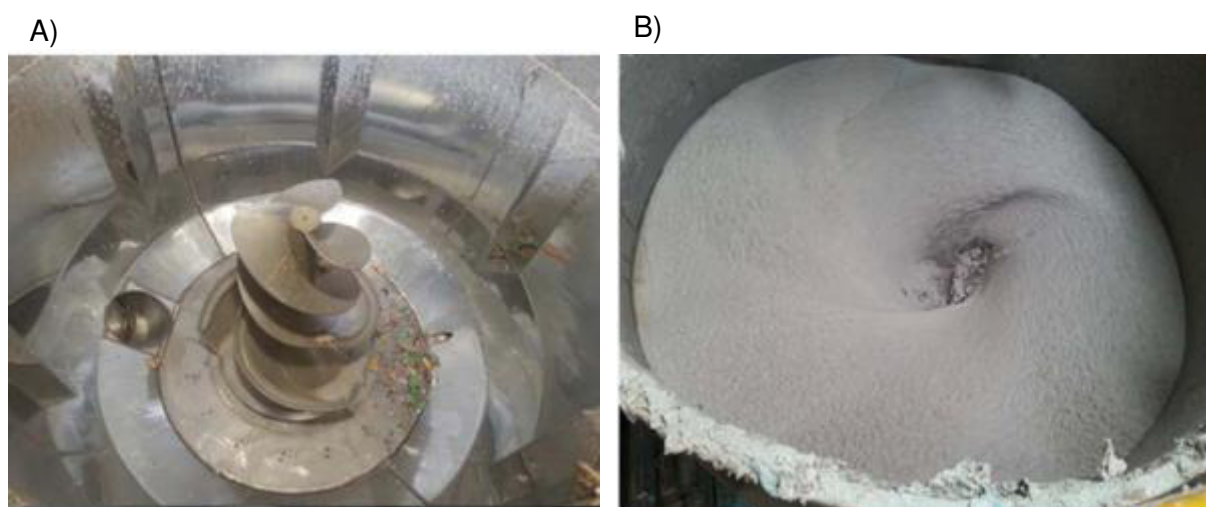
En el repulpeo, los envases asépticos, de antemano desarmados y lavados, junto con agua pueden procesarse de manera continua o en lotes en una despulpadora o desagregadora. La consistencia (relación porcentual entre la masa de envases y la masa de agua) es una variable importante durante el procesamiento. Generalmente se opera a alta consistencia para incrementar las interacciones fibra-fibra y en consecuencia disminuir el tiempo de operación y los daños en la estructura de las fibras. Este proceso se suele llevar a cabo a temperatura ambiente (Saville, 2009).

#### 2.1.1 Hidropulpeo por lotes

El equipo empleado está conformado por un cilindro de acero provisto de un rotor concéntrico helicoidal cuyo funcionamiento se asemeja al de una licuadora (Figura 2.1). La

fuerza de cizallamiento, que favorece al desprendimiento de la capa de cartón, se debe a la turbulencia (fuerzas hidráulicas horizontales y verticales) creada por la hélice y controlada por placas deflectoras (Saville, 2009)

Los rotores de consistencia media funcionan con 6 - 10 % de envases asépticos y los de consistencia alta con 11 - 15 %. El tiempo de procesamiento oscila entre 15 - 45 minutos, de acuerdo con la cantidad de material. Una vez culminado el tratamiento, la pulpa celulósica es bombeada fuera del tanque y el polialuminio es retenido por el tamiz de disco, logrando generalmente un rendimiento de recuperación de celulosa entre el 55 – 85 % (IPPC, 2006; Robertson, 2021; Saville, 2009; Zanuttini, 2012).



**Figura 2.1.** Despulpador helicoidal vacío (A) y en funcionamiento (B)

Nota: Adaptado de *Vertical type hydropulper*, por Zawadiak, 2017, American Journal of Chemical Engineering

Este tipo de equipos suelen utilizarse comúnmente en laboratorios, plantas piloto y en menor medida en plantas recicladoras pues es necesario detener al equipo para descargar los productos antes de alimentar un nuevo lote. En la Figura 2.2 se indica el flujo del proceso del repulpeo por lotes (*batch re-pulping*) de 1 kg de envases asépticos Tetra Pak posconsumo previamente desarmados manualmente para facilitar el lavado y remoción de restos alimenticios. A los envases se adiciona agua según la consistencia necesaria y, una vez finalizado el repulpeo, la mezcla se filtra para separar al polialuminio de la pulpa de celulosa. Aunque no es objeto de este estudio, la pulpa de celulosa debería ser sometida a otros procesos para la recuperación de agua que se reutiliza en los lotes siguientes.

Los flujos másicos indicados en la Figura 2.2 se estimaron con base a las siguientes consideraciones y los ejemplos de cálculo se indican en el ANEXO II.

- Una consistencia del 12 %. El agua necesaria se calculó de acuerdo con la Ecuación 2.1.

$$\% C = \frac{m_{TTP}}{m_a} * 100$$

**Ecuación 2.1.** Consistencia de la mezcla para hidropulpeo

Donde:

$\% C$ : Consistencia de la mezcla [%]

$m_{TTP}$ : masa de Tetra Pak a ser procesado [kg]

$m_a$ : masa de agua [kg]

- Una recuperación promedio de celulosa del 70 % (Tandon, 2015).
- Un residuo (polialuminio) con una humedad del 37 % y una composición en materia seca del 11,63 % de aluminio y 37,21 % de LPDE (Khan et al., 2021).
- El requerimiento energético del equipo se calculó con información del ANEXO I y la Ecuación 2.2. El ejemplos de cálculo se indica en el ANEXO II.

$$CE = m * \frac{P}{c} * t$$

**Ecuación 2.2.** Consumo energético de los equipos

Donde:

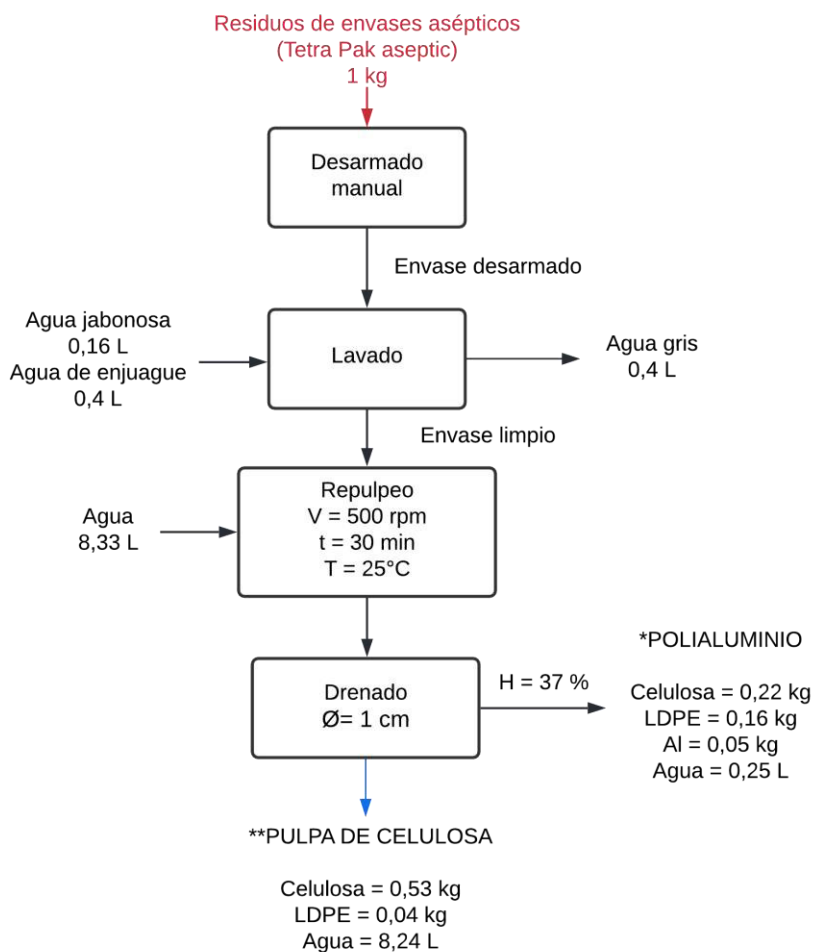
$CE$ : Consumo energético [kJ]

$m$ : capacidad utilizada

$c$ : capacidad total del equipo

$P$ : Potencia del equipo [kW]

$t$ : tiempo de operación [s]



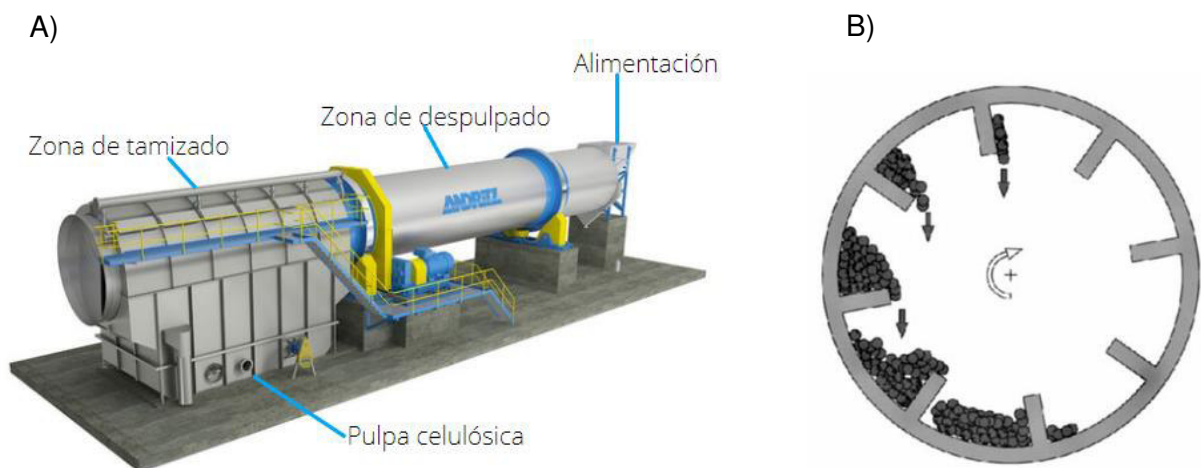
**Figura 2.2.** Diagrama de bloques y balance de masa de un despulpado batch

\*El PEAL es un material conformado principalmente por LDPE y aluminio, y residuos de fibras celulósicas adheridas.

\*\*Mezcla entre fibras de celulosa hidratadas y agua, con residuos de LDPE.

### 2.1.2 Hidropulpeo continuo

Los equipos empleados están estructurados, inicialmente en la zona de despulpado, por un tambor rotatorio con placas deflectoras e inclinado en 1° o 2° (Figura 2.3 A). Se suelen trabajar a altas consistencias entre el 14 – 20 %. Durante 20 a 30 minutos, la mezcla a procesar desciende pausadamente desde la parte superior a la zona de tamizado gracias al giro continuo (Figura 2.3 B) y simultáneamente las fibras de celulosa se van desprendiendo por la fuerza de cizalla. La zona de tamizaje, que puede estar anexa o independiente de la sección anterior, permite el paso de la pulpa de celulosa y retiene al polialuminio, logrando generalmente un rendimiento de separación del 80 - 85 % de celulosa (Saville, 2009; Zanuttini, 2012).



**Figura 2.3.** Despulpador continuo: macroestructura (A) y movimiento interno (B)

Nota: (A) Adaptado de *FiberFlow drum pulper*, por ANDRITZ GROUP, 2017, <https://www.andritz.com/newsroom-en/pulp-paper/2017-12-22-dongguan-fibreflow-drum-pulping-system>. (B) Adaptado de *Movimiento de la suspensión en el interior de un pulper tambor*, por Zanuttini, 2012, Red Iberoamericana para la Revalorización del Reciclado Celulósico.

## 2.2 Deslaminación con solventes orgánicos

La separación de los componentes de los envases asépticos Tetra Pak representa un gran desafío a causa de la diferente naturaleza de los tres materiales constitutivos. Al pretender incrementar el porcentaje de recuperación, se han investigado y puesto en práctica diversas soluciones alternativas, como por ejemplo el uso de solventes orgánicos para la disolución selectiva de polímeros (Zawadiak, 2017).

En la industria de polímeros, con el fin de reciclar estos materiales, se han estudiado formas de disolver los residuos plásticos al considerar su afinidad química con diferentes solventes. En el caso del polietileno se ha observado que su solubilidad en xileno incrementa si también sube la temperatura del proceso, especialmente si es cercana al punto de ebullición (139 °C o 412 K) del solvente (Agarwal et al., 2004).

La extracción de polímeros basada en solventes es una tecnología ampliamente investigada en el reciclaje de empaques plásticos multicapa posconsumo, pero su uso en envases asépticos aún es limitado (Kaiser et al., 2018). Uno de los puntos más importantes de esta técnica es el grado de pureza del polímero recuperado, por lo que en cada ciclo de lixiviación se busca alcanzar un alto porcentaje de recuperación del solvente, lo que a su vez implica un elevado consumo energético. En la práctica no se alcanza una recuperación total, en el polímero recuperado habrán moléculas de solvente adheridas, por lo que se debe incorporar reactivo fresco en cada nuevo ciclo (Zawadiak, 2017).

El modelo patentado por Grzybowski (2016) es referente a la separación de los tres materiales constitutivos de los envases asépticos posconsumo, al iniciar con la extracción del LDPE de la estructura del envase aséptico mediante lixiviación con xileno en ebullición, durante 3 horas. Una vez completada la disolución, la mezcla líquida de LDPE y xileno se bombea hacia un tanque de almacenamiento y luego hacia un evaporador para recuperar el solvente puro y el polietileno fundido; logrando una recuperación del 95 % del polímero. La capa sólida remanente en el reactor se trasvasa a una despulpadora para que las fibras de celulosa se hidraten y desliguen del aluminio, alcanzando un separación parcial. Posterior al filtrado y secado de esta mezcla de materiales, se utiliza tetracloruro de carbono como medio de suspensión pues su densidad ( $1,6 \text{ g/cm}^3$ ) es ligeramente superior a la de la celulosa ( $1,5 \text{ g/cm}^3$ ) permitiendo que ésta quede suspendida mientras que el aluminio al ser más denso ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ) sedimenta; recuperando así el 90 % de la celulosa y el 95 % del aluminio iniciales.

En la Figura 2.4 se indican las operaciones unitarias involucradas en la deslaminación de 1500 kg de envases asépticos Tetra Pak posconsumo. Estos son desarmados manualmente, para facilitar el lavado y secados con aire caliente previo al contacto con xileno y tetracloruro de carbono.

Para la estimación de los flujos presentados en el diagrama, se realizaron las siguientes consideraciones. Los ejemplos de cálculo se encuentran en el ANEXO III.

- Posterior al lavado, los envases presentaron una humedad del 15 %.
- Los procesos de secado fueron adiabáticos y utilizaron aire acondicionado. Se utilizó la Ecuación 2.3 para el cálculo de la cantidad de aire para el secado y la Ecuación 2.4 para la estimación de la energía necesaria para el precalentamiento del aire, considerando que la humedad absoluta fue constante. Las condiciones del aire ambiental a la entrada y salida del secado se indican en la Tabla A3.1.

$$a_h = a_s(1 + Y_a)$$

**Ecuación 2.3.** Aire para el secado

Donde:

$a_h$ : aire precalentado [kg]

$a_s$ : aire seco [kg]

$Y_a$ : humedad absoluta del aire ambiental [kg agua/kg aire seco]

$$Q_c = \Delta \hat{H} = a_s * (\hat{H}_s - \hat{H}_e)$$

**Ecuación 2.4.** Balance de energía para el precalentamiento

Donde:

$Q_c$ : Energía para el acondicionamiento del aire ambiental [kJ]

$\hat{H}_s$ : Entalpía específica luego del acondicionamiento [kJ/kg]

$\hat{H}_e$ : Entalpía específica antes del acondicionamiento [kJ/kg]

- Posterior a los procesos de secado, el material tuvo un contenido de humedad del 10 %.
- El vapor de agua sobrecalentado a 1 atm y 150 °C se empleó como fluido de calentamiento. Para el cálculo del vapor necesario en el acondicionamiento del xileno, se utilizó la Ecuación 2.5 y las condiciones indicadas en la Tabla A3.2.

$$m_x * C_{p_x} * (T_s - T_e) = -m_v * [C_{p_l}(T_l) - \hat{H}_V]$$

**Ecuación 2.5.** Balance de energía para el intercambio de calor

Donde:

$m_z$ : masa de xileno (x) o vapor (v) [kg]

$C_{p_z}$ : capacidad calorífica de xileno (x) o agua (l) [kJ/ kg °C]

$T_z$ : temperatura de entrada (e) o salida (s) del xileno; o de salida del agua (l) [°C]

$\hat{H}_V$ : Entalpía específica del vapor sobrecalentado [kJ/kg]

- Para el hidropulpeo se tomó en cuenta una consistencia del 12 %.
- Posterior al filtrado, la humedad de la mezcla fue del 60 %.
- El calor específico del Tetra Pak se calculó en base a la Ecuación 2.6. La composición porcentual y capacidades caloríficas de los materiales constitutivos se encuentran en la Tabla A3.3.

$$C_{p_{TTP}} = x_c * (C_{p_c}) + x_p * (C_{p_p}) + x_a * (C_{p_a})$$

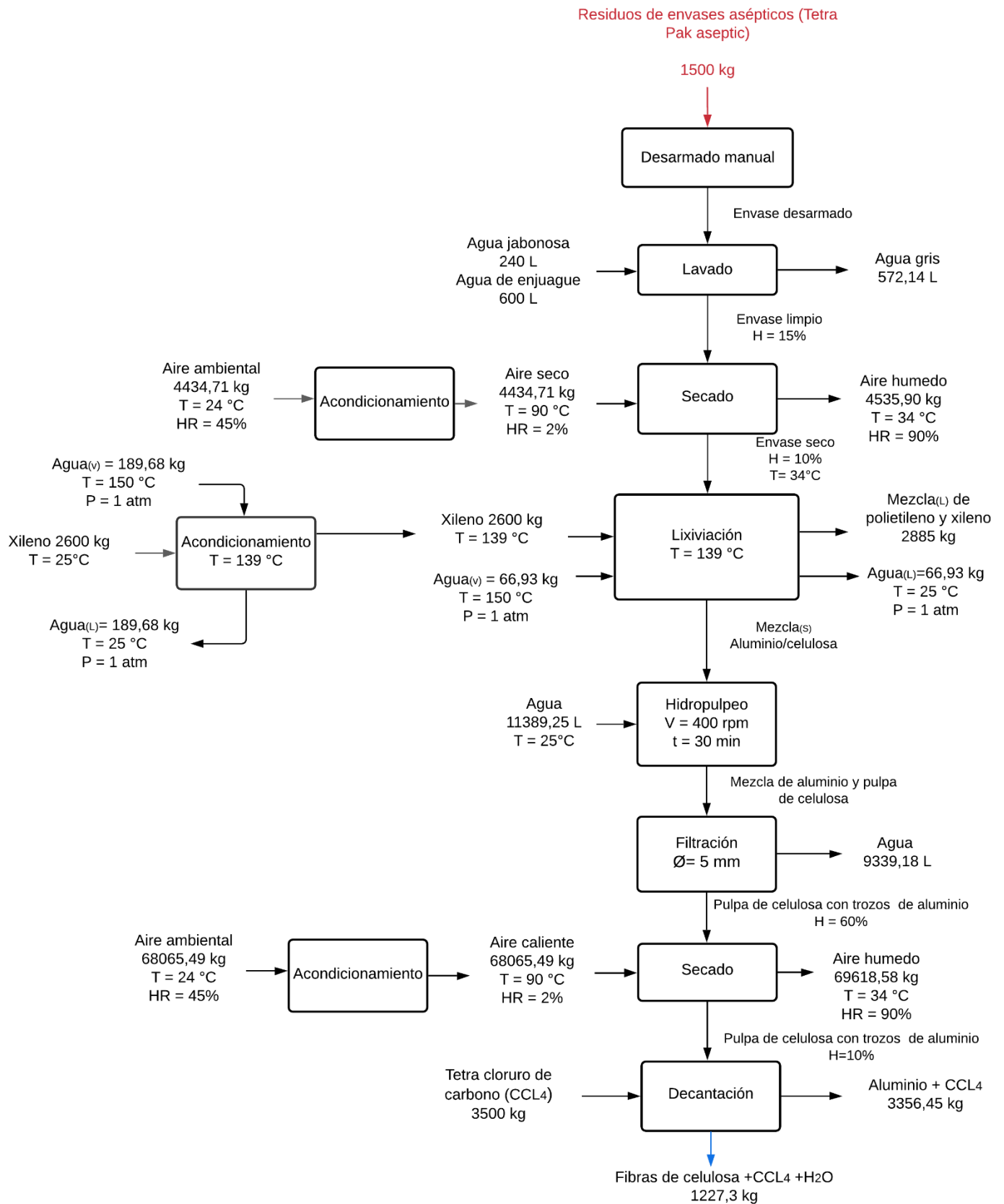
**Ecuación 2.6.** Capacidad calorífica de una mezcla



Donde:

$C_{p_z}$ : capacidad calorífica del Tetra Pak (TTP), celulosa (c), polietileno (p) o aluminio (a) [kJ / kg°C]

$x_z$ : fracción porcentual de celulosa (c), polietileno (p) o aluminio (a)



**Figura 2.4.** Diagrama de bloques y balance de masa de la deslaminação con solventes orgánicos

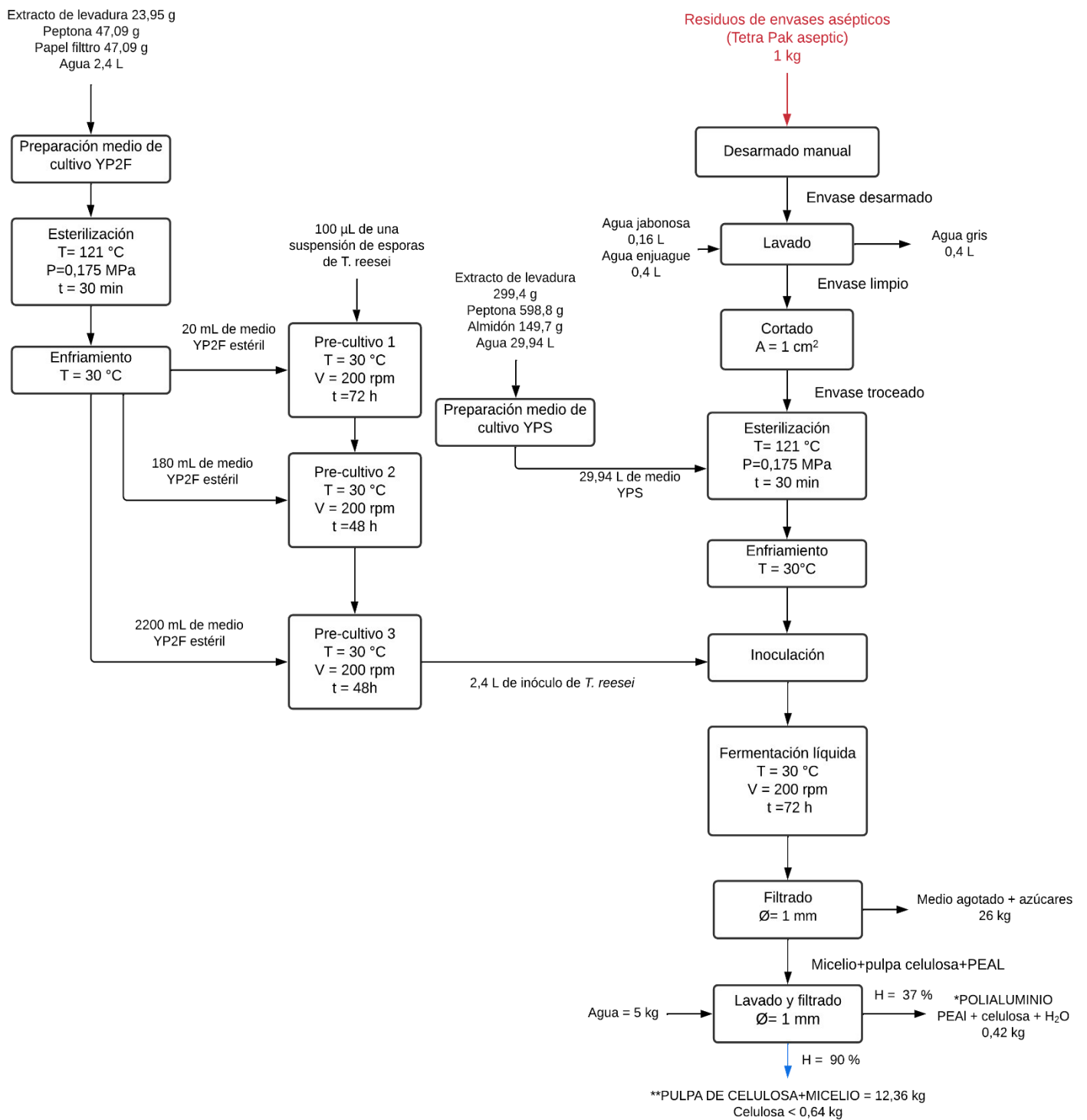
## 2.3 Acción directa del hongo *Trichoderma reesei* en un sistema de fermentación líquida

El sistema enzimático celulolítico del hongo filamentoso *Trichoderma reesei* es uno de los más estudiados, principalmente para la generación de biocombustibles a partir de material celulósico. Las investigaciones determinan que el cóctel celulolítico secretado por este hongo se conforma por al menos cinco endoglucanasas (EG), dos celobiohidrolasas (CBH) y dos  $\beta$ -glucosidasas (BGL). Estas enzimas actúan de manera secuencial y sinérgica con el fin de degradar al sustrato (Gutiérrez et al., 2015)

La recuperación y el reaprovechamiento de materiales es una alternativa que busca generar beneficios tanto ambientales como económicos al disminuir el consumo de sustancias químicas nocivas y de recursos naturales y energéticos. Es así como se busca incluir a microorganismos y enzimas celulolíticas en el manejo de residuos sólidos (Jain et al., 2017). De esta manera, Guevara (2020) y Yépez (2021) plantean las primeras aproximaciones respecto a la remoción de la capa de celulosa de los envases asépticos Tetra Pak, determinando que en un sistema de fermentación líquida (FL), la acción directa del hongo *T. reesei* sobre una concentración de 3,3 % de Tetra Pak permite aproximadamente un 85 % de remoción. Inicialmente, se esterilizan el medio de cultivo YPS (extracto de levadura 1,0 %, peptona 2,0 % y almidón 0,5 %) junto a los trozos de envases limpios. Por otro lado, en el medio YP2F estéril (extracto de levadura 1,0 %, peptona 2,0 % y papel filtro 2 %) se prepara el inóculo de *T. reesei* mediante 3 pre-cultivos consecutivos. Culminada la fermentación, el cultivo se filtra para separar el medio agotado de los sólidos. Mediante un lavado y filtrado simultáneos, se remueven del polialuminio al micelio y a la celulosa. En la Figura 2.5 se indican las cantidades estimadas de los insumos requeridos para llevar a cabo esta hidrólisis enzimática.

Para la estimación de los flujos presentados en el diagrama, se consideró que:

- Fueron necesarios 3 pre-cultivos para alcanzar el volumen de inóculo para procesar 1 kg de Tetra Pak.
- La duración del segundo y tercer pre-cultivo fue de 48 horas cada uno.
- Se requirieron 5 kg de agua para la remoción del micelio y la celulosa del PEAI.
- La humedad del PEAI fue del 37 %.
- Los requerimientos energéticos de los equipos se calcularon con la información del ANEXO I y la **Ecuación 2.2** antes mencionada.



**Figura 2.5.** Diagrama de bloques y balance de masa para la acción directa del hongo *T. reesei* en un sistema de fermentación líquida

\*Conformado principalmente por LDPE y aluminio, y residuos de fibras celulósicas hidratadas.

\*\*Mezcla entre fibras de celulosa hidratadas, agua y el micelio del hongo

### 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 Resultados

Para la determinación de los insumos materiales y energéticos del tratamiento de 1 kg de Tetra Pak mediante deslaminación con solventes orgánicos se consideró una relación lineal y directamente proporcional entre las corrientes másicas estimadas en la Figura 2.4 y la alimentación de 1500 kg. Para esta relación lineal se empleó la Ecuación 3.1 y el ejemplo de cálculo se indica en el ANEXO III. Los resultados obtenidos fueron empleados para el análisis y comparación en los siguientes apartados.

$$m' = \frac{M'}{1500}$$

**Ecuación 3.1.** Recálculo para el tratamiento de 1 kg de Tetra Pak

Donde:

$M'$ : insumo másico estimado para una alimentación de 1500 kg

$m'$ : insumo másico estimado para una alimentación de 1 kg

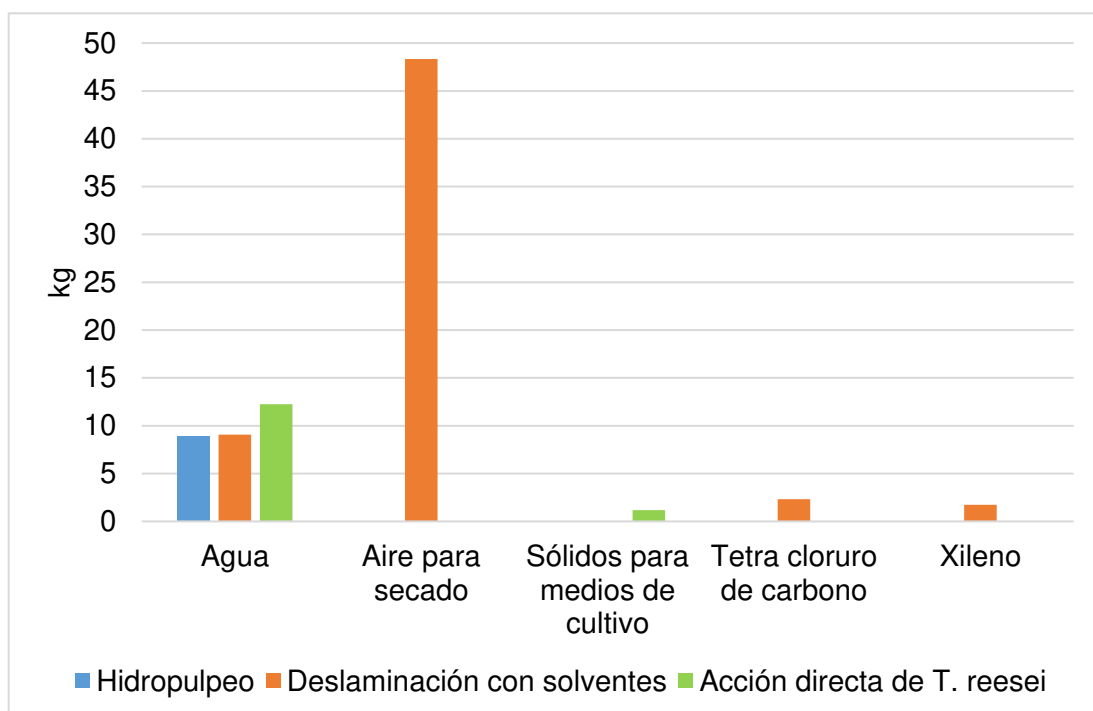
##### 3.1.1 Evaluación de los insumos materiales

En la Figura 3.1 se observa que el método de acción directa de *T. reesei* en un sistema de FL requirió un 38 % y un 35 % más agua que el hidropulpeo y la deslaminación con solventes, respectivamente. El agua se usó principalmente en la preparación del medio YPS y el lavado del polialuminio. Si bien éste método remueve el 85 % de las fibras celulósicas del envase, no todas podrían ser reutilizadas como tal, pues su estructura se debilitaría como consecuencia de la hidrólisis enzimática y del consumo de azúcares por parte del hongo. Con respecto a los medios de cultivo residuales de los procesos de hidrólisis y otros subproductos no presentarían mayor toxicidad y podrían ser aprovechados (Seluy, 2015). En este caso, el medio residual tiene una concentración de 2,2 mM de azúcares reductores que podrían ser utilizados en la formulación de nuevos medios de cultivo.

Mediante la deslaminación con solventes se separa a los 3 materiales constitutivos del Tetra Pak y se alcanza una remoción del 90 % de celulosa, es decir un 20 % y 5 % más que el hidropulpeo y la acción directa del hongo *T. reesei*, respectivamente. Sin embargo, se destaca que el 79 % del total de los insumos correspondió a aire acondicionado para los procesos de secado; el requerimiento aproximado de un 3 % más agua que el hidropulpeo; y el uso de sustancias que representan un riesgo moderado para la salud

(New Jersey Department of Health, 2017) y el medio ambiente, especialmente el CCL<sub>4</sub> (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [ATSDR], 2005). Además, serían necesarios procesos complementarios para la recuperación del agua residual del hidropulpeo, y de los solventes usados durante la deslaminación; en el último caso, específicamente para la recuperación de xileno con altos niveles de pureza, la demanda energética sería alta al emplear destilación o evaporación (Zawadiak, 2017).

El hidropulpeo es un proceso ampliamente utilizado en el reciclaje de materiales celulósicos por su sencillez en cuanto a maquinaria, operaciones unitarias y tiempo de ejecución menor a una hora (Fatoki y Omoniyi, 2015). Con este proceso se alcanza una remoción del 70 % de la celulosa, considerada como una fuente secundaria de fibra para la elaboración de diversos productos como envases secundarios o terciarios de alimentos ya que no presenta residuos de sustancias nocivas para la salud (Riveros, 2018). Los efluentes generados son producto de la retroalimentación del agua recuperada luego del filtrado y prensado de la pulpa celulósica, en este efluente paulatinamente se incrementan los sólidos suspendidos totales constituidos principalmente por residuos de fibras y LPDE, que representarían un bajo riesgo ambiental (Zanuttini, 2012).



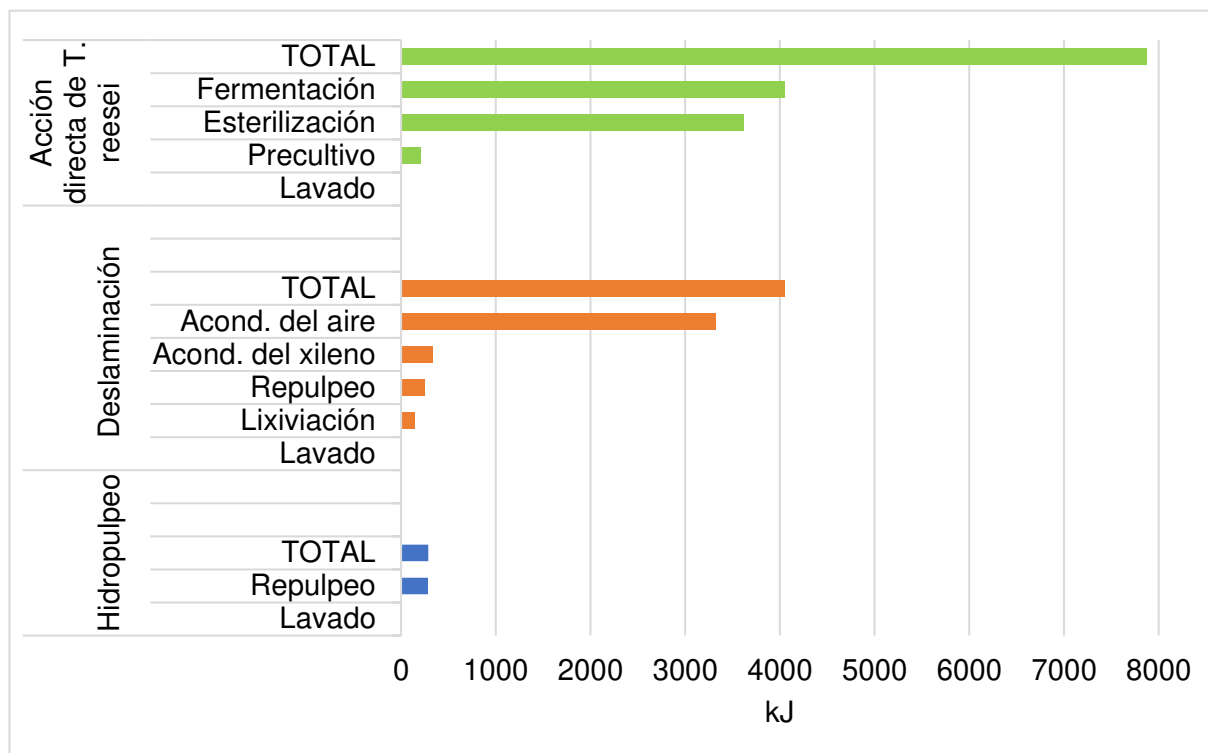
**Figura 3.1.** Comparación del consumo de materiales entre las rutas clásicas y la biotecnológica

### 3.1.2 Evaluación de los insumos energéticos

Como se indica en la Figura 3.2, la demanda energética de la ruta biotecnológica fue aproximadamente el doble con relación a la deslaminación con solventes, y 27 veces superior a la requerida por el hidropulpeo. La esterilización y fermentación fueron los procesos que mayor gasto energético representaron; en el primer caso para disminuir la carga de microorganismos competidores del hongo, y en el segundo para brindar un medio favorable para la producción de celulasas y la consecuente remoción de la celulosa. Esto concuerda con Anekwe et al. (2021), pues menciona que una de las desventajas de un sistema de FL es el alto requerimiento de energía para mantener el cultivo líquido en las condiciones óptimas de desarrollo para los microorganismos, ya que de lo contrario se afectarían los rendimientos. Adicionalmente, esta alternativa biotecnológica demanda alrededor de 10 días, es decir el mayor tiempo de ejecución en comparación con las rutas clásicas.

El proceso de deslaminación con solventes fue el siguiente con el mayor requerimiento energético, especialmente en el acondicionamiento del aire para los procesos de secado ya que representó el 82 % del total de la energía demandada. Aunque no fue analizado en el presente trabajo, para la reutilización del xileno una vez completada la lixiviación del polietileno de la matriz del envase, se presume un alto consumo energético para mantener al polietileno sobre su punto de fusión (105 °C – 115 °C) con el fin de evaporar y recuperar al solvente; caso contrario, se incrementaría la contaminación del polímero con xileno, limitando sus posibilidades de uso por la posible degradación de sus propiedades y los efectos nocivos que podría producir a la salud. Pese a que no se pudo estimar un tiempo de proceso, se puede asumir que esta ruta no es corta ya que ejecuta operaciones como lixiviación, decantación y recuperación de solventes que demandarían varias horas (Georgiopoulou et al., 2021).

Para el hidropulpeo, el principal equipo que demanda energía es el tanque desagregador o *pulper* durante 30 minutos. Además, las fibras de celulosa al presentar residuos de sustancias adhesivas y LDPE, necesitarían un tratamiento adicional para remover las impurezas antes de la reutilización de la celulosa (Turrado et al., 2012).



**Figura 3.2.** Comparación del consumo energético entre las rutas clásicas y la biotecnológica

### 3.2 Conclusiones

La ruta biotecnológica de acción directa del hongo *T. reesei* en un sistema de FL, que permite la remoción del 85 % de la celulosa del envase, requirió el 38 % y el 35 % más agua que el hidropulpeo y la deslaminación con solventes, respectivamente; respecto a la energía, demandó el doble con relación a la deslaminación con solventes, y 27 veces la requerida por el hidropulpeo; y tiene una duración de 10 días. Sin embargo, los efluentes generados representarían un menor riesgo ambiental en comparación con las rutas clásicas, en particular con el deslaminado con solventes.

El proceso de deslaminación con solventes orgánicos permite separar los 3 materiales constitutivos del Tetra Pak y remover el 90 % de la celulosa. El acondicionamiento del aire para el secado representó el 82 % del total de la energía utilizada. Además, el uso de  $\text{CCL}_4$  y xileno hacen necesaria la implementación de procesos de recuperación de los solventes, lo que incrementaría la demanda de energía, tiempo y equipos, ya que de lo contrario la celulosa, aluminio o polietileno tendrían una alta carga de residuos que podrían mermar sus propiedades o ser un riesgo para la salud.

El hidropulpeo, que permite remover en promedio el 70 % de la celulosa del Tetra Pak, fue el proceso con los menores requerimientos en insumos másicos, energéticos y tiempo. Los



efluentes presentarían principalmente como sólidos suspendidos a residuos de celulosa y LDPE, que representarían bajo riesgo ambiental.

### **3.3 Recomendaciones**

Validar de forma experimental los resultados de este trabajo, replicando los ensayos reportados en la bibliografía y que han servido de base para los cálculos realizados. Esto con la finalidad de cuantificar aquellos insumos no medidos en los ensayos originales o que no han sido reportados.

Determinar la composición de los efluentes tanto de las rutas clásicas como de la biotecnológica, para definir los insumos necesarios en su tratamiento y contar con información global de los procesos.

Determinar las propiedades físicas y químicas de la celulosa recuperada para determinar su uso potencial.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Agarwal, R., Prasad, D., Maity, S., Gayen, K., y Ganguly, S. (2004). Experimental measurement and model based inferencing of solubility of polyethylene in xylene. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 37(12), 1431–1433. <https://doi.org/10.1252/jcej.37.1427>.
- [2] Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2005). *Tetracloruro de Carbono*. [www.atsdr.cdc.gov/es](http://www.atsdr.cdc.gov/es).
- [3] Anekwe, I., Khotseng, L., y Isa, Y. M. (2021). The Place of Biofuel in Sustainable Living; Prospects and Challenges. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00068-6>.
- [4] Casa, M. (2018). *Caracterización de glicosidasas y permeasas fúngicas implicadas en el transporte y metabolismo de azúcares* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/106344>.
- [5] Diop, C., y Lavoie, J.-M. (2017). Isolation of Nanocrystalline Cellulose: A Technological Route for Valorizing Recycled Tetra Pak Aseptic Multilayered Food Packaging Wastes. *Waste and Biomass Valorization*, 8, 42–46. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9585-2>.
- [6] Estrella, F. (2013). Diseño de una planta para recuperación de aluminio de envases multicapa mediante lixiviación con solventes orgánicos y fundición [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. In *Repositorio Digital Institucional de la Escuela Politécnica Nacional*. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6358/1/CD-4891.pdf>.
- [7] Fatoki, J., y Omoniyi, T. (2015). Design and fabrication of a hydropulper for desintegrating disused Tetra Pak® beverage cartons. *European International Journal of Science and Technology*, 4(6), 114–116. <https://www.researchgate.net/publication/331036875>.
- [8] Georgiopoulou, I., Pappa, G., Vouyiouka, S., y Magoulas, K. (2021). Recycling of post-consumer multilayer Tetra Pak ® packaging with the Selective Dissolution-Precipitation process. *Resources, Conservation & Recycling*, 165, 105268. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105268>.
- [9] Grzybowski, P. (2016). *Device and method for separation of components of composite packaging materials* (Patent No. 2016/209094).

<https://patentimages.storage.googleapis.com/90/43/93/e4eb706dce85f6/WO2016209094A1.pdf>.

- [10] Guevara, A. (2020). *Obtención de extractos enzimáticos con actividad celulolítica mediante fermentación del hongo Trichoderma reesei sobre celulosa y posible aplicación en el bio-pulpeo de envases multicapa*. [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20818>.
- [11] Gutiérrez, I., Moreno, N., y Montoya, D. (2015). Mechanisms and regulation of enzymatic hydrolysis of cellulose in filamentous fungi: Classical cases and new models. *Revista Iberoamericana de Micología*, 32(1), 2–6. <https://doi.org/10.1016/j.riam.2013.10.009>.
- [12] Hidalgo, M., Neves, F., y Baena, E. (2013). Posibilidades de fabricación con el polietileno aluminio obtenido del reciclaje de envases multicapas. *Informador Técnico*, 77(2), 101–103. <https://doi.org/10.23850/22565035.51>.
- [13] IPPC. (2006). *Mejores Técnicas Disponibles en la Industria de la Pasta y el Papel*. 248–250. [https://prtr-es.es/Data/images//BREF Pasta y Papel \(versión en castellano\)-7C4A350C484D6A0E.pdf](https://prtr-es.es/Data/images//BREF_Pasta_y_Papel_(versión_en_castellano)-7C4A350C484D6A0E.pdf).
- [14] Jain, A., Yadav, S., Nigam, V, y Sharma, S. (2017). Fungal-Mediated Solid Waste Management: A Review. In *Mycoremediation and Environmental Sustainability, Fungal Biology* (pp. 153–156). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-68957-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68957-9_9).
- [15] Jordan, D., Bowman, M., Braker, J., Dien, B., Hector, R., Lee, C., Mertens, J., y Wagschal, K. (2012). Plant cell walls to ethanol. *Biochemical Journal*, 442(2), 242–243. <https://doi.org/10.1042/BJ20111922>.
- [16] Kaiser, K., Schmid, M., y Schlummer, M. (2018). Recycling of polymer-based multilayer packaging: A review. *Recycling*, 3(1), 8–13. <https://doi.org/10.3390/recycling3010001>.
- [17] Khan, M., Laitinen, V., Havukainen, J., y Horttanainen, M. (2021). Carbon footprint of different recovery options for the repulping reject from liquid packaging board waste treatment process. *Waste Management*, 136(April), 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.10.003>.
- [18] Ma, Y. (2018). Changing Tetra Pak: From waste to resource. *Science Progress*, 101(2), 100–101. <https://doi.org/10.3184/003685018X15215434299329>.

- [19] Martínez, G., De la Colina, A., Martínez, M., del Coz, J., Gencel, O., Ávila, L., Barrera, C., Varela, V., y Martínez, A. (2019). Recovery and Reuse of Waste Tetra Pak Packages by Using a Novel Treatment. In *Trends in Beverage Packaging* (1st ed., Vol. 16, pp. 304–310). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816683-3.00011-6>.
- [20] Mukhopadhyay, A. (2010). *Process for delamination of laminated packaging* (Patent No. 2011/077450 A2). [https://patentscope.wipo.int/search/docs2/pct/WO2011077450/pdf/Y3y-CCuPqcv6xMGYrCB2MLYiL32Y\\_KQrK-GU\\_vAv6vuB\\_lp2gyQseaXZsq4dUNuoNIJN4Hj561XObcSjo8ifBX7CG8OkXxoLO6l8waXsu755OqLdVAV2petJdQ-ahzjz?docId=id00000014329422](https://patentscope.wipo.int/search/docs2/pct/WO2011077450/pdf/Y3y-CCuPqcv6xMGYrCB2MLYiL32Y_KQrK-GU_vAv6vuB_lp2gyQseaXZsq4dUNuoNIJN4Hj561XObcSjo8ifBX7CG8OkXxoLO6l8waXsu755OqLdVAV2petJdQ-ahzjz?docId=id00000014329422).
- [21] New Jersey Department of Health. (2017). *Hoja Informativa sobre Sustancias Peligrosas*.
- [22] Raj, B., Kumar, J., y Kanta, V. (2020). Plastic/packaging waste separation from MSW and its conversion and used as value-added products in different applications: An eco-sustainable approach. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 27(2), 200–201. [http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/54872/1/IJEMS\\_27%282%29\\_193-208.pdf](http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/54872/1/IJEMS_27%282%29_193-208.pdf).
- [23] Riveros, M. (2018). *Revision of Alternatives of Global Inverse Logistics Implementation for Tetra Pak* [Tesis de masterado MBA, Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/12552/2018miguelriveros.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [24] Robertson, G. (2021). Recycling of aseptic beverage cartons: A review. *Recycling*, 6(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/RECYCLING6010020>.
- [25] Sánchez, A., Romero, M., Sánchez, D., Llana, R., Ron, A., y Valentín, P. (2016). *Guía de análisis de peligros y puntos de control crítico (APPCC) leches UHT y pasteurizadas* (pp. 59–60). Federación Nacional de Industrias Lácteas. [https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/docs/documentos/seguridad\\_alimentaria/gestion\\_riesgos/guia\\_leche\\_final.pdf](https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/docs/documentos/seguridad_alimentaria/gestion_riesgos/guia_leche_final.pdf).
- [26] Saville, F. (2009). Energy and Paper Recycling: an Investigation of Repulping. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 94(3), 3–109. <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0300490>.

- [27] Seluy, L. G. (2015). *Procesos de tratamiento y valorización de efluentes de la industria cervecera* [[Tesis doctoral, Universidad Nacional del Litoral]]. <http://web10.unl.edu.ar:8080/tesis/handle/11185/905>.
- [28] Tandon, R. (2015). *Repulpability and paper making potencial of used Tetra Pak Carton (UTPC) in comparison to Indian and Aamerican OCC* (pp. 5–6). <https://doi.org/10.4067/S0717-69962016000100002>.
- [29] Tetra Pak. (2021a). *Historia de Tetra Pak*. <https://www.tetrapak.com/es-ec/about-tetra-pak/the-company/history>.
- [30] Tetra Pak. (2021b). *Material para envasado para envases de cartón Tetra Pak*. <https://www.tetrapak.com/es-ec/solutions/packaging/packaging-material/materials#>
- [31] Tetra Pak (2021c). *COVID-19 and the Food Safety - Environment dilemma*. <https://www.ipsos.com/sites/default/files/ct/news/documents/2020-11/tetra-pak-index-2020-report.pdf>.
- [32] Tetra Pak (2021d). *Tetra Pak en cifras*. <https://www.tetrapak.com/es-ec/about-tetra-pak/the-company/facts-figures>.
- [33] Turrado, J., Dávalos, M., Fuentes, F., y Saucedo, A. (2012). Envases de Cartón para Líquidos como Fuente de Fibra Secundaria. *Informacion Tecnologica*, 23(3), 61–63. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000300008>.
- [34] Yan, D., Peng, Z., Liu, Y., Li, L., Huang, Q., Xie, M., y Wang, Q. (2015). Optimizing and developing a continuous separation system for the wet process separation of aluminum and polyethylene in aseptic composite packaging waste. *Waste Management*, 35(1), 21–22. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.008>.
- [35] Yépez, G. (2021). *Biopulpeo de envases Tetra Pak® reciclados mediante la acción directa del hongo Trichoderma reesei o de sus extractos enzimáticos en conjunto con la levadura Saccharomyces cerevisiae*. [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional].
- [36] Zanuttini, M. (2012). *Reciclado celulósico* (1st ed.). Red Iberoamericana para la Revalorización del Reciclado Celulósico. [https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2012\\_RIARREG+Zanuttini\\_Reciclado+Celulosico.pdf](https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2012_RIARREG+Zanuttini_Reciclado+Celulosico.pdf).

[37] Zawadiak, J. (2017). Tetra Pak Recycling – Current Trends and New Developments. *American Journal of Chemical Engineering*, 5(3), 39–41. <https://doi.org/10.11648/j.ajche.20170503.12>.

## 5 ANEXOS

### ANEXO I

#### Información técnica de los equipos

**Tabla A1.1.** Potencia y capacidad de los equipos empleados

<b>Equipo</b>	<b>Potencia [kW]</b>	<b>Capacidad</b>
Lavadora	1,8	200 kg
Despulpador	560	35 m <sup>3</sup>
Autoclave	3	50 l
Bioreactor	0,09	200 l

## ANEXO II

### Cálculos referentes al hidropulpeo

Para el cálculo del agua necesaria para el hidropulpeo, se empleó la Ecuación 2.1 y se consideró una consistencia del 12 %.

$$\% C = \frac{m_{TTP}}{m_a} * 100$$

**Ecuación 2.1.** Consistencia de la mezcla para hidropulpeo

$$m_a = \frac{1 \text{ kg}}{0,12} = 8,33 \text{ kg}$$

El requerimiento energético del despulpador se calculó con la Ecuación 2.2.

$$CE = m * \frac{P}{c} * t$$

**Ecuación 2.2.** Consumo energético del despulpador

$$CE = 9,89 \text{ L} * \frac{560 \text{ kW}}{35000 \text{ L}} * 1800 \text{ s} = 284,83 \text{ kJ}$$

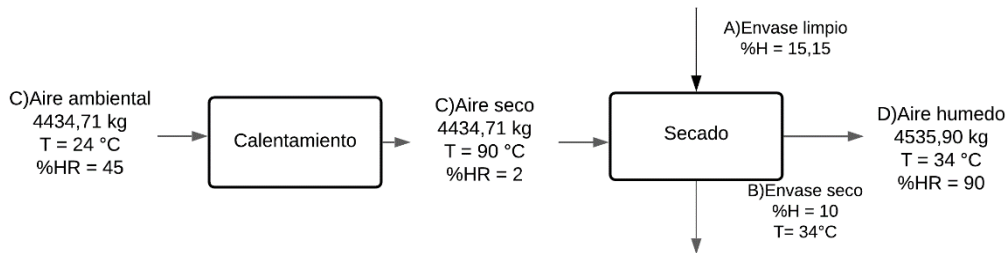


## ANEXO III

### Cálculos referentes a la delaminación con solventes orgánicos

- Balance de masa en el secado

En la Figura A3.1 se indican las corrientes de aire empleados para el secado de los envases lavados. Para el cálculo del flujo de aire necesario, en la Tabla A3.1 se señala la información necesaria obtenida de una carta psicrométrica a 101,325 kPa.



**Figura A3.1.** Secado de los envases lavados

**Tabla A3.1.** Datos del aire para secado

Parámetros	Punto 1 (Aire ambiental)	Punto 2 (Aire seco)	Punto 3 (Aire húmedo)
Temperatura de bulbo húmedo [°C]	16,5	33	32,8
Temperatura de bulbo seco [°C]	24	90	34
Humedad Absoluta (Y) [kg agua/ kg aire seco]	0,008	0,008	0,031
Humedad Relativa (% HR)	45	2	90
Entalpía [kJ/kg aire seco]	45,2	114,5	114,5

*Balance de masa general*

$$A = B + A_{\text{evap}}$$

$$B = 1767,9 - (0,031 - 0,008) \cdot a_{\text{seco}}$$

*Balance de masa de agua*

$$A \cdot x_A + a_{\text{seco}} \cdot Y_C = B \cdot x_B + a_{\text{seco}} \cdot Y_D$$

$$0,1515(1767,9) + 0,008a_{\text{seco}} = 0,1B + 0,031a_{\text{seco}}$$

$$a_{\text{seco}} = 4399,52 \text{ kg} \quad C = 4434,71 \text{ kg} \quad B = 1666,71 \text{ kg}$$

- Balance de energía en el acondicionamiento del aire de secado

Con la Ecuación 2.4 se calculó la energía necesaria para calentar el aire.

$$Q_c = \Delta \hat{H} = a_s * (\hat{H}_s - \hat{H}_e)$$

**Ecuación 2.4.** Balance de energía para el precalentamiento

$$Q_c = 4399,52 * (114,5 - 45,2) = 304886,74 \text{ kJ}$$

- Balance de energía en el calentamiento del xileno

Como fluido de calentamiento se ingresó vapor sobresaturado a 1 atm y 150 °C, que luego de la transferencia de calor salió como líquido subenfriado a 25 °C. Se utilizó la Ecuación 2.5 para el estimar la cantidad de vapor necesario.

**Tabla A3.2.** Datos para el acondicionamiento del xileno

Parámetros	$\hat{H} [\frac{\text{KJ}}{\text{kg}}]$	$C_p [\frac{\text{KJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}]$	$T_e [^\circ\text{C}]$	$T_s [^\circ\text{C}]$
Vapor sobresaturado (v)	2776,6	-	150	-
Líquido subenfriado (l)	-	4,18	-	25
Xileno (x)	-	1,71	25	139

$$m_x * C_{p_x} * (T_s - T_e) = -m_v * [C_{p_l}(T_l) - \hat{H}_v]$$

**Ecuación 2.5.** Balance de energía para el intercambio de calor

$$2600 * 1,71 * (139 - 25) = -m_v * [4,18(25) - 2776,6]$$

$$m_{\text{vapor}} = 189,68 \text{ kg}$$

- Balance de energía en la lixiviación

Para el cálculo del flujo de vapor necesario para la disolución de la capa de LDPE en xileno fueron necesarios los datos de la Tabla A3.2, Tabla A3.3 y el cálculo de la capacidad calorífica del Tetra Pak mediante la Ecuación 2.6.

**Tabla A3.3.** Capacidades caloríficas de los componentes del Tetra Pak

Material	$C_p \left[ \frac{\text{KJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right]$	Material constituyente (%)
Celulosa	0,69	75
LDPE	2,3	20
Aluminio	0,89	5

$$C_{p\text{TTP}} = x_c * (C_{pc}) + x_p * (C_{pp}) + x_a * (C_{pa})$$

**Ecuación 2.6.** Capacidad calorífica de una mezcla

$$C_{p\text{TP}} = 0,75(0,69) + 0,2(2,3) + 0,05(0,89) = 1,022 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

- Ejemplo de recálculo de insumos para una alimentación del 1kg. En el caso del aire de secado

$$m' = \frac{M'}{1500}$$

**Ecuación 3.1.** Recálculo para el tratamiento de 1 kg de Tetra Pak

$$m' = \frac{4434,71}{1500} = 2,95 \text{ kg}$$