



Proyecto demostrativo

Frigorífico Pando

(Ontilcor S.A.)

Uso de residuos de sólidos de aguas verdes
como combustible alternativo

Evaluación técnica-económica

Ing. Quím. MSc. Víctor Emmer

Ec. MSc. María Ester Zaha

Diciembre 2020

Contenido

1.	Acerca de este documento	3
2.	Resumen ejecutivo	4
3.	Introducción	5
4.	Objetivos del estudio	6
4.1	Objetivo general.....	6
4.2	Objetivos específicos.....	6
5.	Antecedentes y marco teórico	6
5.1	Generación de residuos en frigoríficos y sus características para la valorización	6
5.2	Uso de residuos como combustibles alternativos y el potencial de aplicación para sólidos de aguas verdes (contenido ruminal)	8
6.	Descripción del caso de estudio.....	9
7.	Resultados	11
7.1	Plan de monitoreo.....	11
7.2	Evaluación técnica.....	14
7.3	Evaluación económica.....	15
8.	Conclusiones.....	26
9.	Referencias	30

1. Acerca de este documento

En el presente documento se detalla la información relativa al proyecto demostrativo de desarrollo de un sistema de uso de residuos de aguas verdes¹ como combustible alternativo en Frigorífico Pando (Ontilcor S.A.) con el fin de generar conocimiento respecto a la tecnología, analizando los aspectos asociados al diseño, la instalación y el seguimiento del proyecto.

La evaluación de los resultados obtenidos de la experiencia, es fundamental en la búsqueda de alternativas de mejora de la tecnología y en la promoción para su replicación.

El documento comienza con una breve introducción en la que se reconocen los antecedentes del sector y los problemas asociados a la gestión de los residuos que generan. Además, se presenta al Proyecto Biovalor y al proyecto de Ontilcor como caso particular de estudio.

A continuación, se plantean los objetivos generales y específicos de la evaluación realizada, indicando los aspectos particulares analizados, propios del proyecto y la tecnología implementada.

Se presenta luego una breve introducción al marco teórico aplicado al proyecto, describiendo las bases de la tecnología y puntualizando sus principales características que fueron las bases para el análisis realizado.

En la siguiente sección se presentan los resultados obtenidos y sistematizados durante el seguimiento del proyecto, determinando los parámetros de control del proceso y los indicadores necesarios para la evaluación del desempeño del sistema. Además, se realiza la evaluación económica del proyecto bajo distintas hipótesis, que permiten analizar tanto la sostenibilidad del proyecto como el potencial de replicabilidad de la tecnología.

Por último, se detallan las conclusiones de la implementación del proyecto, tanto desde el punto de vista técnico como económico, así como las lecciones aprendidas, la identificación de mejoras y las necesidades de profundización en el análisis.

¹Estos se componen del material semi-procesado (contenido ruminal) contenido en el estómago del animal en el momento de la faena. Puede contener también el agua de lavado de los corrales y salas de espera del establecimiento. En estos casos se incorpora el estiércol, el cual puede también contener tierra y materiales inertes (arena, piedras, etc.). Más información sobre residuos en el sector frigoríficos bajo este link: <https://biovalor.gub.uy/descarga/ficha-tecnica-de-residuos-frigorificos/>

2. Resumen ejecutivo

El sector frigorífico es de gran importancia, dado el aporte a la economía del país, y si bien mucho se ha avanzado en el aumento de la eficiencia de los procesos y la mejora de la gestión ambiental, aún quedan algunos aspectos que requieren continúen siendo evaluados.

En este sentido, ha surgido el proyecto de Frigorífico Pando para el uso de residuos de sólidos de aguas verdes como combustible alternativo, a través del cual no sólo se consigue una gestión ambientalmente adecuada al residuo generado, sino también se logra un aprovechamiento de energético del residuo, reduciendo el consumo de leña en la planta.

El proyecto consistió en el recambio de la caldera utilizada para generar vapor necesario en los procesos productivos, a leña como combustible principal, pero que cuente con la posibilidad de incorporar los sólidos de aguas verdes, que se generan en la planta de tratamiento de efluentes y representan un problema importante para el frigorífico.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el tiempo que el proyecto lleva operando, el sistema es capaz de incorporar sin inconvenientes todo el residuo generado diariamente, con lo cual, siendo el poder calorífico 70 % del de la leña, se alcanza sustituir aproximadamente el 7 % de la energía total consumida.

En cuanto a la factibilidad económica se asume como línea de base una caldera nueva sin la adaptación y se evalúan la inversión, los ahorros (ingresos) y costos incrementales atribuibles directamente a la adecuación.

En los escenarios de replicabilidad, sin contar con el apoyo de Biovalor (i) si se considera sólo el ahorro por sustitución de leña, el proyecto es atractivo (TIR 18 %, 5.3 años de tiempo de retorno de la inversión); mientras que si se asume un costo evitado de gestión del residuo, el proyecto aumenta considerablemente su rentabilidad (TIR 40 %, 2.8 años de retorno de la inversión, si se considera una planta de compostaje comercial como alternativa sustituida). Contabilizando las dos fuentes ahorro como un ingreso y basado en los supuestos detallados, por cada tonelada de residuo generado (a humedad final de 50%) se generan 48 USD de ahorros por sustitución de leña y 46 USD de ahorros por sustitución de alternativa de gestión.

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que la tecnología de uso de residuos como alternativos es una opción muy interesante, con un gran potencial de replicabilidad tanto dentro como fuera del sector frigorífico.

3. Introducción

La cadena cárnica es, sin duda, uno de los sectores productivos de mayor importancia en nuestro país, en lo que se refiere a aportes al Producto Interno Bruto, a volúmenes de exportaciones y puestos de trabajo ocupados.

La faena de bovinos está distribuida en prácticamente todo el territorio nacional en 37 establecimientos industriales habilitados. Luego de cinco años de crecimiento hasta el 2018, la faena de bovinos en 2019 alcanzó 2,23 millones de animales, lo que representa una disminución de 4,7 % respecto al año anterior, debido fundamentalmente a la extracción de machos jóvenes para exportación (INAC, 2019).

Las exportaciones de carne bovina en el ejercicio 2019-2020 alcanzaron los 1.584 millones USD, representando una caída del 12 % respecto al ejercicio anterior, aunque el precio implícito de la carne aumentó casi un 5 %. La producción nacional de carne se caracteriza por su calidad, lo que permite su acceso a mercados de elevada exigencia, siendo el mercado doméstico solo el 20 % de la producción total. El principal mercado de exportación es China, que absorbe el 55 % en peso de las exportaciones, seguido de los países del NAFTA y la Unión Europea (INAC, 2019; OPYPA, 2020).

En el 2020 se sucedieron diversas complicaciones en los flujos comerciales debido a la pandemia provocada por el Covid-19, lo que redujo el consumo de carne y alteró la formación de los precios. La recuperación del sector dependerá en gran medida del control que se alcance de la pandemia (OPYPA, 2020).

Por otro lado, en esta actividad industrial se deben contemplar los aspectos ambientales de sus procesos productivos para evitar una serie de externalidades negativas. Si bien este sector ha sido históricamente objeto del control ambiental, debiendo modernizarse para acompañar la normativa ambiental, las presiones nacionales e internacionales para el cumplimiento de estándares ambientales ha ido en aumento y las empresas se enfrentan a nuevas exigencias del mercado definidas por grandes cadenas de suministro y consumidores en general. Dentro de esta coyuntura, el sector continúa analizando alternativas para mejorar su sostenibilidad y adecuarse a requisitos respecto a los modelos de producción y su impacto ambiental.

A partir de distintas políticas públicas se han desarrollado acciones para facilitar la búsqueda e incorporación de tecnología, que permita reducir la carga contaminante de estos establecimientos y promueva la valorización de los residuos generados para obtener recursos beneficiosos para el propio establecimiento.

En este sentido, el Proyecto Biovalor, una iniciativa del Gobierno Uruguayo a través del Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM), el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) y el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP), ha impulsado diversas iniciativas para promover la valorización de residuos generados en sectores agroindustriales. En la búsqueda y desarrollo de alternativas de gestión y valorización de residuos, el Proyecto Biovalor realizó en el 2016 una convocatoria abierta a interesados a implementar un proyecto demostrativo en alguna de las alternativas tecnológicas promovidas con apoyo financiero no reembolsable (Proyecto Biovalor, s.f.).

En esta convocatoria fue seleccionada la propuesta de implementación de un proyecto de uso de residuos como combustibles alternativos en el establecimiento industrial Frigorífico Pando (Ontilcor S.A.). Este proyecto es de gran interés debido a la solución tecnológica propuesta para la gestión y aprovechamiento de los residuos. Además, se considera fundamental poder contar con una unidad demostrativa de esta tecnología en este tipo de establecimiento, por el nivel de innovación y el potencial de replicabilidad. Si bien han existido algunas experiencias similares, en ninguno de los casos conocidos se ha logrado una operación continua y estable.

Actualmente, el sistema se encuentra instalado y en operación, aprovechando todo el residuo generado para la producción de vapor necesario para los procesos productivos. Este proyecto representa un caso exitoso de uso de residuo como combustible alternativo en la industria frigorífica, confirmando a esta tecnología como una alternativa para la adecuada gestión y valorización de los residuos generados.

4. Objetivos del estudio

4.1 Objetivo general

El objetivo general del trabajo es la presentación del proyecto implementado en el Frigorífico Pando (Ontilcor S.A.), de uso de residuos de sólidos de aguas verdes como combustible alternativo.

Disponibilizar la información recopilada, su análisis y las lecciones aprendidas relacionadas al proyecto desarrollado, evaluando el potencial de replicación y promover la implementación de soluciones sostenibles en el contexto nacional.

4.2 Objetivos específicos

Realizar la recopilación y procesamiento de los datos de desempeño del sistema, y determinar los indicadores más adecuados para el seguimiento y control de los parámetros del sistema, que permitan identificar los aspectos de mayor significancia y sensibilidad.

Evaluar la eficiencia de valorización de los residuos y los beneficios ambientales asociados y analizar posibles medidas de mejora del desempeño.

Evaluar la factibilidad económica del proyecto, determinando indicadores de rentabilidad de la inversión para distintos escenarios, de forma de estimar bajo qué supuestos económicos es replicable esta tecnología.

5. Antecedentes y marco teórico

5.1 Generación de residuos en frigoríficos y sus características para la valorización

El sector frigorífico genera anualmente en el entorno a 20.000 ton de residuos, expresados en base seca, representando cerca del 5 % de los residuos generados a nivel país. La principal corriente de residuos asociado al sector son los sólidos de aguas verdes, dado los importantes

volúmenes producidos y a sus características, alcanzando una generación total de 15.500 ton/año (Proyecto Biovalor, 2016).

Estos corresponden a los sólidos separados en el tratamiento de las aguas verdes generadas en el lavado de los estómagos e intestinos de los animales faenados. Se componen del material semi-procesado (contenido ruminal) contenido en el estómago del animal en el momento de la faena. Este posee un alto contenido de material fibroso de origen lignocelulósico y alto contenido de nitrógeno amoniacal. Dependiendo del establecimiento, este efluente puede contener también el agua de lavado de los corrales y salas de espera del establecimiento. En estos casos se incorpora el estiércol, el cual puede también contener tierra y materiales inertes (arena, piedras, etc.).

De acuerdo a estudios realizados, la tasa de generación de este residuo es de 6,5 kg/UGM², expresadas en base seca (Proyecto Biovalor, 2016). Las características del residuo, especialmente el contenido de humedad, depende en gran medida de las prácticas de lavado de los corrales y el método de vaciado de los estómagos, así como de la eficiencia de los sistemas de separación y deshidratación de sólidos en la planta de tratamiento de efluentes. A continuación se detallan las principales características fisicoquímicas de la corriente de residuos sólidos de aguas verdes.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de la corriente de residuos sólidos de aguas verdes.

Fuente: Proyecto Biovalor, s.f.

Parámetro	Unidad	Valor
Materia Seca	% b.h.	25 - 40
pH		5 - 6,5
Densidad	ton/m ³	0,4 - 0,8
SV	% b.s.	85 - 97
N _{kjeldahl}	g/kg b.s.	14 - 26
P	g/kg b.s.	0,5 - 4,5
K	g/kg b.s.	0,4 - 1,4
Poder Calorífico Superior (PCS)	kJ/kg b.s.	12.500 - 25.500
Poder Calorífico Inferior (PCI)	kJ/kg b.s.	11.500 - 24.000
Cenizas	% b.s.	3,0 - 15
C	% b.s.	48
S	% b.s.	0,1
N	% b.s.	2,2
O	% b.s.	35
Potencial de Metanización	L _{CH4} /kg _{SV}	540

De acuerdo a estimaciones realizadas, el destino final de este residuo es el acopio en pilas en campo para luego ser distribuido en campo. Sin embargo, los frigoríficos no necesariamente se encuentran ubicados en zonas aledañas a campos productivos, por lo que no se experimenta un

² Unidad Ganadera Mayor (UGM): factor de equivalencia para expresar todas las cabezas de ganado en una misma unidad, teniendo en cuenta la relación del peso medio de cada categoría. Factores de equivalencia: bovinos: 1; ovinos: 0,15; suinos: 0,25; equinos: 0,9.

aprovechamiento real de los nutrientes y materia orgánica del material, o los costos de transporte se tornan excesivos para su traslado a otras zonas. Además, dado que de esta forma la estabilización alcanzada del residuo es limitada y el control de los lixiviados puede resultar complejo si el área no está adecuadamente acondicionada, los aspectos e impactos ambientales producidos por esta operación pueden ser importantes.

Una alternativa de gestión de los residuos de frigorífico consiste en la tecnología de compostaje, que puede ser realizado en la propia planta o enviado a una planta de compostaje comercial. Ya que la implementación de un proceso de compostaje requiere de diversos requisitos para asegurar el control de la operación y evitar impactos ambientales, en general, no representa una alternativa muy atractiva para las empresas. Por otro lado, el envío de los residuos a una planta de compostaje habilitada, requiere necesariamente que esta se encuentre a poca distancia para reducir costos de transporte, lo que solo se comprueba en unos pocos casos puntuales. Cabe aclarar que existen en nuestro país experiencias de ambas alternativas, que funcionan hace algunos años de manera adecuada.

5.2 Uso de residuos como combustibles alternativos y el potencial de aplicación para sólidos de aguas verdes (contenido ruminal)

El uso de residuos como combustibles alternativos implica la valorización energética mediante su combustión controladas para generar calor, ya sea agua caliente, vapor u otra forma de calor de proceso, que sustituya el uso de un combustible tradicional.

Esto implica de forma excluyente, que un residuo puede ser utilizado como combustible alternativo si el balance de energía producto de la quema es positivo, es decir permite la obtención de energía térmica útil. En caso contrario, que se requiera un aporte adicional de energía para completar la combustión de los residuos, se trataría de un proceso de incineración y debe ser considerado de forma particular. Esta consideración es de gran importancia para aquellos residuos con alto contenido de humedad, en los que el poder calorífico no sea suficiente para la evaporación de toda el agua.

Para evaluar el potencial de uso de residuos como combustible alternativo es necesario determinar su poder calorífico, es decir, la cantidad de energía contenida en el material que se desprende en la combustión, ya sea establecida como Poder Calorífico Superior (PCS) o Inferior (PCI). Este parámetro se expresa normalmente en base seca y es una característica intrínseca del residuo que depende básicamente de su composición.

Debido a que la humedad del residuo es un parámetro fundamental en los sistemas de combustión, una forma de determinar la eficiencia en la recuperación de energía en un sistema de combustión de residuos es mediante el Poder Calorífico Efectivo (PC_{ef}), ya sea del PCS como del PCI, a través de se descuenta la energía necesaria para evaporar el agua del residuo, ya sea del Poder Calorífico Superior o Inferior. Para ello se asume un valor de humedad de quema, que no necesariamente es la humedad en el punto de generación del residuo, ya que este puede ser sometido a un posterior tratamiento de deshidratación. La forma de cálculo del poder calorífico efectivo es:

$$PCI_{ef} = PCI \cdot \left(1 - \frac{H}{100}\right) - \frac{H}{100} \cdot \Delta H_{vap,H2O}$$

PCI_{ef} : Poder calorífico inferior efectivo (kcal/kg b. h.)

PCI : Poder calorífico inferior (kcal/kg b. s.)

H : Humedad de quema (% b. h.)

$\Delta H_{vap,H_2O}$: Entalpía de vaporización de agua (540 kcal/kg)

Además de la pérdida de eficiencia de la combustión, altos contenidos de humedad pueden provocar dificultades en la quema por mayor compactación del material y generación de material particulado en los gases de combustión.

En cuanto las características de los sistemas de combustión posibles para la incorporación de residuos, estos pueden ser hogares para combustibles sólidos (leña), o combustibles gaseosos, a los que se puede acoplar un sistema de gasificación. En ambos casos, la adaptación del sistema debe contemplar las características del residuo y evitar una combustión incompleta.

Dada su naturaleza, el contenido ruminal presenta un alto contenido de carbono y poder calorífico comparable con el de la madera, lo que lo hace, al menos en principio, aceptable para su uso como combustible alternativo y aprovechamiento energético.

Sin embargo, el contenido de humedad de este material, que se encuentra condicionada por el sistema de generación, separación y gestión del residuo, puede inviabilizar el proceso de combustión.

6. Descripción del caso de estudio

Frigorífico Pando está situado en la ciudad de Pando, en el Departamento de Canelones, a 30 km de Montevideo. Es una empresa de capital y operación familiar, que manteniendo los valores y características propias de la tradición uruguaya en producción de carnes de calidad, permanece en constante actualización con las tecnologías disponibles aplicadas a la industrialización de carne vacuna. Recibe ganado vacuno en pie (principalmente de razas británicas – Hereford – Aberdeen Angus) y realiza los procesos de faena y desosado, produciendo medias reses, cortes, enfriados y/o congelados, y menudencias³. En el 2019, Frigorífico Pando alcanzó un total de 131.099 animales faenados, representando el 7 % de la faena a nivel nacional y ubicándose entre los 5 mayores productores del país (OPYP, 2020).

El proyecto desarrollado en Frigorífico Pando consistió en la instalación de un generador de vapor a leña como combustible principal, pero con la capacidad de incorporar contenido ruminal como combustible alternativo. Debido a ampliaciones realizadas en el frigorífico y a la incorporación de nuevos procesos productivos, se incrementaron los requerimientos de vapor de planta. Por esta razón, y porque los generadores de vapor existentes eran ya muy antiguos y de baja eficiencia, además de ser a leña y fuel oil, lo que aumentaba considerablemente los costos operativos asociados, se decidió la instalación de un nuevo generador de vapor, de mayor capacidad y que utilice leña como combustible principal.

³<http://www.fmp.com.uy/index.html>

En resumen, las principales razones para realizar la inversión corresponden a:

- En abril 2019 se inauguraron nuevos procesos productivos y los requerimientos de vapor excedían la capacidad de las calderas existentes.
- Una de las dos calderas existentes operaba a fuel oil y se prefirió operar una caldera solamente a leña para ahorrar costos.

No obstante, con el objetivo de lograr el aprovechamiento energético de los sólidos de aguas verdes y mejorar la gestión actual de este residuo, se consideró una oportunidad el diseño y desarrollo de un sistema que permita incorporar este residuo como combustible alternativo. Este proyecto implica un gran desafío en el desarrollo de un sistema confiable y lo suficientemente robusto que pueda operar de forma estable sin comprometer la alimentación de vapor a la planta de producción y que pueda absorber todo el residuo generado diariamente.

Como ya fue mencionado, el contenido ruminal se genera durante las operaciones de faena de bovinos en el frigorífico, el cual es arrastrado con agua hacia la planta de tratamiento de efluentes, donde se separa de la corriente de efluentes mediante una prensa extrusora. Con el objetivo de reducir aún más el contenido de humedad del residuo, fue instalada una nueva prensa extrusora en serie con las existentes, con lo cual el contenido de humedad alcanzado se encuentra en el entorno del 50 %.

El generador de vapor instalado cuenta capacidad de producción de 15 ton/h de vapor saturado a 10 bar, y fue adquirido a la empresa Turboflow Uruguay S.A., encargada también de su montaje, instalación y puesta en marcha.

Uno de los aspectos más importantes del proyecto corresponde a la forma en que se realiza la alimentación del sólido de aguas verdes al hogar del generador de vapor, sin necesidad de que el material sea sometido a un proceso de secado o densificación previa.

Es así que, por un lado, los rolos de leña son alimentados manualmente mediante un cargador de doble compuerta de accionamiento neumático; mientras que el sólido separado en las prensas extrusoras es recolectado en una volqueta, para ser luego transportado a una tolva con una capacidad de 3,5 m³ desde donde se toma mediante un tornillo para ser alimentado a la caldera. La alimentación se da de forma independiente a la leña, en una zona alta del hogar, dispersándolo mediante un flujo de aire secundario en el propio punto de descarga. A su vez, el tornillo alimentador cuenta con un variador de frecuencia, que permite regular el caudal de alimentación según la demanda.

El control del contenido de humedad del material se realiza mediante una balanza termogravimétrica, adquirida en el marco del proyecto. Este control fue realizado principalmente durante las pruebas de puesta en marcha, ya que con la experiencia adquirida, este parámetro continúa siendo monitoreado frecuentemente para realizar el seguimiento, aunque no necesariamente a cada lote de residuo.

En cuanto a sus características, se trata de un generador de vapor de cámara de combustión acuotubular con paredes de membrana tubular, de grilla inclinada y banco evaporativo humotubular, de 3 pasos con hogar cilíndrico complementario. La recuperación de calor se

realiza mediante un calentador de aire de combustión, a través de los gases de combustión antes de ser descargados por la chimenea.

El ventilador de aire primario de tiro forzado cuenta con un variador de frecuencia para regular la entrada de aire según demanda, de forma de optimizar el desempeño del sistema. Además, la caldera cuenta con un ventilador de aire secundario y un ventilador de tiro inducido de los gases de combustión.

Previo a su descarga a la atmósfera, los gases de combustión pasan por un depurador del tipo multiciclón para retener partículas. Este se compone de una batería de ciclones en serie y paralelo, en los cuales la entrada de gases es axial y salida vertical por el centro, comunicando todas las salidas en una cámara colectora superior.

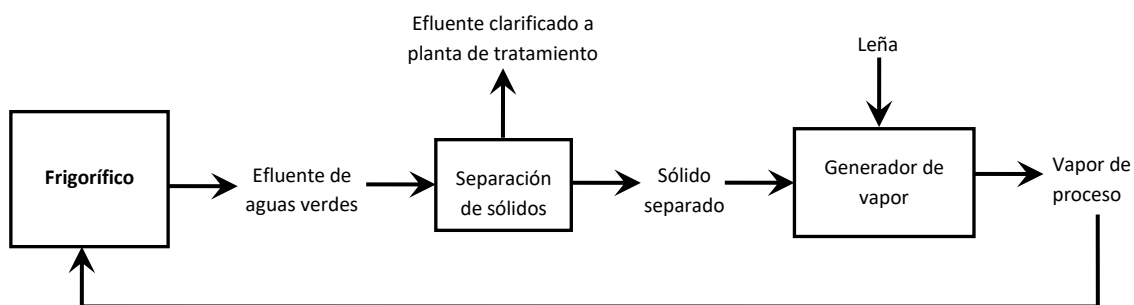
Las cenizas del hogar y las partículas retenidas del depurador de gases, son recolectadas en volquetas para luego ser retiradas.

La caldera cuenta con el sistema de control necesario para que una operación segura, incluyendo lazos de control con el nivel de agua de la caldera, presión de vapor, presión del hogar, etc. Además, se instaló un medidor de oxígeno en los gases de salida y con indicación en el tablero eléctrico de la caldera de cuándo realizar la carga de rolos. De esta manera se pretende optimizar el rendimiento del generador.

En octubre de 2017 culminó la instalación y puesta en marcha comenzado en agosto 2017, quedando el equipo pronto para comenzar su operación. En el correr del 2018 fueron realizadas diversas pruebas y ensayos respecto a la alimentación de contenido ruminal, de forma de ajustar la operativa del equipamiento y aprovechar el máximo potencial de aprovechamiento térmico de este residuo. A partir de junio de 2019 el sistema se encuentra en operación plena, incorporando todo el sólido de aguas verdes generado.

La inversión total alcanzó los 939.000 USD, de los cuales 75.000 USD fueron financiados por el Proyecto Biovalor.

Figura 1. Diagrama de flujos del sistema



Fuente: Proyecto Biovalor.

7. Resultados

7.1 Plan de monitoreo

El objetivo del plan de monitoreo es establecer una forma de cuantificar los aspectos asociados y evaluar el desempeño del sistema, de manera de evaluar el impacto de la implementación del proyecto desde el punto de vista ambiental.

Los objetivos del monitoreo se enfocan en conocer los impactos asociados a:

- Reducción del residuo dispuesto en el campo
- Sustitución de leña por sólidos aguas verdes en la generación de vapor
- Aspectos ambientales (emisiones, cenizas, etc.)

A continuación, se describen los aspectos a ser monitoreados, las formas de medición, los indicadores utilizados y la forma de registro necesaria para su sistematización.

Tabla 2. Parámetros a monitorear para el seguimiento del proyecto.

Parámetro monitoreado	Forma de medición y registro	Frecuencia de medición y registro
Nivel de faena	<ul style="list-style-type: none"> ○ Nº de animales faenados 	Diario / Semanal
Generación de vapor	<ul style="list-style-type: none"> ○ Vapor generado 	Se realizará registro durante una semana para cruzar datos con desempeño
Sólidos aguas verdes generados	<ul style="list-style-type: none"> ○ Volumen de volquetas que transportan los sólidos aguas verdes generado ○ Estimación en base a animales faenados (6,2 kg/UGM b.s.⁴) 	Semanal
Sólidos aguas verdes quemado	<ul style="list-style-type: none"> ○ Volumen de volquetas que transportan los sólidos aguas verdes hacia tolva de acopio en caldera ○ Estimación en base al volumen de la tolva de acopio en caldera 	Semanal
Leña quemada	<ul style="list-style-type: none"> ○ Peso (o volumen) de leña quemada 	Semanal
Humedad de quema de sólidos aguas verdes	<ul style="list-style-type: none"> ○ Balanza analizadora de humedad ○ Métodos gravimétricos de laboratorio 	Semanal

⁴ Valor medio de generación de residuos sólidos del tratamiento de efluentes de aguas verdes en el sector frigoríficos, de acuerdo al procesamiento de datos realizados por BIOVALOR. Fuente: Ficha de residuos – Frigoríficos. <http://biovalor.gub.uy/>

Poder calorífico inferior efectivo de los sólidos aguas verdes	<ul style="list-style-type: none"> ○ 4.270 kcal/kg b.s.⁵ corregido por humedad de quema según: ● $PCI_{ef} = PCI \cdot \left(1 - \frac{H}{100}\right) - \frac{H}{100} \cdot \Delta H_{vap,H_2O}$ ● PCI_{ef}: Poder calorífico inferior efectivo (kcal/kg b.h.) ● PCI: Poder calorífico inferior (kcal/kg b.s.) ● H: Humedad de quema (% b.h.) ● $\Delta H_{vap,H_2O}$: Entalpía de vaporización de agua (540 kcal/kg) 	Semanal (junto a la determinación de humedad)
Emisión de gases en chimenea (CO, SO ₂ , NO _x)	<ul style="list-style-type: none"> ○ EPA Methods 6, 7 y 10b 	Bianual
Emisión de material particulado en chimenea	<ul style="list-style-type: none"> ○ EPA Method 17 (extracción isocinética desde chimenea, colecta en filtro y determinación gravimétrica) y otros métodos aplicables (EPA Methods 1, 2, 3 y 5) 	Bianual
Cenizas generadas	<ul style="list-style-type: none"> ○ Peso (o volumen) de volquetas que transportan las cenizas generadas en el hogar y en el multiciclón 	Semanal
Punto de fusión de las cenizas	<ul style="list-style-type: none"> ○ Análisis de laboratorio externo 	Una vez con quema de sólidos aguas verdes a capacidad máxima

Por otro lado, de forma de estimar el impacto de la implementación del proyecto, es necesario determinar las condiciones de quema sin el aporte de sólidos aguas verdes al sistema (línea de base). Es decir, es necesario contar con mediciones y registros previos al proyecto para que puedan ser comparados con la situación en plena operación. Los parámetros que deben ser incluidos en esta línea de base son: emisión de gases en chimenea, emisión de material particulado en chimenea y cenizas generadas. Además, se debe mantener el registro de la leña quemada durante el período de línea de base, con el fin de estimar el ahorro de leña en base a la cantidad de vapor generado.

Tabla 3. Indicadores de seguimiento del proyecto.

Indicador	Fórmula de cálculo	Unidad
Nivel de quema de residuo	$100 \times \frac{\text{cantidad de rumen quemado}}{\text{cantidad de generado}}$	%

⁵ Promedio de los resultados obtenidos de los análisis realizados de PCI sobre 3 muestras de residuo del Frig. Pando extraídas por BIOVALOR y analizadas en el PCTP. En caso de contar con nuevos valores de PCI, este puede ser sustituido.

Nivel de energía aportada por el residuo	$100 \times \frac{\text{cantidad de rumen quemado} \cdot PCI_{ef,rumen}}{\text{cantidad de rumen quemado} \cdot PCI_{ef,rumen} + \text{cantidad de leña quemada} \cdot PCI_{ef,leña}}$	%
--	--	---

7.2 Evaluación técnica

En la presente sección se presentan los resultados obtenidos en la evaluación técnica del proyecto desarrollado.

Lamentablemente no fue posible determinar los indicadores de seguimiento del sistema sin la incorporación de residuo (línea de base), ya que al momento de comenzar la operación, ya se encontraba en funcionamiento la nueva planta de procesamiento del frigorífico, y los parámetros de desempeño difieren de la situación previa. Para evaluar los parámetros del escenario de línea de base, se debería interrumpir la alimentación de sólidos de aguas verdes por al menos un mes para monitorear los parámetros en esta condición, lo cual por una cuestión operativa de la planta no ha sido posible realizarlo. De esta manera, algunos de los indicadores de seguimiento no serán verificados.

En la tabla a continuación se muestran los valores promedio de los principales parámetros productivos y de desempeño necesarios para la evaluación técnica del desempeño del sistema. Los valores presentados corresponden al período Jun-19 – May-20 (1 año), coincidiendo con el comienzo de la operación plena del sistema.

Tabla 4. Parámetros de operación del sistema.

Animales faenados:	160.554 animales/año
	539 animales/día (promedio 298 días/año)
Generación de vapor:	10,2 ton/h a 9 bar, 16 h/día de generación
Tasa de generación de sólidos aguas verdes:	6 kg/animal
Humedad promedio:	50 %
Generación de sólidos aguas verdes:	1.617 kg _{ST} /día
	481 ton _{ST} /año (promedio 298 días/año)
Consumo de leña:	8.991 ton/año (56 kg/animal)

De acuerdo a los análisis realizados, el Poder Calorífico Inferior (PCI) del contenido ruminal se encuentra en el entorno de los 4.270 kcal/kg_{ST} expresado en base seca. Corregido para una humedad de quema del 50 %, el PCI efectivo es de aproximadamente 1.865 kcal/kg_{ST}. Asumiendo un PCI efectivo de la leña de 2.700 kcal/kg, se puede considerar que cada kg_{ST} de sólidos aguas verdes equivale energéticamente aproximadamente a 0,7 kg de leña.

De esta manera, se puede decir que el uso de la totalidad de los sólidos de aguas verdes producidos sustituye el uso de 337 ton/año de leña, representando solo el 7 % de la energía

total consumida. Si bien este valor puede parecer muy bajo, desde el punto de vista operativo, este hecho asegura que estabilidad de generación de vapor no dependa del aporte energético del residuo, lo que es muy importante para el correcto funcionamiento, confiabilidad y robustez del sistema.

Por otro lado, se determinaron la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) alcanzadas por la implementación del proyecto, respecto a la situación previa o línea de base. Este indicador, puede ser visto como una medida de la mejora en la gestión de los residuos, y como un indicador que puede ser utilizado en una eventual diferenciación del producto. Para su determinación se utilizan las directrices del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, que establece una metodología consensuada internacionalmente para estos cálculos (IPCC, 2006)

La reducción de emisiones de GEI se da principalmente por el cambio en el destino final del residuo, el cual en el escenario de línea de base era acopiado en pilas para ser luego distribuido en terreno, operación a través de la cual se liberan importantes cantidades de metano (CH_4) debido a la degradación en condiciones anaerobias; mientras que las emisiones producidas en su uso como combustible se pueden considerar neutras. Si bien también existe una reducción de emisiones asociadas a la sustitución de leña, básicamente en lo que se refiere a la cosecha y transporte, al ser el valor de sustitución tan bajo, estas emisiones no serán tenidas en cuenta.

Asumiendo la cantidad y características del residuo generado, y que la disposición en pilas presenta un valor de conversión de metano de 4 %, las emisiones evitadas por el proyecto alcanzan las 6.961 $\text{kg}_{\text{CH}_4}/\text{año}$. Si se asume un valor para el Potencial de Calentamiento Global para un horizonte de 100 años de 21 para el CH_4 , de acuerdo al segundo reporte técnico de evaluación del IPCC (Second Assessment Report of the IPCC, SAR), las emisiones evitadas son 146 $\text{ton}_{\text{CO}_2\text{eq}}/\text{año}$.

7.3 Evaluación económica

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de la viabilidad económica. Para ello, se construyeron dos escenarios y los flujos de caja incrementales correspondientes, a partir de los cuales se calcularon tres indicadores que permiten evaluar la rentabilidad de la inversión: el período de retorno simple, el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR).

El objetivo de la evaluación económica es determinar el atractivo de una inversión en la adecuación de una caldera nueva que permita la incorporación de sólidos de aguas verdes (contenido ruminal). En consecuencia, se asume como línea de base una caldera nueva sin la adaptación y se evalúan la inversión, los ahorros (ingresos) y costos incrementales atribuibles directamente a la adecuación.

El escenario I “Ontilcor” es conservador y refleja la experiencia del proyecto desarrollado. Para ello, se toma en cuenta dos años de implementación y puesta en marcha de la inversión sin ingresos y no contabiliza ahorros por la disposición final del contenido ruminal. Incluye el apoyo no reembolsable obtenido por el proyecto Biovalor.

El escenario II “de replicabilidad” se basa en la experiencia de Ontilcor pero asume que se está replicando la experiencia en otro frigorífico. De esta manera, se estima un año de implementación y puesta en marcha aprovechando las lecciones ya aprendidas y modela el atractivo económico con (Escenario IIA) y sin (Escenario IIB) los ahorros generados por la disposición final del contenido ruminal.

Cabe aclarar que no fueron tenidos en cuenta sistemas de adaptación de un sistema existente para poder incorporar la quema del contenido ruminal, ya que de acuerdo a las experiencias esto presenta diversos problemas de implementación. Por lo tanto, se evalúa el atractivo de la inversión total, es decir, la caldera nueva con la adaptación frente a la caldera nueva sin la adaptación.

La tabla a continuación lista los componentes de la inversión total sin IVA, en USD al momento de la compra:

Tabla 5 Inversiones realizadas en el desarrollo del proyecto

Supuestos inversión	Monto	
Caldera de vapor de 15 T/h	697.100	USD
*Medición de oxígeno en gases de caldera	4.700	USD
*Caudalímetro de vapor	6.100	USD
Purga continua de caldera automática	6.900	USD
Purga de fondo de caldera automática	5.700	USD
*Depurador de gases	45.500	USD
*Sistema de alimentación del residuo	24.000	USD
Balanza humedad	2.000	USD
Obra civil relativa a la caldera: Adecuación de galpón, alimentación eléctrica, cañerías de conexiónado, montaje del caudalímetro de vapor, hervido y pasivado de la caldera	82.800	USD
Obra civil	20.700	USD
Separador de sólidos:Prensa extrusora	79.500	USD
Total maquinaria	812.700	USD
Total inversión	975.000	USD
Total adaptación caldera	126.200	USD
Aporte Biovalor	75.000	USD

En consecuencia, la inversión incremental resultante por la adaptación de la caldera para la quema de contenido ruminal es de 126.200 USD, un 13% de la inversión total. Esta está compuesta por un sistema de alimentación del residuo que incluye:

- Una tolva de recibo, capacidad 3.5 m³
- Un transportador de tornillo entre tolva de recibo y caldera, longitud de 8 m
- Un sistema de entrada a la cámara de combustión
- Accesorios de comando eléctrico, integrados al tablero eléctrico de caldera

A su vez, se precisó adquirir una prensa adicional a las ya existentes, para operarla en serie y llegar a la humedad del sólido necesaria para una mejor combustión. Se incluye dentro de las

inversiones una balanza termogravimétrica para la determinación de la humedad, fundamental para el monitoreo del sistema, y los gastos de obra civil que comprenden el techado y el piso del galpón que aloja el sistema de alimentación del residuo.

A efectos de un modelo simplificado y conservador, en el escenario I “Ontilcor”, el flujo de caja asume que los ingresos se empiezan a generar después de dos años de haber realizado la inversión. En el escenario II se asume suficiente un año de puesta en marcha y realización de pruebas de operación.

La implementación del proyecto genera dos fuentes de ahorros:

- Ahorros en leña
- Ahorros en la disposición final del residuo

En el caso de Ontilcor, el uso del residuo como combustible alternativo sustituyó el uso de 7% de la leña total consumida, resultando en un ahorro de 46.221 USD/año en los dos escenarios, asumiendo un costo de leña de 2.600 UYU/ton.

Previo al proyecto, Ontilcor disponía el residuo en un terreno ubicado a 500 m de la planta a través de 2 o 3 viajes diarios. Sin embargo, no se pudo contabilizar el ahorro resultante de evitar esta operación. La empresa estima que el costo de mano de obra del tractorista encargado de disponer el material y el gasoil usado para el transporte se compensan ampliamente por la persona no calificada que actualmente tiene entre sus tareas el control de la tolva y la supervisión de la alimentación del residuo de la caldera. A su vez, desde la empresa declaran que, de no haber realizado esta inversión, los controles y exigencias cada vez mayores de las autoridades ambientales, hubieran requerido un manejo mucho más costoso del residuo aun disponiéndolo en el predio, como el armado de pilas, monitoreo y captación de lixiviado.

Por su parte, en un escenario de replicabilidad, el costo de disposición de un frigorífico estará compuesto por el costo del transporte hasta el lugar de disposición y, si no se cuenta con un lugar para disponerlo como mejorador de suelo, se le suma el costo de disposición en una planta de compostaje.

Es por ello que en el escenario IIA de replicabilidad, para evaluar la viabilidad de la inversión también en el caso de otro frigorífico que no tenga la opción de disposición en terreno, se considera el valor mínimo de la tasa de 1 UR/m³⁶ de gestión del residuo de la planta de compostaje comercial. Se estima que solamente pagando esa tasa, sin incluir los costos del transporte (a cuenta del generador), se llega a generar un ahorro de 44.588 USD/año, evitando la disposición de 963 toneladas anuales de residuo. En consecuencia, por cada tonelada de residuo generado (a humedad final de disposición en caldera de 50%) se generan 48 USD de ahorros por sustitución de leña y 46 USD de ahorros de disposición final evitado.

⁶ UR: unidad reajutable

No se consideran los ingresos adicionales que fueron adjudicados a este proyecto también, como lo fueron la obtención del premio de eficiencia energética y el certificado de eficiencia energética y la obtención de exoneraciones de impuestos a través de la COMAP.⁷

La tabla a continuación resume los supuestos y datos empleados para calcular los ahorros. Se usó el valor promedio de la Unidad Reajutable (UR) del período evaluado, de junio 2019 a mayo 2020, según datos de la Dirección General Impositiva (DGI).

Tabla 6. Datos y supuestos para estimar ahorros.

Producción:	160.554	animales faenados/año
Días de generación al año:	298	Días
Contenido ruminal por animal faenado:	6	kg/animal
Contenido ruminal generado:	963	ton/año
Equivalencia energética:	1,43	kg_residuo/kg_leña
Leña consumida por animal faenando:	56,0	kg/animal
Consumo actual de leña:	8.991	ton/año
Generación actual de residuo:	80	ton/mes
Precio leña:	2.600	UYU/ton
Tipo de cambio 06/19-05/20	37,43	UYU/USD
Ahorro de leña	44.221	USD/año
Costo de disposición final de residuo (Escenario II)	1	UR/m3
Valor UR	1.213	UR/UYU
Densidad	0,70	ton/m3
Residuo a disponer:	1.376	m3/año a 50% de humedad
Costo de disposición final de residuo (Escenario II)	44.588	USD/año

En cuanto a los costos operativos asociados a la quema de sólidos de aguas verdes, como personal, energía eléctrica de equipos auxiliares, etc., se siguen manteniendo los mismos que si la caldera no fuera alimentada con residuos. Es decir, no presenta costos operativos incrementales.

Se le agrega un costo adicional de energía eléctrica correspondiente a la operación de la prensa nueva y el tornillo de alimentación. Considerando que ambas se operan durante la mañana, se estima el costo en base a la tarifa de mediano consumidor 1, tarifa llano de 4,077 UYU/Kwh y el mismo tipo de cambio detallado anteriormente de 37,43 UYU/USD correspondiente al promedio

⁷ En Uruguay existe un régimen de inversiones para promover el desarrollo productivo compuesto por una Comisión de Aplicación de la Ley de Inversiones (COMAP), que funciona en la órbita del Ministerio de Economía y Finanzas, cuyo objetivo es la promoción de inversiones, generando beneficios fiscales, entre otros, para proyectos que utilicen tecnologías limpias. Más información aquí: <https://www.mef.gub.uy/13240/7/areas/un-regimen-de-inversiones-para-promover-el-desarrollo-productivo.html>

del período evaluado. El costo eléctrico incremental es de 13.766 USD/año, la tabla a continuación detalla la potencia y horas de uso de la maquinaria:

Tabla 7. Potencia y horas de uso de la maquinaria incremental.

Ítem	Prensa	Tornillo de alimentación	Unidad
Potencia:	56	4	KW
Horas de uso diarias:	7	8	hs/día
Costo consumo eléctrico:	475.441	39.833	UYU/año
	12.702	1.064	USD/año

Como se mencionó, no se contabiliza un aumento de costos de mano de obra para la alimentación del sistema porque la empresa declara que los costos incrementales están ampliamente compensados por los ahorros por la disposición en terreno.

En los flujos de caja se asume que la inflación en USD es 0% y se considera que el saldo antes y después de impuestos es igual. No contempla el pago por IRAE de la inversión porque la fracción de IRAE que pudiera pagar la empresa por esta inversión es compensada ampliamente por la exoneración al IRAE otorgado por la COMAP.

La empresa asegura haber presentado a la COMAP la fracción no subsidiada de la inversión total del proyecto, junto a otras inversiones. En un escenario conservador, se asume que la inversión del proyecto es presentada a la COMAP y puntúa por tecnologías limpias y por descentralización dado que la planta se ubica en Canelones. En base al simulador del Decreto 268/020, sin tomar en cuenta otros indicadores sectoriales, se llega a una exoneración mínima del 45.98% de la inversión total, llegando a 448.306 USD de IRAE exonerado, un monto que excede ampliamente la inversión incremental de adaptación de la caldera para la quema de sólidos de aguas verdes, en comparación con una caldera sólo para leña.

A su vez, los flujos de caja omiten la depreciación de activos, considerado que esta se incluye en el cálculo final de rentabilidad de la empresa. Dado que la empresa financió la inversión con capitales propios, no se incluyen costos financieros.

.

Tabla 8. Flujo de caja Escenario I “Ontilcor”.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversión	126.200										
Ahorro por disposición de residuos (costo evitado)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ahorro por sustitución de leña (costo evitado)		0	0	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221
Total ingresos adicionales (+)		0	0	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221
Costo energía eléctrica y auxiliares		13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766
Costo personal adicional		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mantenimiento adicional		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Seguros adicionales		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gastos Administración adicional		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Imprevistos		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total costos Producción adicionales (-)		13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766
Amortización		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Intereses		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Saldo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Costos Financieros (-)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aporte Biovalor	75.000										
Saldo antes de impuestos (=)	-51.200	-13.766	-13.766	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455
Saldo después de impuestos (=)	-51.200	-13.766	-13.766	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455
Flujo de caja acumulado Ontilcor c/apoyo Biovalor	-51.200	-64.966	-78.733	-46.278	-13.823	18.632	51.087	83.541	115.996	148.451	180.906
Saldo después de impuestos s/apoyo Biovalor	-126.200	-13.766	-13.766	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455
Flujo de caja acumulado s/apoyo Biovalor	-126.200	-139.966	-153.733	-121.278	-88.823	-56.368	-23.913	8.541	40.996	73.451	105.906

*Unidad USD

Tabla 9. Flujo de caja Escenario II "replicabilidad" con ahorro por disposición.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversión	126.200										
Ahorro por disposición de residuos		0	44.588	44.588	44.588	44.588	44.588	44.588	44.588	44.588	44.588
Ahorro por sustitución de leña		0	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221
Total ingresos adicionales (+)		0	90.471	90.471	90.471	90.471	90.471	90.471	90.471	90.471	90.471
Costo energía eléctrica y auxiliares		13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766
Costo personal adicional		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mantenimiento adicional		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Seguros adicionales		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gastos Administración adicional		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Imprevistos		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total costos Producción adicionales (-)		13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766
Amortización		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Intereses		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Saldo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Costos Financieros (-)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Saldo antes de impuestos (=)	-126.200	-13.766	76.705	76.705	76.705	76.705	76.705	76.705	76.705	76.705	76.705
Saldo después de impuestos (=)	-126.200	-13.766	76.705	76.705	76.705	76.705	76.705	76.705	76.705	76.705	76.705
Flujo de caja acumulado (proyecto)	-126.200	-139.966	-63.261	13.443	90.148	166.853	243.558	320.263	396.968	473.673	550.378

*Unidad USD

Tabla 10. Flujo de caja Escenario II "replicabilidad" sin ahorro por disposición.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversión	126.200										
Ahorro por disposición de residuos (costo evitado)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ahorro por sustitución de leña (costo evitado)		0	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221
Total ingresos adicionales (+)		0	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221	46.221
Costo energía eléctrica y auxiliares		13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766
Costo personal adicional		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mantenimiento adicional		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Seguros adicionales		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gastos Administración adicional		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Imprevistos		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total costos Producción adicionales (-)		13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766	13.766
Amortización		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Intereses		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Saldo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Costos Financieros (-)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Saldo antes de impuestos (=)	-	126.200	-13.766	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455
Saldo después de impuestos (=)	-	126.200	-13.766	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455	32.455
Flujo de caja acumulado (proyecto)	-	-	-107.512	-75.057	-42.602	-10.147	22.308	54.763	87.217	119.672	152.127

*Unidad USD

Las características de cada escenario y los indicadores de rentabilidad se detallan a continuación:

Tabla 11. Resumen de resultados de la evaluación económica.

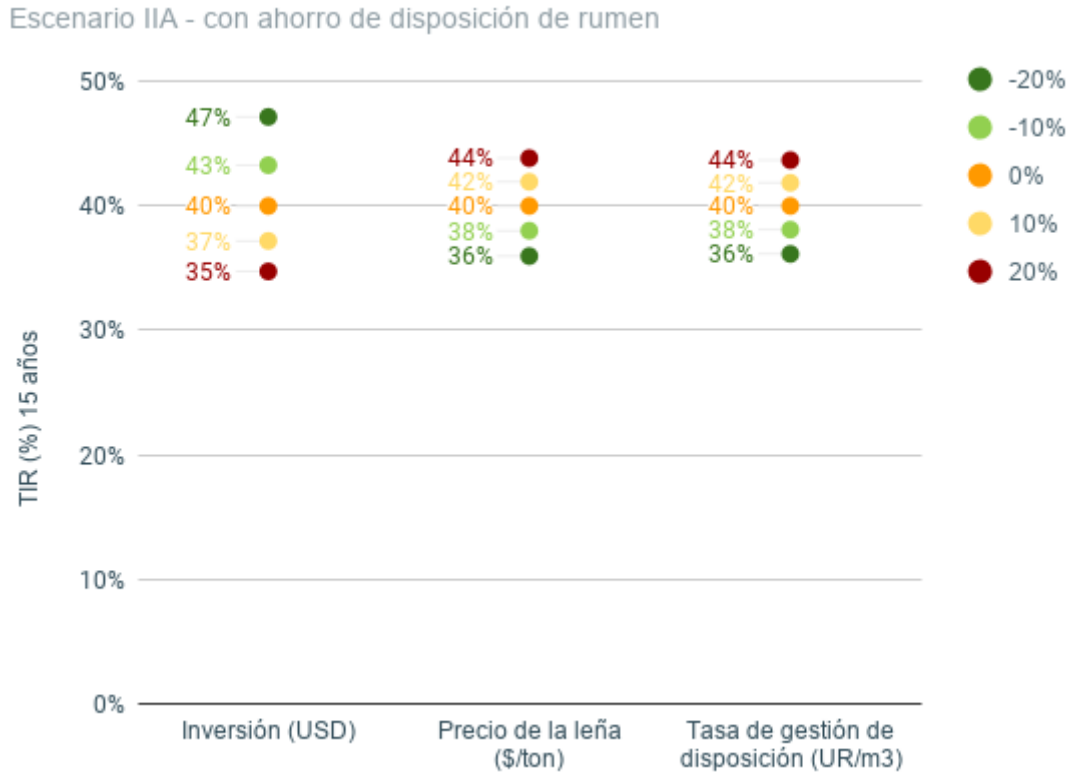
Ítem	Escenario I "Ontilcor"	Escenario IIA "Replicabilidad"	Escenario IIB "Replicabilidad"	Unidad
Implementación y puesta en marcha	2	1	1	Años
¿Incluye subsidio de Biovalor?	si	no	no	
¿Se contabiliza un ahorro por disposición final?	no	si	no	
Período de recuperación simple de la inversión	4,4	2,8	5,3	Años
TIR- tasa interna de retorno (15 años)	24%	40%	18%	
VAN - valor actual neto (15 años)	152.290	466.724	117.286	USD

Para el cálculo del TIR y VAN se toma en cuenta un costo de oportunidad de capital de 7.5%, que sugiere el Sistema Nacional de Inversión Pública de la Oficina de Planeamiento y Presupuesto (OPP), como la tasa de descuento social.

La tasa de rentabilidad promedio anual (TIR) que este proyecto pagaría a inversionistas por invertir sus fondos allí, es de un valor mayor al costo oportunidad de capital de 7.5% y el valor actual neto (VAN) es positivo en los tres casos evaluados. Teniendo en cuenta el ahorro por disposición final del residuo en la ecuación económica (escenario IIA), el atractivo de la inversión es significativamente mayor.

Tomando como base los datos y supuestos del escenario II de "replicabilidad" con y sin ahorro por disposición final, se analiza el impacto en la TIR que tienen variaciones en (i) el monto de inversión, (ii) el precio de la leña y (iii) los costos de disposición del residuo, éstos últimos solo en el escenario donde aplican. En el modelo, los factores se varían de a uno, considerando que no afecta el resto de los factores (*ceteris paribus*).

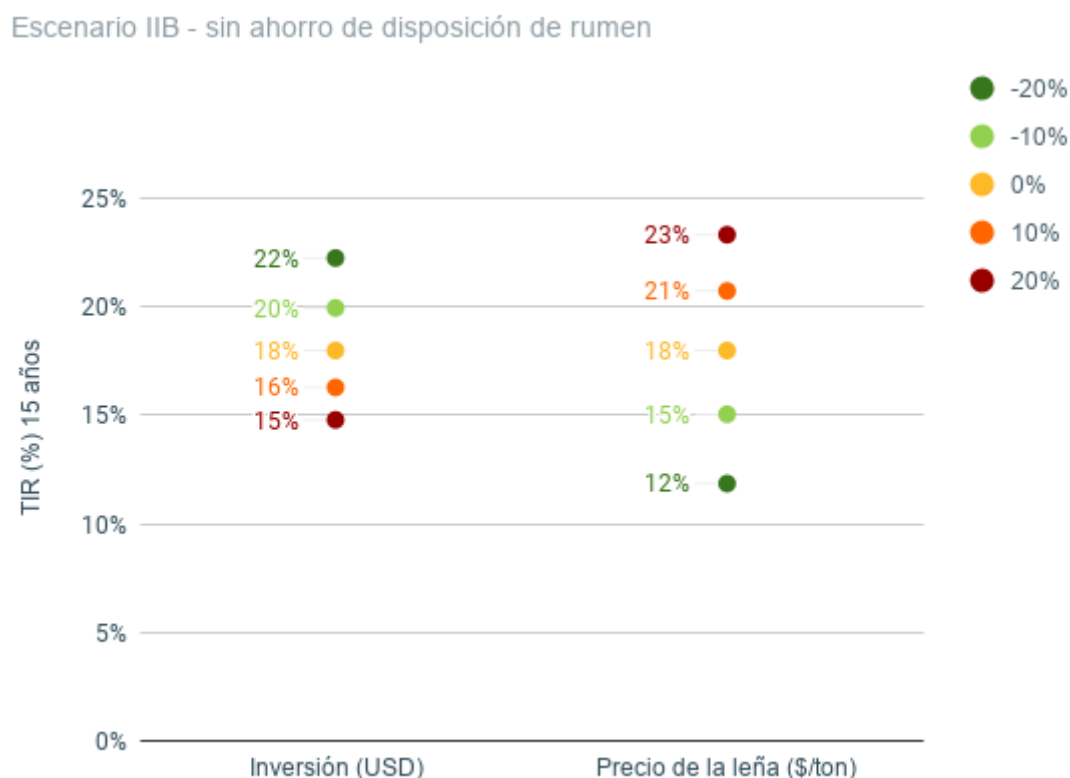
Gráfico 1. Evaluación de sensibilidad del TIR - Escenario IIA, con ahorro de disposición de residuo.



Fuente: elaboración propia

Se constata en el gráfico que, si se consideran las dos fuentes de ingresos, la TIR es poco sensible a la variación de los tres factores. El factor más sensible es la inversión. Si la inversión fuera de 151.440 USD, es decir un 20% mayor, el proyecto seguiría siendo rentable a una TIR de 35%. La inversión es menos atractiva si baja el precio de la disposición final o el precio de la leña. Dado que en el modelo el ingreso por ahorro de disposición del residuo se asemeja al ahorro por sustitución de leña, la sensibilidad de los dos factores es similar.

Gráfico 2. Evaluación de sensibilidad del TIR- Escenario IIB, sin ahorro de disposición de residuo.



Fuente: elaboración propia

En un escenario donde no se consideran los ahorros en la disposición del residuo (escenario IIB), el factor más sensible de los dos analizados es el precio de la leña. La sensibilidad no es significativa: una disminución del 20% en el precio de la leña o un aumento del 20% de la inversión seguirían arrojando una TIR mayor a 7.5%.

Desde el punto de vista del inversor, cabe destacar que el análisis económico debería contemplar la viabilidad de la inversión total de la caldera nueva. Como se mencionó, el desarrollo exitoso de un proyecto de incorporación de un residuo como combustible alternativo, es más sencillo si el sistema se concibe desde el propio diseño, y no como una adaptación en un sistema existente.

Según declarado por la empresa, el recambio significó un ahorro de 495.500 litros de fuel oil anuales, equivalente a 326.443USD⁸, mientras que el consumo de leña no aumentó significativamente, hasta que se instalaron los nuevos procesos productivos en abril 2019.

Si se compara el período anterior al proyecto con la fase de puesta en marcha de caldera nueva, sin los nuevos procesos productivos en marcha, el consumo de leña aumentó relativamente

⁸Período de referencia agosto 2016 a julio 2017, previo al proyecto, tomando una tasa de cambio promedio del período de 28,02 UYU/USD y un precio por litro de 0,66 USD.

poco, en promedio en un 7,25%. Después de la puesta en marcha de los nuevos procesos productivos (y la adaptación para la incorporación de residuos como combustibles alternativos) el consumo de leña aumentó significativamente, en un 40%.

La tabla siguiente detalla los consumos de combustibles en los diferentes períodos de referencia.

Tabla 12. Consumo de combustibles en Ontilcor.

Período	Consumo de leña (ton/mes)	Consumo de fuel-oil (L/mes)
Período previo al proyecto, con las calderas antiguas (fuel oil y leña) (08/2016 –07/2017)	465	41.292
Fase de puesta en marcha de caldera nueva, sin nuevos procesos productivos (08/2017 - 03/2019)	499	0
Sistema de valorización de residuos y nuevos procesos productivos en marcha (06/2019 –05/2020)	697	0

Las calderas previas fueron instaladas en el 2005 y 2007 y no estaban llegando aún al final de su vida útil. No obstante en un escenario de replicabilidad, los frigoríficos podrían evaluar la opción de invertir en la adaptación de la caldera y en una prensa extrusora adicional para los sólidos de aguas verdes en el caso de tener calderas al final de su vida útil. Se toman los 25 años del final de vida útil como referencia, en base al reglamento de URSEA que requiere un estudio de integridad cuando la caldera llega a esa antigüedad.

Según datos públicos de la URSEA, en el sector Frigoríficos (Procesamiento y conservación de carne según giro industrial) a diciembre del 2020 había 110 generadores de vapor activos, de los cuales 55 tienen más de 25 años de antigüedad. De esos 55, 29 usan leña como combustible principal, y 16 usan fuel oil. Lógicamente, un frigorífico puede tener varias calderas y un análisis más afinado podría arrojar cuáles de las calderas se usan como equipos principales y cuáles como respaldo, así como cuáles podrían ser reemplazadas. En ese análisis multifactorial para evaluar el recambio de la caldera, el atractivo de la inversión de una adaptación para el uso de residuos como combustibles alternativos será un factor a considerar.

Los resultados del estudio arrojan que para frigoríficos que afrontan gastos por la gestión de la disposición del residuo, sin duda la inversión en la valorización de ese subproducto como combustible alternativo es muy atractiva.

8. Conclusiones

El proyecto presentado demuestra que el uso de residuos como combustibles alternativos representa una tecnología válida para la valorización energética de residuos. En particular, en el sector frigorífico se reúnen las condiciones de requerimientos de energía térmica (calor) y la experiencia, la capacidad y la infraestructura necesarias; la valorización de los sólidos de aguas verdes mediante su quema directa en calderas, junto con un combustible principal. A su vez, debido a los grandes volúmenes de generación de esta corriente de residuos y los crecientes

requisitos para el control ambiental de su disposición, el aprovechamiento térmico surge como una alternativa atractiva para el sector.

Es preciso reconocer, como ya ha sido mencionado, que han existido en nuestro país distintas experiencias de implementación de esta tecnología, aunque no se conocen emprendimientos que hayan logrado una operación estable y continua en el tiempo, y que incorporen la totalidad del residuo generado.

En cuanto a la tecnología desarrollada en el proyecto demostrativo implementado en Frigorífico Pando (Ontilcor), y que lo diferencia de otras experiencias de uso de residuos de sólidos de aguas verdes como combustible alternativo, corresponde a la importancia de contemplar los aspectos técnicos desde el propio diseño del sistema, que surge como una posibilidad ante la necesidad de realizar el recambio de la caldera.

Debido a las características del material, principalmente su relativamente alto contenido de humedad, se hace necesaria su incorporación sin comprometer una adecuada combustión y la generación de vapor. Si bien pueden existir distintas posibles alternativas para alcanzar esto, en el caso de Ontilcor, el proyecto se enfocó en alcanzar la menor humedad posible mediante métodos mecánicos y diseñar un sistema de alimentación del material a la caldera que garantice una buena distribución en el hogar. Esta alimentación se da de forma independiente de la leña, desde un punto elevado del hogar y con ayuda de una inyección de aire secundario para mejorar la dispersión. De esta manera, el material logra una deshidratación suficiente para que el material se encienda y combustione completamente antes de llegar al piso del hogar y evitar así su acumulación.

Si bien el ajuste de la alimentación llevó prácticamente dos años y requirió varios ajustes durante la puesta en marcha, la inclusión de estos aspectos desde el propio diseño del sistema, garantizó el éxito del proyecto.

El recambio de todo el sistema de generación de vapor de planta y la posibilidad que este hecho brindó al proyecto en el uso de un residuo como combustible alternativo, permitió alcanzar un sistema integral de forma efectiva, lo que puede resultar muy difícil en proyectos de adaptación de sistemas existentes.

Por otro lado, se considera que los sistemas de densificación del material (briqueteado o pelletizado) no parece ser una solución adecuada, ya que se requeriría un nivel de deshidratación mayor, lo que podría resultar muy complejo y comprometer el éxito del sistema.

En cuanto al aprovechamiento que se realiza del residuo, es decir, la energía útil obtenida, si bien puede parecer poca en comparación con la energía total necesaria, 7 % para el caso de Frigorífico Pando, el poder calorífico si puede ser considerado interesante, ya que para un residuo con un 50 % de humedad alcanza un poder calorífico correspondiente al 70 % del de la leña. Este hecho es de elevada importancia, debido a que de esta manera, no existen dudas respecto a que representa un sistema de uso de residuos como combustible alternativo y no como una simple incineración, lo que implicaría otros aspectos a considerar. De acuerdo a declaraciones de los técnicos de la empresa, se estima que el sistema podría aumentar la cantidad de residuos a incorporar.

Respecto a los aspectos ambientales, esta alternativa tecnológica de gestión de los residuos de sólidos de aguas verdes se destaca frente a otras posibles, en que son utilizadas las propias instalaciones de la planta y se obtiene un beneficio directo en los procesos productivos. La gestión comúnmente utilizada es la de acopio en pilas y distribución en terreno, lo que genera diversos problemas ambientales como la generación de lixiviados con altas cargas contaminantes, la generación de emisiones de GEI, la generación de olores molestos y proliferación de moscas y otros vectores.

Otra posible solución para la gestión de estos residuos corresponde al compostaje, para lo cual este residuo resultaría ideal, dadas sus características. Existen algunas experiencias de aplicación de esta tecnología en nuestro país, aunque se desconoce exactamente la situación actualmente de cada una. Sin embargo, son numerosos los requisitos en cuanto a infraestructura y operativa para lograr un sistema controlado, que un frigorífico difícilmente considere atractiva esta alternativa. Una opción podría ser el envío del residuo a una planta de compostaje comercial, aunque los costos tanto de contratación del servicio, como de transporte hacen que esta alternativa pueda ser viable solo en algunos casos particulares como contar con una planta lo suficientemente cerca para reducir los costos de transporte o en aquellos establecimientos sin posibilidad de realizar una operación ambientalmente adecuada.

Un aspecto importante que no pudo concretarse y queda pendiente, corresponde a las mediciones en emisiones en los gases de combustión, principalmente material particulado. Si bien el sistema cuenta con un separador de partículas (multiciclón), se considera este parámetro de gran importancia, ya que se identifica como el mayor impacto ambiental potencial de esta tecnología, sino se toman las medidas de control adecuadas.

Otro parámetro que podría ser importante determinar, es la temperatura de fusión de las cenizas, que ante la mezcla de combustibles puede verse afectada. En caso de presentar una temperatura de fusión demasiado baja, puede comenzar a desarrollarse un proceso de incrustación en las paredes del hogar y reducir la eficiencia del equipo.

En un análisis de la replicabilidad del proyecto a otros establecimientos del sector, bajo los supuestos detallados, la viabilidad económica de invertir en la adaptación de una caldera que permita la incorporación de residuos como combustibles alternativos, es atractiva, considerando solamente el ahorro en leña ((TIR 18 %, 5.3 años de tiempo de retorno de la inversión). Si además el proyecto significa un ahorro en los costos de disposición de los residuos en una planta tercerizada de compostaje, la inversión resulta muy atractiva (TIR 40 %, 2.8 años de retorno de la inversión. Contabilizando las dos fuentes ahorro como un ingreso y basado en los supuestos detallados anteriormente, por cada tonelada de residuo generado (a humedad final de 50%) se generan 48 USD de ahorros por sustitución de leña y 46 USD de ahorros por sustitución de alternativa de gestión.

Se considera que estos dos escenarios analizados representan el escenario de mínima, en el que en el escenario de línea de base no existen costos de gestión de los residuos generados; y un escenario de máxima, en el que el establecimiento contrata un servicio de compostaje para su mejor tratamiento y disposición. Entre estos dos escenarios se entiende existen diversas alternativas posibles, por lo que el modelado de los extremos permite estimar el rango de

indicadores de viabilidad en que puede encontrarse este tipo de iniciativa, aunque requeriría un estudio particular para ajustar los cálculos.

La evaluación del proyecto dependerá además de muchos otros factores que puedan definir la rentabilidad de la inversión y motivar a un establecimiento a implementarlo. Se identifican posibles factores tales como (i) la edad de la caldera y posibles ahorros por mejores eficiencias de una caldera nueva, (ii) el tipo de combustible usado y ahorros resultantes y (iii) mayores necesidades de energía térmica. Los dos últimos fueron determinantes para tomar la decisión en el caso de estudio de Ontilcor.

Por otro lado, no se modeló la exoneración del impuesto a la renta (IRAE) que podría obtenerse por la presentación del Proyecto a la COMAP, debido a que en cada caso particular los costos de inversión pueden variar significativamente, la inversión podría puntuar bajo el indicador de tecnología limpias⁹, entre otros, y mejorar aún más los indicadores de rentabilidad.

Es así que el uso de residuos como combustibles alternativos surge como una solución factible a la gestión, sin mayores problemas desde el punto de vista ambiental, que un diseño robusto de los aspectos técnicos del sistema asegura su funcionamiento estable y continuo. Si bien en una perspectiva de la economía circular, el aprovechamiento térmico supone un relativamente bajo nivel de circularidad, por lo antes mencionado, se considera una opción más viable y sostenible, que podría incluso resultar atractiva para otros sectores industriales.

⁹“Equipos de generación de energía térmica que no utilicen combustibles fósiles” son un ítem que se encuentra en la lista taxativa de Anexo I de tecnologías limpias del decreto 268/020.

9. Referencias

Dirección de Estadísticas Agropecuarias (DIEA), (2019). Anuario Estadístico Agropecuario 2019. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Uruguay.

Instituto Nacional de Carnes (INAC), (2019). Anuario Estadístico 2019. Uruguay. Accesible en: http://www.inac.uy/innovaportal/file/18355/1/inac_anuario2019.pdf

Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Capítulo 10: Emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol.

Oficina de Programación y Política Agropecuaria (OPYPA), (2020). Anuario OPYPA 2020. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Uruguay. Accesible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2020>

Proyecto Biovalor, s.f. Sitio web oficial: <http://biovalor.gub.uy/>

Proyecto Biovalor, (2016). Cuantificación de residuos generados en sectores agroindustriales uruguayos. Unidad de Gestión de Proyecto Biovalor. Uruguay. Accesible en: <https://biovalor.gub.uy/descarga/informe-tecnico-cuantificacion-residuos-generados-sectores-agropecuarios-agroindustriales-uruguayos/>

Unidad de Gestión de Proyecto (UGP) Biovalor, (2016). Cuantificación de residuos generados en sectores agroindustriales uruguayos. Proyecto Biovalor, MIEM-MGAP-MVOTMA, Uruguay. Accesible en: <http://biovalor.gub.uy/descarga/informe-tecnico-cuantificacion-residuos-generados-sectores-agropecuarios-agroindustriales-uruguayos/> (Enero 2020).