

Integración de Centrales Térmicas y Biorrefinerías a Biomasa: Sinergias para un Modelo Energético Circular

Almeida Rodrigo N.^{a, b*}, Müller Sebastián J.^b, Ramirez Carlos R.^{a, b},
Berent, Héctor F.^a, Hernandez Garcia, F.^c, Oliveira, Mario O.^{a, b},

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^b Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Energía Eléctrica - LIDEE, FI-UNaM, Oberá, Misiones, Argentina.

^c Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Rio Grande, Brasil.

e-mails: almeidarodrigonico@gmail.com, sebamullerk@gmail.com, ramirezcarlos1599@gmail.com,
hectorberent71@gmail.com, felipehernandez@furgs.br, mario.oliveira@fio.unam.edu.ar

Resumen

La integración de centrales térmicas alimentadas con biomasa y biorrefinerías de segunda generación representa una estrategia concreta para mejorar la eficiencia energética, reducir emisiones y avanzar hacia un modelo de economía circular. Este artículo analiza las ventajas técnicas y económicas de esta sinergia a partir del aprovechamiento conjunto de residuos lignocelulósicos, como el aserrín y el bagazo de caña, utilizados para producir bioetanol y generar electricidad mediante cogeneración. Se presentan ejemplos de implementación real, incluyendo los casos de la empresa finlandesa ST1 y de GranBio en Brasil, que ilustran la viabilidad industrial de estos sistemas integrados. Finalmente, se destacan los beneficios asociados a la reducción de costos logísticos, el aprovechamiento de subproductos, la escalabilidad tecnológica y el potencial de replicación en entornos agroindustriales.

Palabras Clave – Biocombustibles, Biomasa, Biorrefinería, Cogeneración, Economía circular, Sostenibilidad, Transición energética.

1 Introducción

En la actualidad, la generación de energía eléctrica depende en gran medida de los combustibles fósiles, lo que conlleva impactos ambientales significativos como la emisión de gases de efecto invernadero, la contaminación del aire y el agotamiento de recursos no renovables. No fue sino hasta que se evidenciaron las consecuencias de este modelo energético que comenzaron a impulsarse tratados, acuerdos internacionales y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), con el propósito de reducir progresivamente la huella de carbono de las actividades humanas [13].

Actualmente, cerca del 30 % de la electricidad mundial se produce a partir de fuentes renovables, lo que representa un aumento de aproximadamente 10 puntos porcentuales respecto a 2010, impulsado por políticas energéticas ambiciosas y la reducción de costos en ciertas tecnologías [1]. Sin embargo, la generación térmica sigue teniendo un rol predominante, debido a que las fuentes renovables aún no alcanzan una participación mayoritaria.

En este contexto, la ingeniería desempeña un papel clave en la búsqueda de alternativas sostenibles para la producción energética. En 2023, la demanda de energía eléctrica creció a una tasa del 2,2 % anual, superando el promedio del período 2010–2019 (1,5 %) [2], lo que refuerza la urgencia de encontrar soluciones que permitan aumentar la oferta energética sin agravar los impactos ambientales.

Este artículo propone una alternativa para reducir la huella de carbono mediante la implementación de biocombustibles de segunda generación (combustible líquido fabricado a partir

de biomasa lignocelulósica de plantas), producidos a partir de residuos lignocelulósicos forestales (principalmente aserrín), en grupos generadores comerciales. El biocombustible se obtendrá en una biorrefinería integrada a una central térmica de cogeneración que utiliza vapor de agua. Esta integración responde a la necesidad de viabilizar económicamente el proceso, compartiendo materia prima con una industria que la aproveche de forma conjunta [3].

La combinación de una biorrefinería con una central térmica permite, además, avanzar en múltiples ODS, al promover la valorización de residuos forestales que, de otro modo, serían incinerados sin aprovechamiento energético. De este modo, se contribuye a un modelo de economía circular, maximizando el uso de recursos y minimizando los desechos.

2 Fundamentos técnicos

2.1 Biorrefinerías

El concepto de biorrefinería se refiere al uso integral y eficiente del potencial de la biomasa lignocelulósica, permitiendo una producción sustentable mediante el aprovechamiento completo del material, incluidos sus residuos. Esto posibilita la obtención tanto de productos tradicionales como de una gama de compuestos químicos de alto valor agregado [4].

En el presente trabajo se analizarán los procesos necesarios para la producción de biocombustibles líquidos a partir de la fracción celulósica de residuos lignocelulósicos, excluyendo la obtención de otros bioproductos, dado que el objetivo específico de la planta propuesta es la generación de biocombustible líquido como único producto final.

Una de las principales ventajas de este tipo de biocombustibles —de segunda generación— es que no compiten por recursos destinados a la producción de alimentos, a diferencia de los biocombustibles de primera generación derivados de cultivos como el maíz o la caña de azúcar.

2.2 Bioproductos

Los productos obtenidos al final del proceso de conversión dependen de los compuestos extraíbles presentes en los residuos utilizados. En la Tabla 1 se presentan los bloques de construcción (*building blocks*) para bioproductos derivados de residuos agroindustriales y forestales. En este trabajo, se focaliza el interés en aquellos procesos que permiten obtener etanol y butanol, a partir de la extracción de hemicelulosas presentes en residuos como el aserrín y el chip de madera.

Como puede observarse, el concepto de biorrefinería es análogo al de una refinería de petróleo, en tanto permite la obtención de una variedad de productos derivados. Además del bioetanol y el butanol, es posible obtener biodiésel a partir de residuos forestales mediante tres rutas tecnológicas principales: pirólisis (o licuefacción térmica), hidrólisis e incluso gasificación. Un ejemplo destacado de esta aplicación se observa en las industrias Choren (Alemania), que desde 2010 produce miles de toneladas de biodiésel a partir de diversas materias primas, incluidos residuos de madera, mediante una tecnología propia denominada CCG (Choren Coal Gasification), basada en la gasificación [5].

En la misma línea, investigadores de la Universidad de Georgia han desarrollado un proceso basado en la pirólisis, que permite transformar aproximadamente el 17 % del peso seco de la

madera en biodiésel [3]. Entre las rutas emergentes, se destaca el proceso de hidrogenación-hidrolítica, también descrito en [3]. Aunque estos métodos han sido desarrollados recientemente, en la última década, representan una alternativa viable a los procesos petroquímicos convencionales, con un alto potencial de optimización y escalado.

Tabla 1—Bloques de construcción para bioproductos en base a residuos de la agro- y foresto industria
(Fuente: Adaptado de [4])

Tipo de residuo	Compuestos extraíbles	Productos según el proceso de conversión
FORESTOINDUSTRIA: - Corteza - Costaneros - Aserrín - Virutas - Despuntes - Chips y astillas - Podas	Celulosa	No degradativos: rayón, celofán, nanofibras/nanocristales de celulosa, celulosa microcristalina, carboximetilcelulosa
		Degradativos: etanol, ácido láctico, sorbitol, glutamato, monosódico, ácido glutámico, HMF, ácido levulínico, ácido láctico
	Hemicelulosas	No degradativos: filmes, polímeros
		Degradativos: etanol, xilitol, butanol, 2,3-butanodiol, furfural
AGROINDUSTRIA: - Bagazo - Cascarilla - Pajas - Podas (frutales, vid)	Lignina	No degradativos: combustibles, dispersantes, emulsionantes, secuestrantes, aditivos, adhesivos, co-reactivo de polímeros y resinas
		Degradativos: vainillina, dimetilsulfuro (DMS), dimetilsulfóxido (DMSO), gas, aceite y carbón
	Extractivos	No degradativos: adhesivos
		Degradativos: epóxidos

2.3 Centrales termoeléctricas

El objetivo fundamental de una central termoeléctrica es convertir parte de la energía térmica del combustible en energía eléctrica [6].

En la Fig. 1 se presenta el esquema básico de una central termoeléctrica cuya máquina motriz principal es una turbina accionada por un fluido en estado de vapor. Este sistema desarrolla el conocido ciclo de Rankine, que, en su forma más sencilla, se compone de los siguientes elementos:

- 1) Generador de vapor (*Ca*): Es el componente donde se realiza la combustión del combustible. El calor liberado es transferido al agua contenida en la caldera, provocando su vaporización. El vapor producido transporta la energía térmica hacia la turbina.
- 2) Turbina (*T* o *M*): Dispositivo encargado de transformar en energía mecánica parte de la energía térmica contenida en el vapor proveniente del generador de vapor.
- 3) Condensador (*Co*): Enfía y condensa el vapor que pasa por la turbina, cediendo parte de su contenido térmico al agua de refrigeración.
- 4) Bomba (*B*): Impulsa el agua condensada desde el condensador de regreso al generador de vapor, completando así el ciclo.

- 5) Alternador/Generador (G): Convierte la energía mecánica entregada por la turbina en energía eléctrica de corriente alterna.

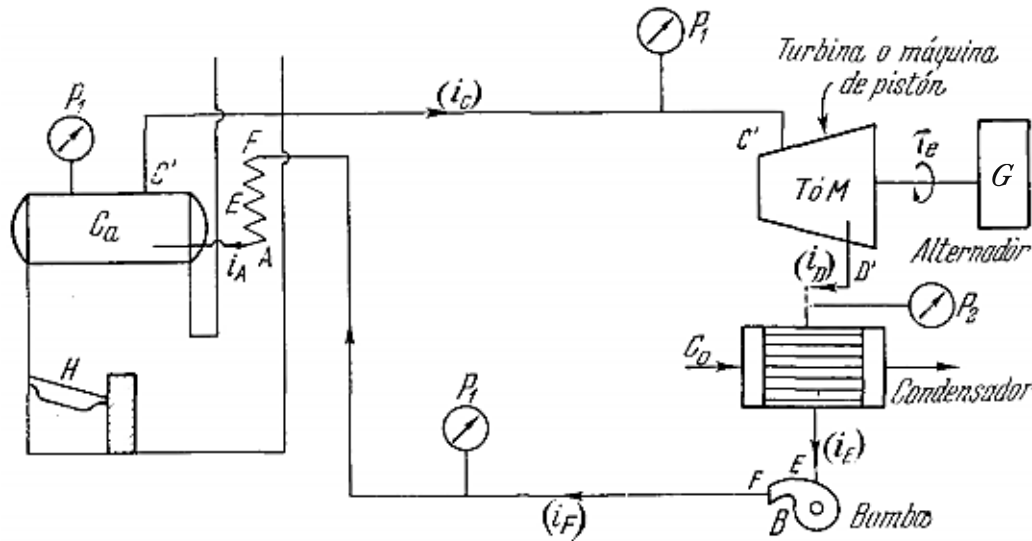


Fig. 1. Esquema de instalación térmica
(Fuente: Extraído de [6])

En este ciclo, el fluido de trabajo es habitualmente agua (tratada previamente para asegurar su comportamiento adecuado a lo largo del proceso termodinámico), aunque existen alternativas que emplean otros fluidos como lo es el mercurio en los *ciclos binarios*.

2.4 Centrales termoeléctricas alimentadas con biomasa

Como se mencionó previamente, el aprovechamiento del calor por medio de la combustión tiene lugar en el generador de vapor. En la actualidad, existe una amplia variedad de combustibles utilizados en este proceso, entre los que se destacan el carbón, el petróleo (y sus derivados), el gas natural y la biomasa.

El término biomasa es amplio y abarca distintos tipos de materia prima de origen biológico, tanto vegetal como animal. Puede incluir desde residuos agrícolas y forestales, hasta excrementos ganaderos (empleados en la producción de biogás), pasando por materiales leñosos utilizados en estufas domésticas o en procesos industriales. En términos generales, se considera biomasa a cualquier recurso biológico utilizado como fuente energética [7].

Uno de los principales referentes en el uso de biomasa para generación eléctrica es la central *Drax Power Station*, ubicada en el Reino Unido. Esta instalación suministra aproximadamente 14 teravatio-hora (TWh) anuales de electricidad a partir de la biomasa, lo que equivale al consumo eléctrico de alrededor de cinco millones de hogares, consolidándose como la mayor fuente de energía renovable del país [8].

3 Ventajas de la integración energética

Como se plantea en [4], las biorrefinerías orientadas al aprovechamiento y valorización de residuos lignocelulósicos presentan una mayor viabilidad técnica y económica cuando se instalan en proximidad a zonas rurales donde se desarrollan actividades agroforestales. Esta localización estratégica permite minimizar los costos de transporte de biomasa y facilita el abastecimiento continuo de materia prima.

Un caso representativo de esta sinergia se presenta en [9], donde se analiza el aprovechamiento de residuos generados durante el procesamiento de arroz. En dicho estudio, la biorrefinería fue instalada dentro del mismo complejo industrial, lo que permitió optimizar los flujos logísticos y obtener resultados económicos favorables tras su implementación.

Esta integración también favorece el aprovechamiento de materiales de desecho previamente no valorizados, como residuos industriales alimentarios y pan en descomposición. Un ejemplo destacado es el caso de la compañía ST1, que originalmente operaba como una empresa convencional de combustibles fósiles y, en 2007, inició su transición energética mediante la producción de etanol a partir de residuos. Actualmente, la empresa ha desarrollado y registrado tres tecnologías diferenciadas según la naturaleza del residuo sólido: Etanolix®, Cellunolix® y Bionolix®, las cuales permiten transformar diversos tipos de desechos en biocombustibles líquidos [10]. Esta experiencia demuestra que el compromiso con un modelo energético sustentable no debe limitarse a declaraciones, sino que puede materializarse en procesos industriales replicables y escalables.

El caso de ST1 ilustra cómo es posible sustituir progresivamente la producción basada en combustibles fósiles por alternativas renovables que contribuyan a la reducción de la huella de carbono. En resumen, la integración entre biorrefinerías y actividades agroindustriales o rurales ofrece múltiples ventajas tanto técnicas como económicas, entre las que se destacan:

- Reducción de costos logísticos, al ubicarse cerca de las fuentes de biomasa residual, lo que disminuye el transporte de materia prima y proporciona un abastecimiento constante y confiable de materia prima.
- Aprovechamiento de residuos previamente no valorizados, como desechos alimentarios o pan en descomposición, promoviendo un modelo de economía circular.
- Optimización de procesos industriales, mediante el uso compartido de instalaciones y flujos operativos, como se evidencia en casos reales de implementación.
- Viabilidad económica comprobada, según estudios de casos donde la integración ha demostrado resultados positivos en términos de retorno y eficiencia.
- Escalabilidad y replicabilidad del modelo, como lo demuestra la experiencia de la empresa St1, con tecnologías adaptadas a distintos tipos de residuos.
- Contribución efectiva a la transición energética, al sustituir gradualmente los combustibles fósiles por alternativas renovables que reducen la huella de carbono.

Estos beneficios posicionan a la sinergia entre biorrefinerías y centrales térmicas o agroindustrias como una estrategia clave para avanzar hacia un sistema energético más sustentable y resiliente.

4 Estudio de caso: integración en GranBio

Un ejemplo representativo de integración entre una central termoeléctrica alimentada con biomasa y una biorrefinería es el de GranBio, una empresa brasileña de biotecnología fundada en 2011 [11]. Este caso constituye un hito en la transición hacia un modelo energético basado en fuentes renovables avanzadas.

En sus inicios la empresa empleaba vapor generado mediante procesos térmicos tradicionales para cubrir las necesidades energéticas de sus operaciones industriales. Este vapor provenía principalmente de la combustión de biomasa, como el bagazo de caña de azúcar, un recurso ampliamente utilizado en el sector azucarero-alcoholero brasileño.

En 2014, la compañía inauguró en el estado de Alagoas la planta BioFlex 1, una de las primeras biorrefinerías de etanol celulósico (de segunda generación) de América Latina. Esta instalación utiliza como materia prima residuos agrícolas, principalmente paja y bagazo de caña, que son transformados en etanol mediante hidrólisis enzimática seguida de fermentación. Su capacidad instalada alcanza los 82 millones de litros anuales de etanol 2G, lo que evidencia un cambio significativo hacia la biotecnología avanzada y la economía circular [11].

El modelo de producción de GranBio se complementa con un sistema de cogeneración de energía, en el que el vapor de biomasa no solo abastece las necesidades térmicas del proceso, sino que también se utiliza para la generación de electricidad destinada al autoconsumo o, eventualmente, a la exportación a la red eléctrica. Asimismo, la empresa reutiliza subproductos como la lignina no fermentable, maximizando el aprovechamiento energético de la biomasa [11].

Un resumen de las distintas etapas y la producción de esta empresa se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2 — Etapas de transición de empresa GranBio.

Etapas	Producción energética	Características
Inicial	Vapor de biomasa	Modelo tradicional de cogeneración
Transición	Etanol 2G	Inversión en biorrefinería avanzada
Actualidad	Modelo mixto	Producción de biocombustibles + energía térmica renovable + biotecnología

Actualmente, GranBio atraviesa una etapa de consolidación y expansión tecnológica que, aunque aún no refleja ganancias netas, demuestra una evolución económica positiva. La empresa ha reducido pérdidas operativas, cancelado deudas clave y fortalecido su posición financiera mediante subvenciones internacionales y alianzas estratégicas. Su modelo de negocio se apoya en activos tecnológicos propios, una sólida cartera de patentes y proyectos en desarrollo como la biorrefinería Exygen, que apuntan a una futura rentabilidad sostenida. Todo esto indica que GranBio, aunque todavía en fase de inversión, avanza con solidez como referente en biotecnología y transición energética [12].

5 Conclusión

La integración de centrales térmicas alimentadas con biomasa y biorrefinerías representa una estrategia concreta y replicable para avanzar hacia sistemas energéticos más sostenibles, eficientes y

alineados con los principios de la economía circular. A lo largo del artículo, se evidenció que esta sinergia no solo permite un uso integral de la biomasa residual, reduciendo emisiones y desperdicios, sino que también mejora la viabilidad económica de ambos sistemas al compartir infraestructura, materia prima y flujos energéticos.

Casos reales como los de GranBio en Brasil o ST1 en Europa demuestran que esta integración es factible técnica y económicamente, incluso a escala industrial. Estas experiencias resaltan el valor de la innovación tecnológica en la transición energética, donde la biomasa deja de ser un residuo para convertirse en un recurso estratégico.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo institucional de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones. Asimismo, agradecen especialmente por las gestiones realizadas para establecer vínculos con empresas del sector, lo cual fue clave para avanzar en la investigación y el desarrollo del proyecto.

Referencias

- [1] Enerdata, “Cuota de energías renovables en la producción de electricidad,” Datos Enerdata. [Online]. Disponible: <https://datos.enerdata.net/energias-renovables/produccion-electricidad-renovable.html>, Accedido en: Jun. 24, 2025
- [2] Enerdata, “Consumo energético total,” Datos Enerdata. [Online]. Disponible: <https://datos.enerdata.net/energia-total/datos-consumo-internacional.html>, Accedido en: Jun. 24, 2025
- [3] L. Faba, E. Díaz & S. Ordóñez. (2014, Julio). “Transformación de biomasa en biocombustibles de segunda generación” en *Madera y Bosques* 20(3):11-24. [Online]. Disponible: [Transformación de biomasa en biocombustibles de segunda generación](#), Accedido en: Jun. 24, 2025
- [4] M. C. Area & M. E. Vallejos, “Bio-productos y bio-materiales a partir de la biorrefinería de residuos agro y forestoindustriales” en *Panorama de la industria de celulosa y papel y materiales lignocelulósicos 2015*, 1ra ed. São Paulo, Brasil, 2016, pp. 118-148.
- [5] CHOREN Industrietechnik GmbH, “Proceso de Gasificación de Carbón CHOREN®,” Tecnología. [Online]. Disponible: choren.com/de/technologie/choren-coal-gasification/, Accedido en: Jun. 25, 2025
- [6] M. Mesny, “Ciclos de las centrales” en *Generación del vapor*, 1ra ed. Buenos Aires, Argentina: Marymar, 1972, pp. 1-54.
- [7] L. Morales. (2018, Mayo). “Centrales Termoelectricas de biomasa,” [Online]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/324923017_Centrales_termoelectricas_de_biomasa, Accedido en: Jun. 25, 2025
- [8] Drax, “Central eléctrica de Drax,” Drax Power Station. [Online]. Disponible: <https://www.drax.com/about-us/our-sites-and-businesses/drax-power-station/>, Accedido en: jun. 25, 2025
- [9] C. G. Fit, N. M. Clauser, F. E. Felissia, y M. C. Area, “Biorefinery design from agroindustrial by-products and its scaling-up analysis” en *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 31, 2025, Art. no. 102175. [Online]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102175>, Accedido en: Jun. 26, 2025
- [10] ST1, “Energy transition roadmap,” ST1 Sustainability, [Online]. Disponible: <https://st1.com/about-us/sustainability/energy-transition/energy-transition-roadmap>. Accedido en: Jun. 26, 2025
- [11] GranBio, “GranBio inicia produção de etanol de segunda geração,” Centro de Mídia – Press Releases, São Paulo, 24 de setembro de 2014. [Online]. Disponible: <https://www.granbio.com/centro-de-midia/press-releases/granbio-inicia-producao-de-etanol-de-segunda-geracao/>. Accedido en: Jun. 26, 2025
- [12] GranBio, “Investidores,” GranBio Investidores. [Online]. Disponible: <https://www.granbio.com/investidores/>. Accedido en: Jun. 26, 2025

- [13] Naciones Unidas, “*Objetivos de Desarrollo Sostenible*,” Objetivos y metas de desarrollo sostenible, [Online]. Disponible: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>. Accedido en: Jul. 25, 2025