

# MODELADO Y OPTIMIZACIÓN DEL ABASTECIMIENTO DE BIOMASA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA: REVISIÓN DE POTENCIALES ENFOQUES PARA UNA PLANTA DEL NORESTE ARGENTINO

BRAGADO, María Virginia<sup>1</sup>; BROZ, Diego<sup>2</sup>; DONDO, Rodolfo<sup>3</sup>

## RESUMEN

La instalación de una planta de generación y cogeneración de energía eléctrica y térmica con biomasa forestal trae consigo el interrogante en cuanto al abastecimiento de las potenciales materias primas. Este artículo presenta una revisión de la literatura en cuanto a la optimización de la cadena de suministro de biomasa. Primeramente se presentan las principales definiciones relacionadas con la cadena de suministro y las diferentes actividades de una cadena. Se detallan las estructuras y los modelos de programación matemática para la gestión de la cadena de suministro. Luego, se realiza una revisión de la literatura para las diferentes funciones objetivos y se describe la clasificación de niveles de toma de decisión. Este artículo presenta una mirada global de las cadenas de suministro de biomasa a fin de identificar la herramienta de gestión que mejor se adopte al caso bajo estudio.

**Palabras clave:** *Biomasa, Cadena de Suministro, Bioenergía*

## INTRODUCCIÓN

En un contexto mundial marcado por la dependencia de los combustibles fósiles, cada vez más onerosos y escasos, sumado al aumento del consumo de energía, nos lleva a pensar en nuevas alternativas más sustentables y con un menor impacto ambiental. Con el objetivo de alcanzar la autosuficiencia y, con ella, el reemplazo de los combustibles fósiles, es que surgen las energías renovables de origen orgánico (PÉREZ CASAR, 2014).

La biomasa son productos biodegradables, desechos y residuos de origen biológico procedentes de la agricultura, la silvicultura y la acuicultura. La biomasa proviene de una amplia gama de materias primas que incluye la madera, los cultivos agrícolas, los subproductos de la transformación de la madera, el estiércol y la fracción orgánica de los desechos. La biomasa como una forma de energía renovable tiene la ventaja de ser fácilmente almacenada, transportada y utilizada. Esto hace que la biomasa sea única entre otras opciones de energía renovable (HOLM-NIELSEN y EHIMEN, 2016).

Si bien la utilización de biomasa con fines energético genera muchas ventajas, SHABANI *et al.* (2013) presentan las dificultades a superar para el uso eficiente de la biomasa, como ser la disponibilidad, el costo y la calidad, el rendimiento de conversión, el costo de transporte y el desempeño del sistema logístico. Todas estas dificultades inducen un alto costo de la gestión de la cadena de suministro de biomasa. Existen diversas formas de abordar estas dificultades y reducir el costo de la energía producida a partir de biomasa, una de estas es mejorar la cadena de suministro y optimizar su diseño.

Este trabajo pretende presentar diferentes enfoques de estudio de cadenas de abastecimientos de biomasa a fin de evaluar tales alternativas para aplicar en el caso de la empresa Pindó S.A., radicada en el norte de la provincia de Misiones. La instalación de una planta de generación de 4,5 MW y la gran alternativa de ofertas de biomasa exige un estudio holístico sobre las alternativas de abastecimiento con el objeto de reducir el costo de la energía generada.

## METODOLOGÍA

Para la elaboración de este trabajo se realizó una revisión bibliográfica de estudios de cadena de suministro de biomasa basándose en criterios diferentes en cuanto al objetivo de estudio y la toma de

---

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Forestales UNaM, Calle Bertoni 124, Eldorado Misiones.

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Eldorado, Misiones, Argentina.

<sup>3</sup> Universidad Nacional del Litoral, Santa Fé. Bv. Pellegrini 2750, S3000 Santa Fe.

E-mail: [mvbragado@gmail.com](mailto:mvbragado@gmail.com); [diegoricargobroz@gmail.com](mailto:diegoricargobroz@gmail.com); [rdondo@santafe-conicet.gov.ar](mailto:rdondo@santafe-conicet.gov.ar)

Tel: (03751)15605829

decisiones. Según SAMPIERI *et al.* (2006), el enfoque presentado es del tipo exploratorio y descriptivo, cuyo objetivo es examinar un tema o problema de investigación y familiarizarnos para llevar a cabo una investigación más completa.

## **ASPECTOS GENERALES DE LA CADENA DE SUMINISTRO**

La cadena de suministro es un sistema integrado por cuatro entidades: proveedor, fabricante, centros de distribución y clientes. El objetivo que se persigue es establecer un flujo de materiales o productos entre un origen y el usuario final. La gestión de ésta puede tener varios objetivos como ser minimizar costos, maximizar beneficios, entre otros. El diseño de la cadena de suministro consiste en la configuración de sus componentes, desde los nodos oferentes hasta los nodos demandantes y el flujo de los materiales o productos (SHARMA *et al.* 2013).

El diseño de la cadena de suministro de biocombustibles incluye decisiones relacionadas con el tipo de biomasa a seleccionar, cuánto y de qué lugar tomarla, qué tecnología de producción instalar, dónde localizar las instalaciones y con qué capacidad, qué tipo y cantidad de biocombustible entregar y qué mercado satisfacer, con el fin de que la relación costo-beneficio de la producción de biocombustibles sea favorable (TAPIA BARRERA *et al.* 2014). GOLD y SEURING (2011) revelan que los principales problemas de la administración y logística de la cadena de suministro para la producción de bioenergía se encuentran en la cosecha y recolección de biomasa, el almacenamiento, el transporte, las técnicas de pretratamiento y el diseño general del sistema. La baja densidad energética de la biomasa (poca cantidad de energía por unidad de peso o volumen) y su alta dispersión geográfica conlleva un gran desafío a la hora de gestionar una cadena de suministro, especialmente debido a los altos costos de transporte. Según la CADER (2015) el transporte representa aproximadamente un 25% del costo por unidad energética generada, para la IRENA (2012) este costo representa el 34% y para la ETSAP (2013) el 43%.

En ATASHBAR *et al.* (2016) se realiza una descripción de cada una de las etapas involucradas en la logística de la cadena de suministro. La biomasa se debe almacenar a menudo desde el momento de la cosecha hasta que sea necesaria por la planta de energía. Dependiendo del clima y la biomasa, el almacenamiento puede ser al aire libre o techo cubierto y ventilador de aire. Puede ubicarse cerca de la finca o en un almacén centralizado. Dependiendo del tamaño de la planta de energía, se puede considerar la disponibilidad de biomasa y la frecuencia de la cosecha, el tamaño diferente y el número de lugares de almacenamiento centralizados.

Pueden emplearse varios modos de transporte, tales como caminos, ferrocarriles, vías navegables o una combinación de ellos. En general, el transporte por carretera se suele utilizar para distancias cortas y tiene una flexibilidad significativa. El transporte ferroviario se aplica para medianas y largas distancias. El transporte de agua es adecuado para larga distancia. Dependiendo del tipo de biomasa, forma, distancia a recorrer y demanda de los clientes, se pueden seleccionar uno o varios modos de transporte. En nuestro país predomina el transporte por camiones, tanto para distancias cortas como largas, lo que eleva significativamente los costos.

Existen diferentes tipos de pretratamiento tales como ensilaje, secado, peletización, torrefacción y pirólisis. Los tipos más comunes son secado y pelletización. La peletización podría definirse como "secado y prensado de biomasa a alta presión para producir piezas cilíndricas de biomasa comprimida y extruida". El secado reduce la humedad de la biomasa. Aumentar la densidad sin reducir el contenido energético hace que la biomasa sea más barata de transportar. Esto afectará los costos de transporte y la eficiencia de la combustión en las plantas de energía. Por lo tanto, es importante considerar el preprocesamiento en la gestión de la cadena de suministro de biomasa.

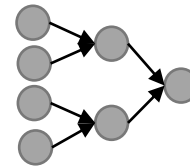
### **Estructura de la cadena de suministro**

La estructura de la cadena de suministro representa la conexión entre las instalaciones que trabajan juntas para suministrar un producto o servicios y estructurar los enlaces representativos del flujo de información y material. Existen diferentes tipos de estructuras de cadena de suministro: convergente, divergente, conjunta y de red (Cuadro 1). En la estructura convergente cada entidad tiene como máximo un sucesor con cualquier número de predecesores. La estructura divergente (arborescente) es opuesta a una estructura convergente. Una estructura conjunta es una combinación

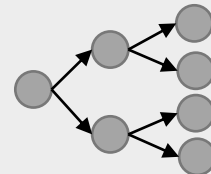
de estructuras convergentes y divergentes. La clasificación estructural final consiste en una estructura de red (general) que no pertenece a ninguna de las clases de cadena de suministro estructural descritas anteriormente (SHARMA *et al.* 2013).

**Cuadro N° 1:** Estructura de cadena de suministro (SHARMA *et al.* 2013).

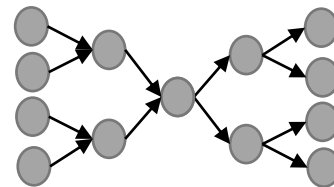
Convergente: Cada nodo o instalación en la cadena de suministro tiene como máximo un sucesor, pero muchos predecesores.



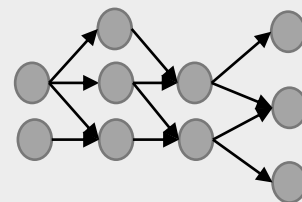
Divergente: Cada nodo de la cadena de suministro tiene un predecesor pero muchos sucesores.



Conjunta: Las estructuras convergentes y divergentes se combinan en un orden y proporcionan una única estructura conectada.



Red: La estructura que no es convergente, divergente o conjunta.



## GESTIÓN DE CADENA DE SUMINISTRO

De acuerdo con SHARMA *et al.* 2013 se pueden identificar cuatro métodos de modelación aplicados en la gestión de la cadena de suministro: *i)* determinísticos, *ii)* estocásticos, *iii)* híbridos y *iv)* modelos dirigidos por Tecnologías de Información (*IT-driven models*). Para los modelos deterministas, los parámetros son conocidos y se fijan con certeza. En los modelos estocásticos, al menos un parámetro es incierto y aleatorio; también se les llama modelos probabilísticos; se sub clasifican en modelos óptimos de control teórico y de programación dinámica. Los modelos híbridos tienen elementos de modelos determinísticos y estocásticos, incluyen modelos de teoría de inventario y de simulación. Los modelos dirigidos por tecnologías de información integran y coordinan varias fases de la planificación de la cadena de suministro en tiempo real utilizando el software de aplicación lo que ayuda a mejorar la visibilidad en toda la cadena de suministro.

Los modelos están integrados por una o varias funciones objetivos y varias restricciones. Existe una variedad de funciones objetivos según sean los requerimientos del sistema modelado. En las cadenas de suministro de biomasa, los objetivos generales pueden ser diferentes. Minimizar los costos generales es el objetivo más común entre los modelos de la cadena de suministro de biomasa. CHIEN y YUEYUE (2012) proponen un diseño y gestión de la cadena de bioetanol a fin de minimizar los costos de la cadena. AKJUL *et al.* (2012), por su parte, realizan un estudio de optimización económica de una cadena de suministro de biocombustibles avanzada en el Reino Unido con el fin de minimizar el costo total de la cadena de suministro. AVAMI (2012) proporciona un marco para evaluar toda la cadena de producción de biodiesel desde los recursos hasta el usuario final en Iran, con el fin de minimizar los costos de toda la cadena.

En algunos estudios, los investigadores prefieren definir su función objetiva de una manera de maximizar el beneficio total. KIM *et al.* (2011) realizan un estudio de diseño y gestión de la cadena de

biocombustible con el objetivo de determinar el número, la ubicación y el tamaño de dos tipos de instalaciones de procesamiento y la cantidad de materiales a transportar entre los distintos nodos de la red. ZHU *et al.* (2011) estudian la gestión de cadena de biomasa para la maximización de ganancia mediante un sistema logístico de biomasa para la producción de biocombustible. BAI *et al.* (2012) estudian las interacciones entre el diseño de la cadena de suministro de biocombustibles, el uso de tierras agrícolas y el equilibrio del mercado local de alimentos; centrándose en el comportamiento económico de las partes interesadas (Cuadro 2).

**Cuadro N° 2:** Resumen de artículos de cadena de suministro.

Autor y Año	Nº de objetivos	Objetivo	Sustentabilidad			Método de modelación
			Económico	Ambiental	Social	
CHIEN y YUEYUE (2012)	Mono objetivo	Minimizar costo	X			MILP
AKJUL <i>et al.</i> (2012)	Mono objetivo	Minimizar costo	X			MILP
KIM <i>et al.</i> (2011)	Mono objetivo	Maximizar ganancia	X			MILP
ZHU <i>et al.</i> (2011)	Mono objetivo	Maximizar ganancia	X			MILP
PAPAPOSTOLOU <i>et al.</i> (2011)	Mono objetivo	Maximizar rendimiento	X			MILP
ZHANG <i>et al.</i> (2011)	Multi objetivo	Maximizar VAN y sostenibilidad de los flujos de madera aserrada.	X	X		MILP
GIAROLA <i>et al.</i> (2011)	Multi objetivo	Maximizar VAN y sostenibilidad ambiental	X	X		MH
YOU <i>et al.</i> (2011)	Multi objetivo	Minimizar costos y sostenibilidad ambiental	X	X	X	MILP
BAI <i>et al.</i> (2012)	Mono objetivo	Maximizar ganancia	X			NLP
AVAMI (2012)	Mono objetivo	Minimizar costo	X			NLP

Nota: MILP: programación mixta-entera; NLP: programación no lineal; MH: modelo híbrido.

En algunos casos, en lugar de minimizar los costos generales o maximizar los beneficios totales, buscan la maximización del rendimiento. PAPAPOSTOLOU *et al.* (2011) realiza un estudio de diseño y gestión de la cadena de biocombustibles para la maximización del rendimiento total de la cadena. En algunos estudios, la optimización multiobjetivo se emplea para encontrar un equilibrio entre los criterios en conflicto. ZHANG *et al.* (2011) presenta un estudio de gestión de cadena forestal con objetivo múltiple, donde se busca la maximización del beneficio económico de los bosques junto a la minimización el impacto negativo en el hábitat Forestal. GIAROLA *et al.* (2011) estudia una optimización multi-objetivo para el diseño y planificación de biorrefinerías híbridas de primera y segunda generación. Se plantea, por un lado, maximizar el desempeño financiero del negocio y, por otro, cumplir con criterios de sostenibilidad ambiental. YOU *et al.* (2011) presenta un estudio de optimización del ciclo de vida de las cadenas de suministro de biomasa a líquido con redes de procesamiento centralizado distribuidas.

### Clasificación de los niveles de toma de decisiones

Una cadena de suministro consiste en una jerarquía natural de los procesos de toma de decisiones, que incluyen: decisiones estratégicas (a largo plazo), tácticas (a mediano plazo) y

operacionales (a corto plazo) basadas en su nivel de significación. Las decisiones estratégicas se centran en el diseño de una cadena de suministro eficiente con el objetivo de alcanzar los objetivos generales de las organizaciones y aumentar su ventaja competitiva, como la configuración de la cadena de suministro, la asignación de recursos y la sección de tecnología de producción. Las decisiones tácticas proporcionan beneficios en función de los costos para una organización actuando dentro de las limitaciones desarrolladas durante la planificación estratégica, como la planificación y el control de la producción, la administración de la flota y la gestión de la logística. En el nivel operativo se incluyen decisiones detalladas de producción, inventario y gestión del transporte.

## CONCLUSIONES

El papel de la bioenergía en el futuro "suministro de energía" dependerá del grado en que las barreras pertinentes puedan superarse. Para salvar estos obstáculos e incertidumbres y mejorar el desarrollo de un mercado bioenergético sostenible y competitivo, el diseño óptimo y eficiente de una cadena de suministro de biomasa es crucial debido, esencialmente, a los altos costos incurridos en el transporte.

Este artículo presenta una visión general de las investigaciones realizadas en cuanto a los métodos de optimización para el diseño de la cadena de suministro de bioenergía. Tras una revisión bibliográfica podemos concluir que la mayoría de los estudios realizados para gestión de cadena de abastecimiento de biomasa se centran en niveles estratégicos. En cuanto al método de modelación los estudios revisados optaron en su gran mayoría por el trabajo con programación matemática, predominando la MILP, aunque también se encontraron trabajos en los que se optó por la PNL y el MH.

En cuanto a las funciones objetivas la mayoría de los trabajos revisados presentaban un único objetivo orientado a lo económico, minimizar los costos o maximizar ganancias; sin embargo se encontraron artículos multiobjetivos en los que más allá de la mejor rentabilidad económica se apunta a las energías limpias con un compromiso con el medio ambiente, presentando como restricción el grado de sostenibilidad ambiental.

## LITERATURA CITADA

- AKGUL, O., SHAH, N., PAPAGEORGIOU, L.G. (2012). Economic optimisation of a UK advanced biofuel supply chain. *Biomass & Energy*, vol. 41, pp. 57-72
- ATASHBAR, N. Z., LABADIE, N., PRINS, C. (2016). Modeling and optimization of biomass supply chains: A review and a critical look. *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, num. 12, pp. 604-615.
- AVAMI A. (2012). A model for biodiesel supply chain: A case study in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 4196-4203.
- BAI, Y., OUYANG, Y., PANG, J. (2012). Biofuel supply chain design under competitive agricultural land use and feedstock market equilibrium. *Energy Economics*, vol. 34, pp. 1623-1633.
- BARON, M., HUERTAS, I., ORJUELA, J. (2013). Gestión de la cadena de abastecimiento del biodiesel: Una revisión de la literatura. *Ingeniería*, Vol 18, pp. 84-117.
- CADER (2015). Costos, potencial y perspectivas de la Biomasa en Argentina. *Energía Estratégica*. En <http://www.energiaestrategica.com/costos-potencial-y-perspectivas-de-la-biomasa-en-argentina/>.
- CHIEN, W.C., YUEYUE, F. (2012). Bioethanol supply chain system planning under supply and demand uncertainties. *Transportation Research Part E*, vol. 48, pp. 150-164.
- ETSAP (2013). Biomass Production and Logistics. En [https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/P09\\_Biomass%20prod&log\\_ML\\_Dec2013\\_GSOK.pdf](https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/P09_Biomass%20prod&log_ML_Dec2013_GSOK.pdf).
- GIAROLA, S., ZAMBONI, A. BEZZO F. (2011). Spatially explicit multi-objective optimisation for design and planning of hybrid first and second generation biorefineries. *Computers and Chemical Engineering*, vol. 35, pp. 1782-1797.
- GOLD, S. SEURING S. (2011). Supply chain and logistics issues of bio-energy production. *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, pp. 32-42.
- HOLM-NIELSEN, J. B., EHIMEN, E. A. (2016). Biomass supply chains for bioenergy and biorefining, 6ta ed. Woodhead Publishing. Amsterdam. 392 pp.

- IRENA (2012). Biomass for power generation, Renewable energy technologies: cost analysis series. IRENA working paper, vol. 1, num. 1/5, 50 pp.
- KIM, J., REALFF, M.J., LEE, J.H., WHITTAKER, C. FURTNER, L. (2011). Design of biomass processing network for biofuel production using an MILP model. *Biomass & Bioenergy*, vol. 35, num. 2, pp. 853-871.
- MAESTROPAOLO, J., GIELHARD, O., BONKIEVICZ, S. (2012). Aprovechamiento de Residuos de Cosecha para la Producción de Energía. En 15as Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Facultad de Ciencias Forestales, UNaM - EEA Montecarlo, INTA. Eldorado, Misiones, Argentina. pp. 1-8.
- PAPAPOSTOLOU, C., KONDILI, E., KALDELLIS, J.K. (2011). Development and implementation of an optimisation model for biofuels supply chain. *Energy*, vol. 36, pp. 6019-6026.
- PEREZ CASAR, L. (2014). Argentina con energías renovadas. *Revista de investigaciones agropecuarias*, vol.40, pp. 125-128.
- SAMPIERI, R.H., Collado, C.F., Lucio, P. B., Pérez, M. (1998). *Metodología de la investigación* (4ta Ed). Mcgraw-hill. México. 850 pp.
- SHARMA, B., INGALLS, R., JONES, C., KHANCHI, A. (2013). Biomass supply chain design and analysis: Basis, overview, modeling, challenges, and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 608-627.
- TAPIA BARRERA, L. M., ACEVEDO CHEDID, J., ARAMÉNDIZ TATIS, H., ARARAT HERRERA, J. (2014). La sostenibilidad en el diseño de cadenas de suministro de biocombustibles. *Revista Ingenierías*, vol. 14, num. 26, pp. 57-72.
- YOU, F. WANG, B. (2011). Life Cycle Optimization of Biomass to Liquid Supply Chains with Distributed - Centralized Processing Networks. *I&EC research*, vol. 57, num. 17, pp. 10102-10127.
- ZHU, X., LI, X., YAO, Q. CHEN, Y. (2011). Challenges and models in supporting logistics system design for dedicated-biomass-based bioenergy industry. *Bioresource Technology*, vol. 102, pp. 1344-1351.