



# Capítulo 4

## **Coproductos del bioetanol de caña de azúcar**

*Además del bioetanol, la agroindustria de caña de azúcar produce una creciente gama de productos terminados y materias primas intermedias, que mejoran la inversión y permiten, mediante interesantes sinergias, agregarle valor al proceso total. Entre estos productos se destaca, naturalmente, el azúcar, que es el producto pionero y tradicional de esta industria. En los últimos años, la energía eléctrica producida en sistemas de cogeneración ha crecido y se intenta generar excedentes que puedan abastecer a la red pública. Esto mejora la producción económica de la agroindustria y aumenta la oferta global de electricidad en muchos países, como sucede en el Brasil. En este capítulo se analiza el proceso de fabricación de todos los productos extraídos de la caña que poseen un importante mercado y han desarrollado una alta tecnología. En el próximo capítulo se presentarán las nuevas posibilidades en desarrollo o en fase inicial de comercialización.*



## 4.1 Azúcar y derivados

El azúcar, componente básico de la dieta humana moderna, está constituido, esencialmente, por sacarosa y se hizo conocido en el mundo occidental gracias a los árabes, que lo introdujeron en la Edad Media como especia de alto valor. El azúcar de caña comenzó a ser producido en Portugal a partir del cultivo en sus colonias del Atlántico y, debido a la amplia expansión del cultivo de caña en el Nuevo Mundo tropical, pasó a ser de un producto de uso restringido a las élites a mercancía de gran empleo en todo el mundo. El azúcar fue importantísimo en la formación de la economía brasileña y representó más que el oro o cualquier otro producto. Según relatan los intelectuales Gilberto Freyre y Câmara Cascudo, el azúcar ayudó a moldear la sociedad y los hábitos del pueblo brasileño. Esta importancia se observa también en muchos otros países donde la agroindustria de la caña fue y sigue siendo un elemento central de la actividad económica.

Actualmente, más de 130 países producen azúcar y su producción mundial en la cosecha 2006/2007 alcanzó los 164,5 millones de toneladas. Un 78% del total fue producido de la caña de azúcar cultivada, principalmente, en regiones tropicales y subtropicales del hemisferio sur. Lo demás se extrajo de la remolacha azucarera, cultivada sobre todo en las zonas templadas del Hemisferio Norte. Como los costos de producción de azúcar de caña son inferiores a los costos a base de la remolacha, cada vez se amplía más la fracción producida por los países en desarrollo, más aún cuando dejan de existir las barreras comerciales que impiden el libre comercio de este producto. De esta manera, se prevé que en el futuro, estos países serán los responsables de casi todo el crecimiento de la producción, ampliando su participación en la oferta mundial de azúcar de un 67% en el año 2000 a un 72% en 2010. La Tabla 17 muestra los principales productores y exportadores mundiales de azúcar, en la cosecha 2006/2007 [Illovo (2008)].

**Tabla 17 – Principales países productores y exportadores de azúcar en la cosecha 2006/2007\***

País	Producción (millón de ton)	Exportación (millón de ton)
Brasil	33.591	22.200
India	27.174	1.341
Unión Europea	16.762	1.228
China	11.630	–
Estados Unidos de América	7.661	–
Tailandia	7.011	4.528
México	5.543	380
África del Sur	5.419	2.339
Australia	5.156	3.958
Pakistán	3.813	–

Fuente: Illovo (2008).

\*Valores preliminares.

Considerando esta cosecha, los cinco mayores exportadores – Brasil, Tailandia, Australia, África del Sur y Guatemala – abastecen cerca de un 80% de todas las exportaciones mundiales de mercado, exceptuando los mercados preferenciales o en cuotas. Esta conformación de los mercados de azúcar fue comentada en el Capítulo 2 y es interesante observar que la parte comercializada en los mercados internacionales es pequeña si la comparamos con la producción, ya que el 69% de la producción mundial es consumida, actualmente, en el país de origen [FAO (2007b)]. De este modo, las eventuales variaciones en el volumen producido en cada país pueden provocar cambios importantes en la disponibilidad del producto y, consecuentemente, en su precio, debido a las diferentes condiciones climáticas. Se puede tomar el ejemplo de India, que avanza hacia la primera posición entre los países productores de azúcar y en los últimos años produjo excedentes exportables. Mientras que, otros países se vuelven importantes importadores de este producto.

Además de la volatilidad natural de un mercado con suministro variable y una elasticidad-precio relativamente baja, las condiciones de mercado de los demás edulcorantes, como la glucosa de maíz (*high fructose corn syrup* – HFCS) y los dulcificantes de baja caloría (que en el año 2005 correspondían a un 18% del mercado mundial de dulcificantes) influyen en los movimientos del precio del azúcar en el mercado internacional. En este sentido, en los últimos años la glucosa de maíz, muy utilizada en la industria de alimentos, le cede su mercado al azúcar de caña, debido a la elevación del precio de su materia prima.

A lo largo de las últimas décadas, el consumo mundial de azúcar se ha expandido de forma regular, con una tasa anual de 2%, lo que significa un crecimiento de la demanda de 3 millones de toneladas por año. En los países en desarrollo, el crecimiento se debe, principalmente, al aumento de la renta de los consumidores y de los cambios en los estándares alimenticios. Estos mercados representan, actualmente, más del 60% del actual consumo mundial de azúcar, con expectativas de que los países asiáticos respondan por la mayor parte de la expansión de la demanda de este producto [FAO (2007b)]. Tal comportamiento se puede observar en el mercado de India, en el cual, en los últimos 25 años, el consumo *per capita* de azúcar pasó de 6 kg/año a 17 kg/año, mientras que el de otros dulcificantes tradicionales (gur y khand-sari, producidos artesanalmente de la caña) se redujo de 14 kg/año a 9 kg/año [India Infoline (2008)]. En China, otro mercado asiático importante, se espera que la población consuma 14 millones de toneladas de azúcar por año hasta el año 2010, total que representaría un consumo *per capita* de 10 kg/año, valor considerado bajo en el promedio mundial, que es de 24 kg/año [FAO (2007b)]. El Gráfico 11 representa el consumo anual *per capita* de azúcar en distintos países.

Además del azúcar común y del azúcar refinado, están surgiendo en el marco de la industria de caña productos dulcificantes diferenciados, con mejores precios para el productor, y que alcanzan segmentos específicos del mercado consumidor. Este es el caso del azúcar orgánico, producido sin agroquímicos ni aditivos artificiales, y de los azúcares mezclados con dulcificantes de bajas calorías, como el aspartamo o la sucralosa, producida en base a sacarosa de la caña de azúcar.

## Las posibilidades del azúcar orgánico

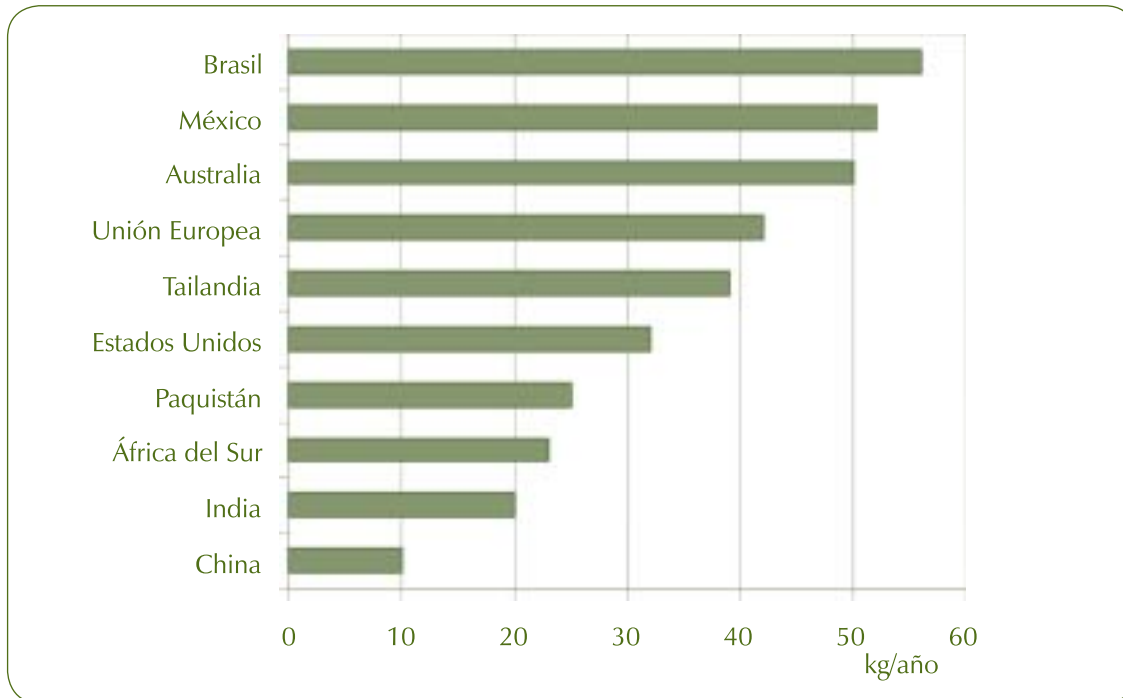
La evolución del comportamiento de los consumidores, valorando productos considerados más saludables y con menor concentración de aditivos químicos, viene abriendo un mercado interesante para la agroindustria de caña, con impactos ambientales positivos en la producción y en el procesamiento de caña de azúcar. Un buen ejemplo en ese sentido es presentado por el Grupo Balbo, que en 1986 inició el Proyecto Cana Verde, integrando de manera pionera tecnologías avanzadas con las tradicionales técnicas naturales de cultivo de la caña de azúcar, para ofrecer una línea de alimentos orgánicos, en la cual se destaca el azúcar Native, fabricado desde el año 2000 por la Planta São Francisco y actualmente comercializado en 40 países, respondiendo por casi un 22% de la facturación de este grupo.

Para que un producto agroindustrial sea considerado orgánico, no es suficiente que la materia prima utilizada sea cultivada sin agrotóxicos; por el contrario, es necesario repensar y adecuar todo el sistema productivo. La producción orgánica se asocia al manejo conservacionista y equilibrado de los recursos naturales utilizados, como tierra y agua, bajo una visión integrada y de respeto a la naturaleza, certificada en forma independiente por terceros. Aplicando este concepto en 13.400 hectáreas de cañaverales, totalmente certificados para la producción orgánica, en los cuales fueron ampliamente adoptados la cosecha de la caña cruda, el abonado orgánico (incluso con subproductos reciclados del procesamiento industrial), empleando variedades de caña con buena resistencia natural a plagas y el manejo de mazelas e insectos según técnicas manuales, mecánicas y biológicas. Bajo tales condiciones, el potencial ecológico de la caña es valorado y se preserva la fertilidad del suelo, con ganancias en los índices de productividad, que, tras algunos años de adaptación, resultan significativamente arriba del promedio de las demás plantas. La producción orgánica mantiene estándares elevados de desempeño ambiental también en la etapa industrial, con bajo uso de productos químicos y procedimientos de alto nivel para control del proceso, acompañamiento operacional y seguridad, de un modo general. Del mismo modo, se viene alcanzando la eficiencia energética mediante la implantación de sistemas de co-generación eficientes, con la obtención y la comercialización de créditos de carbono en los términos del Protocolo de Kyoto.

Como componente relevante de la producción de azúcar orgánico, la protección a la biodiversidad de la flora y de la fauna en el contexto de las áreas agrícolas viene siendo promovida con buenos resultados. Hubo un significativo esfuerzo para la formación y la recuperación de selvas con especies nativas y, en comparación a otras propiedades agrícolas de la misma región, la Planta São Francisco presenta hasta seis veces más especies de aves y una buena variedad de mamíferos, incluso carnívoros, como la onza parda y el lobo guará, según informaciones del Inventario de la Fauna realizado en la región, confirmando la recuperación de las cadenas ecológicas.

Todo el proceso agroindustrial y sus implicaciones ambientales son acompañados periódicamente por diversas instituciones certificadoras internacionales de Brasil, de los Estados Unidos, de Europa y de Japón [Native (2008)].

**Gráfico 11 – Consumo de azúcar per capita en diversos países**



Fuente: Illovo (2008).

La producción de azúcar, en base a diferentes materias primas y en diversos contextos, presenta una ancha franja de costos de producción. Brasil se destaca como el de menor costo entre todos los países productores, seguido por diversos países africanos [F. O. Licht (2007)]. Desde una perspectiva bioenergética, es importante mencionar que el bajo costo del azúcar brasileño está, en gran parte, relacionado al desarrollo de la tecnología agrícola e industrial de este sector, asociado a la expansión de la producción de bioetanol. Además, el bajo costo se debe al hecho de que la propia producción azucarera se procesa junto a la fabricación de bioetanol, como ya se explicó en el capítulo anterior, lo que confiere importantes ventajas operacionales y de calidad de producto. En pocas palabras: Brasil logró volverse el mayor productor de azúcar y con el menor costo porque asoció su producción al bioetanol.

## 4.2 Bioelectricidad

En el caso de la caña, un tercio de la energía solar que esta absorbe se transforma en azúcar, el resto corresponde a fibra vegetal, compuesta de celulosa, hemicelulosa y lignina, que constituyen el bagazo y la paja de la caña de azúcar. El uso de estos biocombustibles se vuelve más importante debido al bagazo, que es muy empleado como fuente de energía, especialmente en la agroindustria de caña.

En el procesamiento industrial de la caña son necesarios tres tipos de energía: energía térmica para los procesos de calentamiento y concentración, energía mecánica en las molientes y demás sistemas de accionamiento directo, como bombas y ventiladores de gran tamaño, así como energía eléctrica para accionamientos diversos, bombeo, sistemas de control e iluminación, entre otros fines. Para poder cumplir con estas demandas energéticas se realiza, en las plantas de azúcar y de bioetanol, la producción simultánea de estos diferentes tipos de energía, todas extraídas del mismo combustible: el bagazo. Tal tecnología es denominada cogeneración y representa una ventaja importante de la caña, en relación con otras materias primas utilizadas para la fabricación de azúcar o bioetanol, que necesitan aporte energético externo durante el proceso industrial.

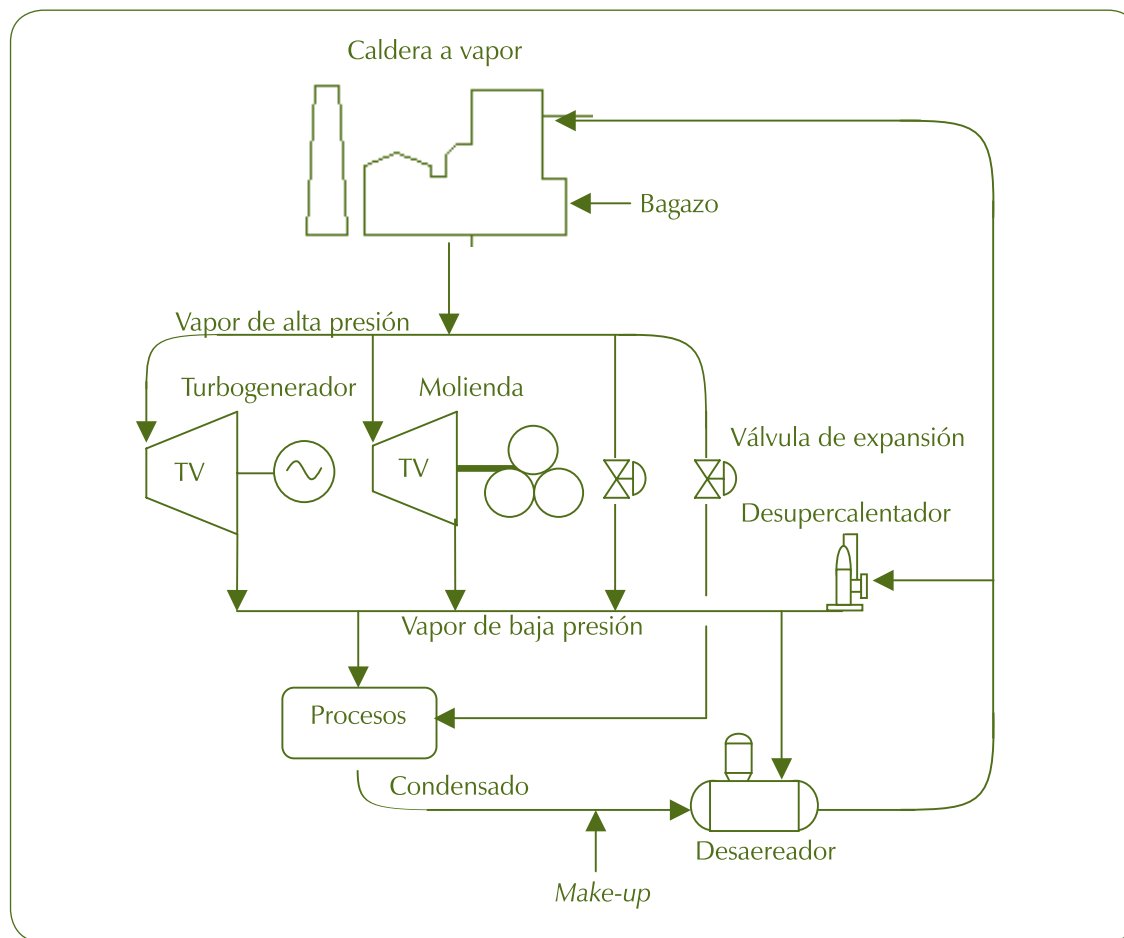
La Figura 18 muestra el esquema que se utiliza, generalmente, en el sistema de cogeneración de la agroindustria de caña en todo el mundo, en el cual las principales variaciones ocurren en la presión del vapor producido en las calderas [Seabra (2008)]. En síntesis, utilizando el calor liberado por la combustión del bagazo en las calderas se produce vapor de alta presión, utilizado en turbinas a vapor para generación eléctrica y accionamientos mecánicos, cuyo vapor de escape, a baja presión, sirve para usos térmicos. Esta concepción básica ofrece distintas variantes constructivas, que pueden aumentar la producción de energía eléctrica por tonelada de caña procesada, naturalmente, una vez que se realicen mayores inversiones. Aunque en la agroindustria, prácticamente, sólo se utilice el bagazo como combustible, se pueden incorporar también parte de los residuos de cosecha, o sea, la paja de la caña de azúcar.

En condiciones normales, el balance de vapor de una planta es, en general, equilibrado, es decir, la oferta cubre la demanda. Por lo tanto, se puede afirmar que, a lo largo de su desarrollo, esta agroindustria se ha transformado para mantener cierto equilibrio, compensando los incrementos del volumen de azúcar a procesar, resultantes de mejoras en la calidad de la caña, con ventajas en la eficiencia de los sistemas de generación y uso de vapor. En la actualidad, al analizar valores representativos de las plantas brasileñas, similares a la de otros países, se concluye que, en el procesamiento de una tonelada de caña la disponibilidad de bagazo (con un 50% de humedad) es del orden de 250 kg, o sea, permite producir entre 500 kg y 600 kg de vapor, la misma cantidad que se consume durante el proceso, entre 400 kg y 600 kg de vapor [Leal (2007)]. De esta manera, con una gestión responsable de las demandas de vapor y con la adopción de calderas más eficientes se podrían obtener sobras de bagazo. Igualmente, la principal ventaja sucede en la etapa de generación de potencia, anterior al uso del vapor en el proceso.

Estas ganancias son posibles porque, durante la producción de energía eléctrica y mecánica en la agroindustria de la caña, se cuenta con un grado de libertad importante, ofrecido por la condición del vapor producido en las calderas y utilizado, inicialmente, por las turbinas a vapor. Mientras que, por imposición del proceso industrial, la presión del vapor cuando sale de estas turbinas se acerca a 2,5 bar, a la entrada se puede elegir entre una amplia franja, dependiendo de la caldera empleada, y generando una potencia proporcional a su energía

térmica, función de presión y temperatura a la hora de salir de la caldera. Prácticamente, sin modificar la cantidad de combustible, se puede aumentar la producción de energía eléctrica en la agroindustria de la caña, utilizando calderas y turbinas que operen con vapor a presión y temperaturas más elevadas.

**Figura 18 – Configuración usual del sistema de cogeneración en la agroindustria de la caña**



Fuente: Seabra (2008).

Es interesante observar que, durante las últimas décadas, los parámetros del vapor se han incrementado progresivamente en el caso brasileño, y esa evolución se transporta a otros países [Horta Nogueira (2006a)]. Hasta 1980, las plantas del estado de São Paulo poseían calderas con presiones entre 12 bar. y 22 bar. y compraban el 40% de la energía eléctrica consumida. Desde 1990, con la paulatina sustitución de las calderas y turbinas antiguas, la presión media del vapor en estas plantas alcanzó 22 bar, con temperaturas de 300° C, suficientes como para alcanzar la autosuficiencia en el suplemento de energía eléctrica y la producción de algún

excedente para la venta. En condiciones normales, las plantas brasileñas consumen como potencia de eje, en la preparación y molienda de la caña, cerca de 16 Kwh. por tonelada de caña. Esa cantidad se suma a la demanda de energía eléctrica, del orden de 12 Kwh. por tonelada de caña [Macedo et al. (2006)]. Así, plantas con capacidad de generación superior a 28 Kwh. por tonelada de caña procesada típicamente pasan a disponer excedentes energéticos para la comercialización en la red pública.

Con la reciente valorización de esos excedentes y la posibilidad de venta de energía eléctrica a las concesionarias surge, en muchos países, un nuevo ciclo de modernización de los sistemas de cogeneración de la agroindustria de caña. Para lograr esto, las distintas plantas implantan sistemas, que utilizan presiones elevadas y significativas para la producción de excedentes de bioelectricidad. Al estimular la generación de energía eléctrica durante el cultivo de caña, utilizando la demanda con mayor eficiencia y menor impacto ambiental en el sector energético, se promueve también la evolución del marco regulador del sector eléctrico y el desarrollo de tecnologías para el control de los sistemas de cogeneración de tamaño medio.

En términos de eficiencia, la cogeneración es, intrínsecamente, muy superior a la generación termoeléctrica convencional. Las tecnologías termoeléctricas convencionales convierten en energía útil casi un 30% y, en condiciones-límite, hasta un 50% de la energía suministrada por el combustible, rechazando inevitablemente una parte relevante de energía térmica del medio ambiente. Al utilizar el calor rechazado para suplir las necesidades térmicas de proceso, los sistemas de cogeneración permiten obtener cantidades superiores al 85% en el uso de la energía del combustible, con evidentes beneficios en la economía y en la reducción de los impactos ambientales. A pesar de estas ventajas, la postura monopólica de las empresas de energía eléctrica y la rigidez del marco regulatorio, prácticamente impedían la operación entre autoprodutores así como la transacción de los excedentes disponibles. Afortunadamente, estas condiciones han evolucionado de manera positiva y, en diversos países, la agroindustria de caña se vuelve, cada vez más, un agente importante en la oferta de energía eléctrica. En este sentido, el caso brasileño es emblemático: en los primeros cinco años de la década actual, la oferta de energía de caña de azúcar se expandió hacia la red pública, a una tasa anual del 67% [Moreira y Goldemberg (2005)].

Con la posibilidad de comercializar los excedentes de bioelectricidad, las plantas de azúcar y bioetanol pasaron también a valorar los residuos sólidos de la cosecha, que pueden incrementar aún más la disponibilidad de energía eléctrica. Naturalmente, el uso de la paja de la caña de azúcar en las calderas, representando cerca de 140 kg por tonelada de caña cosechada, plantea nuevos interrogantes relacionados al uso de este biocombustible en la cosecha, la manipulación y en todo el proceso. Pero, de a poco, los resultados exitosos demuestran que estos biocombustibles son rentables y pueden ser utilizados en las plantas industriales a precios convenientes (entre U\$S 0,80 y U\$S 1,80 por GJ). Sin embargo, se recomienda que cerca de la mitad de la paja se mantenga en el suelo, por razones agronómicas, para lograr la reducción de la erosión, el reciclaje de nutrientes y el mantenimiento de un nivel mínimo de humedad en el suelo [Hassuani et al. (2005)]. Otro tema asociado a la generación de

bioelectricidad para ser comercializada se relaciona con la operación en períodos fuera de la cosecha, cuando no hay demanda de calor del proceso y se realiza el almacenamiento de bagazo. Esto también se está implementando en plantas de varios países con resultados favorables, siempre dependiendo de la matriz de oferta energética y de las condiciones particulares de despacho.

En la Tabla 18 se muestra cómo las condiciones del vapor afectan directamente la generación de excedentes energéticos en las plantas de azúcar y bioetanol. Para el cálculo de estos valores se consideraron: una producción de 280 kg de bagazo (50% de humedad) por tonelada de caña, vapor para el proceso a 2,5 bar. de presión y el uso de turbinas a vapor de contrapresión, excepto en los casos en que se realice la operación fuera de la cosecha o con bajos consumos de vapor de proceso, situaciones que imponen el empleo de turbinas de condensación, con el condensador operando a 0,12 bar. En ambos casos, en los que se considera el uso de la paja, se asume que un 50% permanece en el campo, lo que significa una disponibilidad efectiva de 70 kg de este biocombustible por tonelada de caña cosechada.

Como se observa en la Tabla 18, hay un importante incremento de los excedentes de energía eléctrica exportable asociado a la elevación de la presión. Además, en el contexto evaluado, con la reducción del consumo del vapor de proceso de 500 kg a 350 kg de vapor por tonelada de caña procesada (kg /tc), se obtiene un aumento de 24% en los excedentes de energía eléctrica. Con la utilización parcial de la paja, los excedentes se amplían a un 141%. También, vale la pena observar que, en Brasil, se han implementado sistemas de cogeneración con calderas operando arriba de 90 bar, con una generación estimada de 146 Kwh. por tonelada de caña, destinados a la red pública [Seabra (2008)]. En otro estudio se indica que, considerando la tecnología más eficiente ahora disponible en los sistemas a vapor para las plantas de azúcar – con generación de vapor a 105 bar. y 525° C, reducción de la demanda de vapor de proceso a 280 kg por tonelada de caña, aprovechamiento total del bagazo y del 50% de las puntas y hojas, con operación durante todo el año –, sería posible producir excedentes de 158 Kwh. por tonelada de caña procesada, luego destinada a la red de la concesionaria [Walter y Horta Nogueira (2007)].

Las tecnologías en desarrollo utilizando turbinas a gas, asociadas a gasificadores, presentadas en el próximo capítulo, permitirán elevar la energía generada a niveles superiores a 180 KWh.

Analizando la operación de una planta de azúcar y bioetanol ubicada en el centro-sur brasileño, con una molienda anual de 2 millones de toneladas de caña, sistemas de cogeneración convencionales a 65 bar. y 480° C poseen una capacidad de generación de 31 MW, mientras que, en el caso de sistemas optimizados a 90 bar. y 520° C, esa potencia pasa a ser de 82 MW durante la cosecha [Seabra (2008)]. Al analizar la posibilidad de alcanzar ganancias energéticas significativas gracias al uso de altos parámetros de vapor en los sistemas de cogeneración, debemos considerar la opción de presiones más elevadas, y el hecho de que aumentar la generación de energía eléctrica excedente implica realizar inversiones proporcionalmente más elevadas. La amortización del proceso depende, entre otras variables, de las tarifas, del marco regulador y de las perspectivas de oferta en el sector eléctrico, condiciones esencialmente

externas al negocio de las plantas. No obstante, como señala el caso brasileño, es notable la expansión de la capacidad de generación de las plantas de azúcar [CGEE (2005)].

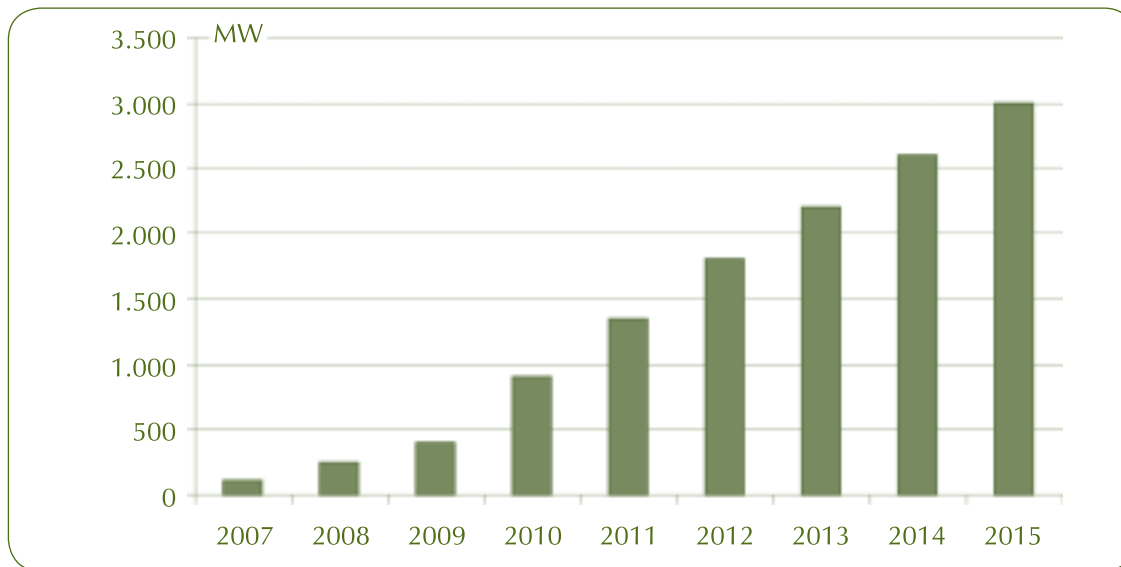
**Tabla 18 – Energía eléctrica y bagazo excedente en sistemas de cogeneración en la agroindustria de la caña**

Parámetros del sistema de cogeneración	Consumo de vapor en el proceso	Período de generación	Uso de la paja	Energía eléctrica excedente	Bagazo excedente
21 bar, 300° C	500 kg/tc	cosecha	no	10,4 kWh/tc	33 kg/tc
42 bar, 400° C	500 kg/tc	cosecha	no	25,4 kWh/tc	50 kg/tc
42 bar, 450° C	500 kg/tc	cosecha	no	28,3 kWh/tc	48 kg/tc
65 bar, 480° C	500 kg/tc	cosecha	no	57,6 kWh/tc	13 kg/tc
65 bar, 480° C	350 kg/tc	cosecha	no	71,6 kWh/tc	0 kg/tc
65 bar, 480° C	500 kg/tc	año todo	50%	139,7 kWh/tc	13 kg/tc
65 bar, 480° C	350 kg/tc	año todo	50%	153,0 kWh/tc	0 kg/tc

Fuente: CGEE (2005).

Según los registros de la Agencia Nacional de Energía Eléctrica (Aneel), en marzo de 2008, la capacidad de generación eléctrica calculada en base al bagazo de caña alcanzaba 3.081 MW, mientras que otros 460 MW estaban siendo procesados o esperaban permiso para ser utilizados [Aneel (2008)]. Considerando los valores de 2006, estas centrales produjeron 8.357 GWh, casi un 2% de la producción brasileña de electricidad [MME (2008)]. Ese dato corresponde únicamente al Estado de São Paulo, responsable por el 60% del total de la producción brasileña de azúcar y bioetanol y cuyas 131 plantas procesaron 264 millones de toneladas de caña en la cosecha 2006/2007, con una capacidad de 1.820 MW, con excedentes de 875 MW, utilizados en la red pública [Silvestrin (2007)]. También, considerando sólo el estado de São Paulo, se prevé una expansión muy importante de la agroindustria de caña en la generación de excedentes de energía eléctrica, como muestra el Gráfico 12. En el caso de Brasil, la capacidad de generación de energía eléctrica para la red pública en base al bagazo podrá alcanzar 15 GW hasta 2015, el 15% de la actual potencia instalada en las centrales eléctricas brasileñas. La intención es que, en las plantas más modernas, los resultados económicos de la producción de bioelectricidad se equiparen a los de la producción de azúcar, incluyendo la producción de bioetanol, azúcar y energía eléctrica [F. O. Licht (2008a)]. Considerando las demandas previstas de bioetanol y las disponibilidades de bagazo relacionadas con su producción, Walter Horta Nogueira (2007) estiman que, en el año 2025, la capacidad de producción podría llegar a 38,4 GW (en el caso de que se utilice el bagazo para la producción de bioetanol por hidrólisis y si las calderas emplean sólo el 60% de la paja disponible) o 74,7 GW (en el caso de que todo el bagazo y el 60% de la paja se usen para producir bioelectricidad).

**Gráfico 12 – Posibilidad de instalación de sistemas de cogeneración en las plantas de azúcar y bioetanol en el Estado de São Paulo, en los próximos años**



Fuente: Silvestrin (2007).

A partir del probable desarrollo de procesos de producción de bioetanol con el bagazo, vale la pena analizar las condiciones de competitividad relativa de esta biomasa; o sea, cabe buscar los caminos de mayor atracción económica. Por eso, se presenta a continuación una evaluación comparativa preliminar del valor económico entre dos productos alternativos del bagazo – la bioelectricidad y el bioetanol por hidrólisis. En el Gráfico 13, el valor económico del bagazo se define por la tarifa de venta de energía eléctrica, considerando los valores de costo unitario de la capacidad de generación eléctrica. De la misma manera, en el Gráfico 14 se estima el valor del bagazo que es utilizado durante la producción de bioetanol por hidrólisis (que será mejor discutida en el próximo capítulo), analizando una productividad de 378 litros de bioetanol por tonelada de bagazo seco. En ese caso, los valores de costo del capital y la operación de la unidad industrial se tomaron de algunos estudios realizados, dependiendo del nivel de madurez tecnológica. Se calcula entre U\$S 0,26 y U\$S 0,13 por litro de bioetanol producido, en el caso de un plazo corto y luego del año 2010, respectivamente [IEA (2005)].

Los Gráficos 13 y 14 nos permiten llegar a una interesante conclusión. El valor del bagazo para la producción de energía eléctrica, teniendo en cuenta las tarifas usuales de energía eléctrica (superior a U\$S 60 por Kwh., en valores del año 2005) y los precios de mercado del bioetanol (alrededor de los U\$S 0,50 por litro), indica que conviene más producir bioelectricidad que bioetanol, por lo menos con los precios actuales de los vectores energéticos. En principio, esta constatación no depende de aspectos estratégicos relacionados a la planificación energética, que refuerzan la importancia de la oferta de electricidad, en el caso brasileño, y de combustibles líquidos, en el caso estadounidense.

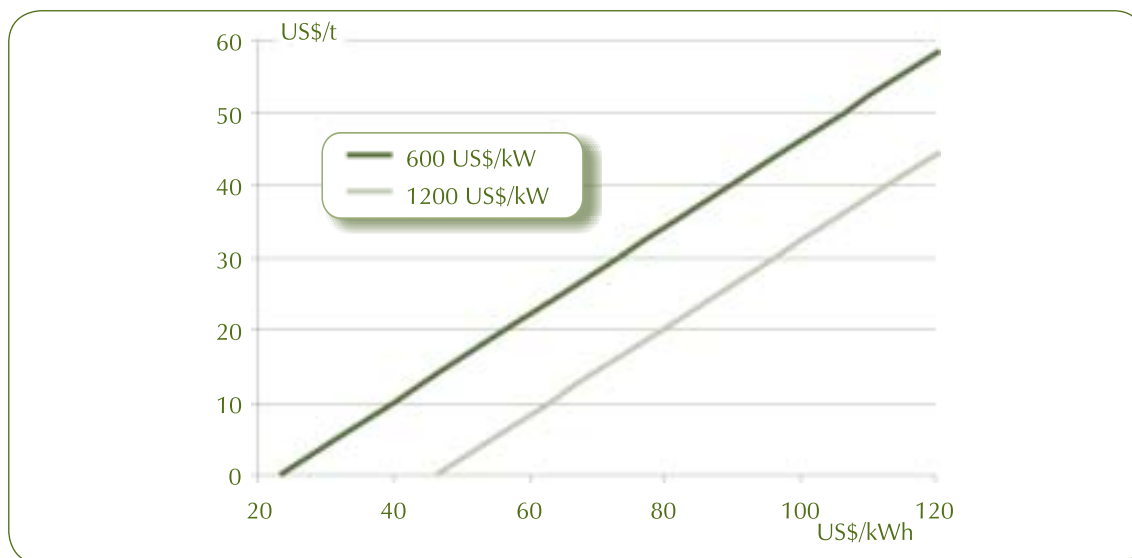
## Evolución de la producción de electricidad en una planta brasileña



Usina Vale do Rosário, del grupo Santelisa Vale.

Un ejemplo representativo de la evolución por la cual vienen pasando las plantas de azúcar y etanol en el Brasil, buscando mayores excedentes de energía eléctrica, es dado por la Usina Vale do Rosário [Heck (2006)]. Localizada en Morro Agudo, São Paulo, esta planta procesa actualmente alrededor de 5 millones de toneladas de caña por cosecha. En 1986, se iniciaron las modificaciones en su sistema energético, que en esa época atendía toda la demanda agroindustrial, pero sin excedentes. La motivación para la introducción de perfeccionamientos fue dada por la existencia de potencial para la producción de más energía eléctrica (gran expansión de vapor directo para atender a la demanda de vapor de escape y excedentes de bagazo) y la postura favorable de la concesionaria (CPFL) para la adquisición de excedentes. En una primera fase, manteniendo las calderas operando a 22 bar e 280° C, se introdujeron turbinas a vapor más eficientes y procedimientos para racionalización del uso de vapor, que permitirían, en la cosecha de 1993, una producción de 4,7 Kwh. excedentes por tonelada de caña procesada y el establecimiento de un contrato de diez años con CPFL para la venta de 4 MW durante la cosecha. En una segunda fase, implementada entre 1995 y 1997, se adquirieron dos calderas nuevas para 44 bar y 430° C y un turbogenerador de 12 MW, que incrementaron la producción de excedentes a 16,5 k.o. por tonelada de caña y justificaron un nuevo contrato con CPFL para la venta de 15 MW a partir de 1998, motivando la construcción de una nueva subestación y una línea de transmisión de 16 Km. en 138 kV. En la fase siguiente, completada en 2001, se instalaron nuevos turbogeneradores, utilizando turbinas de extracción/condensación y que permitieron renovar el contrato con la concesionaria para la entrega de 30 MW. En la última fase, concluida en 2005, se introdujo una caldera produciendo 200 toneladas de vapor por hora, a 65 bar y 515° C, que llevaron la planta a una generación de 65 MW excedentes, correspondientes a 60 Kwh. por tonelada de caña procesada.

**Gráfico 13 – Valor del bagazo utilizado para producir electricidad**

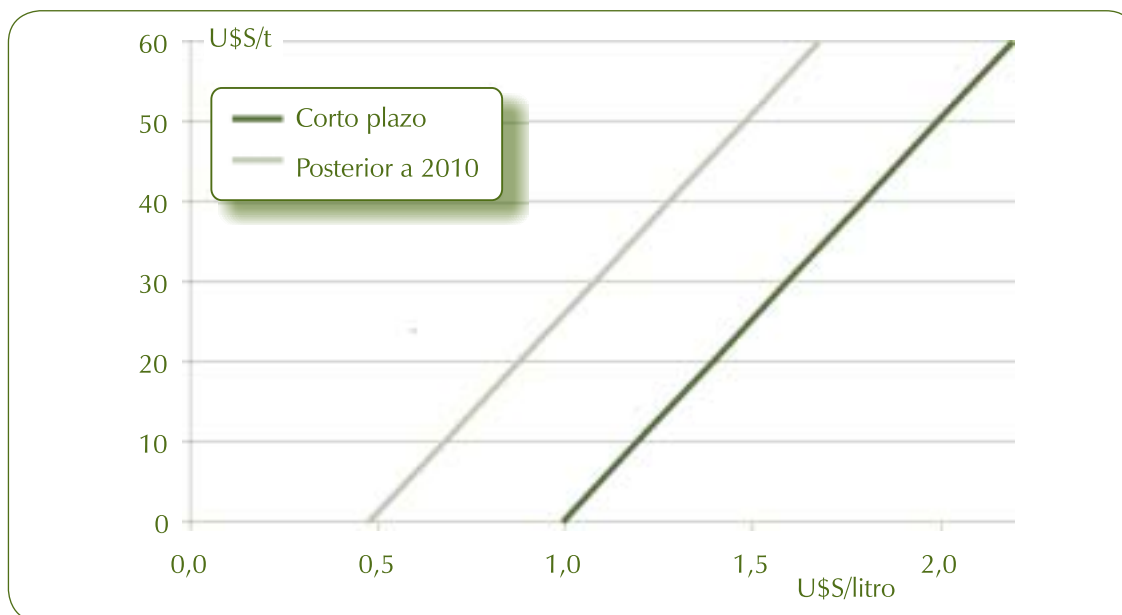


Fuente: Elaboración de Luiz Augusto Horta Nogueira.

El uso del bagazo para la generación de energía eléctrica permite reducir las emisiones de carbono hacia la atmósfera, ya que reemplaza el aceite combustible quemado por las termoeléctricas convencionales, durante la época de la cosecha, que ocurre en los meses de baja hidráulica y menor capacidad de generación hidroeléctrica. En este caso, la reducción de emisiones es del orden de 0,55 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de bagazo utilizado. Esta reducción de emisión de gases de efecto invernadero sirve para obtener créditos de carbono. Los proyectos de este tipo se tiene que acompañar (la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero se debe agregar a aquellas que sucedían cuando no se realizaba esta actividad) con una metodología de línea de base consolidada y aprobada (Método AM0015 – «Cogeneración en base al bagazo interconectado a una red eléctrica») para cuantificación y certificación de esos créditos (reducciones certificadas de emisiones, RCEs), en los términos del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), como quedó establecido por lo Protocolo de Kyoto.

En el caso brasileño, la responsabilidad por la conformidad y el seguimiento de los proyectos de MDL es de la Comisión Interministerial de Cambio Climático Global (CIMGC), vinculada al Ministerio de Ciencia y Tecnología. Hasta marzo de 2008 existían 24 proyectos brasileños de cogeneración con bagazo de caña registrados en la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC), correspondiendo a una reducción total de 461 mil toneladas en las emisiones anuales de CO<sub>2</sub>. Los factores de emisión adoptados dependen de la región donde los proyectos se localizan, valiendo 0,136 y 0,2826 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente por Kwh. generado, respectivamente, en el Nordeste y en el Centro-Sur, en el período de 2004 a 2006 [MCT (2008) y Ecoinvest (2008)].

**Gráfico 14 – Valor del bagazo utilizado para la producción de etanol**



Fuente: Elaboración de Luiz Augusto Hosta Nogueira.

Para finalizar la discusión sobre la bioelectricidad como un coproducto relevante de la agroindustria de caña, vale la pena comentar el potencial del desarrollo tecnológico en este campo. En el capítulo siguiente se abordará, más detalladamente, el proceso de gasificación del bagazo, que podrá incrementar de modo significativo la generación de energía eléctrica, con expectativas de producción superiores a 180 Kwh. por tonelada de caña procesada. Otro proceso que motivó nuevos estudios para la producción de bioelectricidad es la biodigestión de la vinaza, que, sin reducir su potencial fertilizante, podrá proporcionar excedentes adicionales de energía eléctrica en las plantas de bioetanol. Se estima que la vinaza resultante de la producción de un metro cúbico de bioetanol, tratada en forma anaeróbica (en la ausencia de oxígeno), produce 115 metros cúbicos de biogás, capaces de generar, a su vez, 169 Kwh. de bioelectricidad, habiendo descontado los consumos del proceso [Lamonica (2006)]. No obstante, los elevados costos asociados a la biodigestión de la vinaza aún limitan el interés en este proceso.

En una evaluación de las posibilidades futuras de la conversión energética en la agroindustria de la caña, analizando diferentes productos y posibilidades tecnológicas, disponibles en los próximos 20 años, Macedo (2007) estima que se podría rescatar hasta un 59% del contenido energético total de la caña, como biocombustible y bioelectricidad, un rendimiento bastante superior al actual 38%. En el caso específico de la energía eléctrica, analizando la explotación de los límites termodinámicos de la producción de energía eléctrica a base de la caña, en escenarios tecnológicos más avanzados, Lora et al. (2006) consideraron diferentes alternativas

complementarias y asociadas a dos escenarios básicos: aumento de la producción de combustibles y aumento de la generación de bioelectricidad. En este sentido, con la utilización de tecnologías aún en desarrollo o reducida difusión, como el caso de los gasificadores de bagazo asociados a turbinas a gas, biodigestores de vinaza y células de combustible que utilizan bioetanol reformado, sería posible alcanzar más que 510 Kwh. de energía eléctrica por tonelada de caña procesada. Vale la pena observar que este potencial representa, efectivamente, apenas un 25% del potencial energético de la caña, considerando la energía disponible en el azúcar y en la fibra, del orden de 7.200 MJ por tonelada de caña. En otras palabras, el límite superior de la producción de energía eléctrica basado en la caña es decenas de veces superior a la generación media actualmente observada en las plantas brasileñas, que recién ahora se ha comenzado a desarrollar.

### **4.3 Otros coproductos del bioetanol de caña de azúcar**

Así como sucede con el maíz, que da origen a una amplia gama de productos, la caña de azúcar permite producir mucho más que bioetanol, azúcar y electricidad. Entre todos los coproductos tradicionales de la caña se podrían citar la melaza, el aguardiente, el bagazo, la levadura, la torta de filtro y la vinaza. Y la lista de nuevos productos que podemos mencionar incluye desde realzadores de sabor para la industria de alimentos hasta plástico para embalajes. Un minucioso estudio publicado en Brasil, en el año 2005, menciona más de 60 tecnologías que emplean la caña de azúcar como materia prima en distintos sectores industriales [IEL/Sebrae (2005)], que fue la principal fuente de informaciones para esta sección. Al inicio se presentan breves comentarios sobre los productos tradicionales y, a continuación, se comentan los productos innovadores, gran parte de éstos relacionados a la industria de alimentos. Los productos que aún se encuentran en desarrollo se comentarán en el próximo capítulo.

La melaza – miel pobre o miel residual de la fabricación de azúcar – es muy usada para la producción de bioetanol en las destilerías encontradas en las plantas, pero también se la puede utilizar para la alimentación animal o para el cultivo de hongos y bacterias, pasando por otros procesos de fermentación dirigidos a la fabricación de productos químicos y farmacéuticos, así como a la producción del fermento biológico bastante empleado en la panificación. La levadura es el extracto seco obtenido mediante tres procesos alternativos: el secado del caldo de la levadura, del fondo de cuba o también de la vinaza, constituyendo un suplemento proteico de bajo costo, empleado como ingrediente del alimento balanceado animal y en la industria de alimentos. Se estima que, por cada litro de bioetanol se producen entre 15 y 30 gramos de levadura seca [Leal (2008) y Pesquisa Fapesp (Investigación Fapesp) (2002)].

El bagazo sirve, principalmente, como combustible, además de constituirse en una fuente importante de celulosa para las industrias de papel y cartón. En São Paulo, el bagazo se comercializa mucho gracias a su capacidad energética y también se usa regularmente en industrias cerámicas y en el procesamiento de la naranja, entre otras. Tal vez se pueda investigar el bagazo para intentar mejorar su digestibilidad e incorporarle fuentes de nitrógeno para usarlo en la

alimentación bovina. La vinaza y la torta de filtro poseen un gran valor como fertilizantes y son muy utilizados en la agroindustria, que absorbe toda la disponibilidad de estos productos en la reforma y mantenimiento de la fertilidad de los cañaverales.

Generalmente, el gas carbónico producido en las cubas de fermentación se lava para recuperar el bioetanol arrastrado y liberado en la atmósfera. También se lo puede purificar, desodorizar, licuar y almacenar bajo presión para otros fines, como pueden ser la producción de gaseosas y de hielo seco, la fabricación de bicarbonato de sodio y el tratamiento de efluentes. Del balance de masa en la fermentación, se concluye que, en la fabricación de mil litros de bioetanol anhidro se producen hasta 760 kg de gas carbónico. Algunas plantas brasileñas de bioetanol han implementado unidades de beneficiamiento de gas carbónico, como la *Planta JB Açúcar e Álcool*, en Vitória de Santo Antão, en Pernambuco, que durante la cosecha produce 528 toneladas mensuales de gas carbónico para uso alimentario [Carbogás (2008)].

Si por un lado, los productos tradicionales antes mencionados son capaces de agregar valor en forma limitada a la producción de bioetanol (tanto que se los denomina subproductos), por otro, los productos innovadores representan el resultado de la incorporación de tecnologías de mayor complejidad, con un mejor resultado económico, y que suponen siempre una etapa más de procesamiento, como sucede en la producción de ácidos y aminoácidos a través de la fermentación. La Tabla 19 ofrece una visión general de los nuevos productos de la caña de azúcar, algunos ya se comercializan y otros aún no (modificado de IEL/Sebrae, 2005). Este mercado presenta buenas perspectivas porque, entre otras razones, está formado por productos que son menos agresivos para el medio ambiente y, en algunos casos, se aplican en sectores económicamente importantes.

En Brasil, el ácido cítrico es producido hace décadas, a través del proceso de fermentación, utilizando plantaciones del hongo *Aspergillus niger* en substrato de melaza disuelto en agua. Este ácido es un insumo usado para la preservación de alimentos y como saborizante. Sirve también para la limpieza de equipos industriales y la fabricación de detergentes y otros productos de higiene y limpieza. Las dificultades económicas para su producción tienen que ver con el mantenimiento de cepas productivas y un control riguroso de las condiciones del ambiente.

Entre los aminoácidos que se producen a través de la fermentación de azúcares se destaca la lisina, cuyo mercado principal, además de las aplicaciones farmacéuticas, es la fabricación de alimento para aves y porcinos, que está creciendo bastante. Se considera que este aminoácido es esencial para los animales que, así como los seres humanos, no tienen las vías enzimáticas para sintetizarlo, requiriendo un suplemento alimenticio. Además, gran parte del alimento animal está compuesto por carbohidratos vegetales y no posee suficiente lisina asimilable, por eso es importante agregarla. De ahí la importancia de la lisina, cuyas importaciones brasileñas en los últimos años fueron del orden de 10 mil toneladas por año.

**Tabla 19 – Nuevos productos de la agroindustria de la caña de azúcar**

Familia	Materia prima	Productos
<i>Biotechnológicos</i> : materiales producidos en base a las funciones biológicas de organismos vivos	Melaza	a) Ácido cítrico b) Aminoácidos: lisina c) Defensivos agrícolas: regulador de crecimiento o fitorreguladores (ácido indolacético, ácido jasmónico), plaguicida (biofungicida, controlador biológico, insecticida biológico, plaguicida biológico) d) Fijador de nitrógeno e) Inóculo para silaje
<i>Químicos</i> : productos resultantes de reacciones químicas efectuadas con o sin la presencia de un elemento catalizador	Melaza, bagazo y vinaza	a) Insumos industriales (dextrana técnica, gluconato de calcio, manitol, sorbitol y tensoativos biodegradables) b) Furfural (licor de xilosa, furfural, alcohol furfúrico, compuestos furano epoxi, preservante de madera, resinas de fundición) c) Plásticos (PHB y PHB/hl, PHA mcl/PHB hpe). d) Insumos para la industria de papel y pulpa (medio para corrugar, pastas quimtermomecánicas, medios filtrantes) e) Vinaza concentrada
<i>Fármacos veterinarios</i> : sustancias químicas, biológicas, biotecnológicas o de preparación manufacturera, directamente administradas o mezcladas a los alimentos, destinadas a prevenir y tratar las enfermedades de los animales	Melaza y bagazo	a) Preparado antidiarreico b) Complejo hierro-dextrana c) Probiótico
<i>Alimentos</i>	Melaza, bagazo y vinaza	a) Derivados de la levadura, fructosa y glucosa b) Frutooligosacarídeos c) Jarabes invertidos por vía enzimática d) Setas comestibles de la especie <i>Pleurotus ostreatus</i> .
<i>Biológicos</i>	Bagazo	a) Compuesto fertilizante
<i>Estructurales</i> : materiales cuyas propiedades los vuelven utilizables en estructuras, máquinas o productos consumibles	Bagazo	a) Aglomerados de bagazo/cemento b) Aglomerados MDF

Fuente: Modificado de IEL/Sebrae (2005).

Vale la pena observar las maneras como la agroindustria de la caña se ha diversificado en Brasil, en un ambiente de mayor complejidad tecnológica y generación de valor, en el cual la implementación de procesos dirigidos a nuevos productos de la caña de azúcar se bifurca en dos vertientes. En la primera, la industria sucroalcoholera intenta diversificar su línea de productos, como ocurrió con el grupo Zillo Lorenzetti al fundar, al final del año 2003, Biorigin, una empresa de biotecnología especializada en la producción de ingredientes naturales para la industria de alimentación humana y animal. O como sucede con todas las empresas que han implementado procesos de secado de levadura para su comercialización, por ejemplo, en las plantas Santa Adélia, São Martinho, Santo Antônio, São Francisco, Viralcool, Planta Andrade, São Carlos, Galo Bravo, Cresciumal, Santa Cruz OP, Jardest, São José da Estiva, Cerradinho, Equipav, Nova América, Pitangueira y Bonfim [IEL/Sebrae (2005)]. Aproximadamente, un 50% de la levadura producida se destina al mercado interno, en el cual se la utiliza en la alimentación de aves (casi un 50%) y porcinos (un 30%). El otro 50% de la producción total se exporta, en su mayor parte (un 80%) a países del Sudeste Asiático, donde la levadura se usa para alimentar peces y gambas. Considerando un precio de referencia de U\$S 12,5 por kg de levadura seca [IEL/Sebrae (2005)], la producción de levadura permite obtener entre U\$S 187 y U\$S 375 por cada mil litros de bioetanol producido, un resultado muy importante en términos del rendimiento económico del proceso agroindustrial.

En la segunda vertiente del desarrollo de este segmento aparecen otros sectores industriales, como el alimenticio y el químico, que vienen incorporado de forma creciente materias primas asociadas a la caña. En este sentido, la empresa Alltech, una multinacional del ramo de los alimentos para animales, instaló en el año 2005, junto con la Planta Vale do Ivaí, en Paraná, una unidad de producción de levadura con capacidad para 50 mil toneladas anuales, la cual destina el 80% de la producción al mercado externo [JornalCana (2005)]. Este también es el caso de las empresas Ajinomoto, de Japón, y Cheil Jedang, de Corea del Sur, que instalaron en Brasil unidades dirigidas a la producción de lisina, aprovechando la tecnología y el bajo costo del azúcar, materia prima que pasa a reemplazar al maíz y la soja, utilizados en otros países. Juntas, las dos nuevas fábricas pasarán a producir 180 mil toneladas por año. Las ventajas económicas son importantes: transformada en lisina, la bolsa de 50 kilos vale U\$S 50, o sea, cerca de siete veces más que el propio azúcar [Inovação Unicamp (2008)]. Debemos recordar la gran integración entre la agroindustria de la caña y la producción de alimentos proporcionada por estas industrias.

Podemos concluir que, los nuevos productos exigen inversiones menores a las que son necesarias en una planta de bioetanol. Probablemente, el mayor reto para lograr una adecuada promoción y difusión de estos procesos sea el dominio de las tecnologías involucradas, que presuponen la aplicación del conocimiento de la biotecnología moderna y de todo el aparato de instrumentación y control que ésta comprende.