



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA EN ENERGÍA – PROCESOS Y USO EFICIENTE DE LA  
ENERGÍA

**CONSUMO Y ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS DE LA  
INDUSTRIA AZUCARERA MEXICANA**

**TESIS**  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

PRESENTA:  
**JOSÉ CARLOS ROJAS CÁRDENAS**

TUTOR PRINCIPAL  
**CLAUDIA SHEINBAUM PARDO**  
INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE DE 2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Dra. Cecilia Martín Del Campo Márquez

**Secretario:** Dra. Claudia Sheinbaum Pardo

**1er. Vocal:** Dr. Arturo Guillermo Reinking Cejudo

**2do. Vocal:** Dr. Pablo Álvarez Watkins

**3er. Vocal:** Dra. M. Azucena Escobedo Izquierdo

Lugar donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería, UNAM.

**Tutor de tesis:**

Dra. Claudia Sheinbaum Pardo

-----  
Firma

## Contenido

Lista de figuras .....	ii
Lista de tablas .....	v
Lista de acrónimos y abreviaturas .....	vii
Introducción.....	1
<b>CAPÍTULO I. LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MÉXICO.....</b>	<b>2</b>
<b>I.1 HISTORIA DEL SECTOR AZUCARERO EN MÉXICO .....</b>	<b>2</b>
I.1.1 Producción de azúcar en la Nueva España .....	2
I.1.2 Producción de azúcar en el siglo XIX (1821 – 1880).....	6
I.1.3 Desarrollo de la industria azucarera durante el Porfiriato .....	9
I.1.4 Reorganización y desarrollo de la industria azucarera hasta la actualidad .....	11
<b>I.2 CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS DEL SECTOR .....</b>	<b>16</b>
I.2.1 Figura de propiedad .....	16
I.2.2 Producto interno bruto del sector azucarero .....	18
I.2.3 Producción nacional.....	20
I.2.4 Mercado mundial del azúcar: panorama actual .....	24
I.2.5 Comercio de azúcar y fructosa en México.....	27
I.2.6 Comportamiento del precio del azúcar en México y el mundo .....	30
<b>I.3 ESTRUCTURA EMPRESARIAL Y MARCO NORMATIVO DEL SECTOR..</b>	<b>32</b>
I.3.1 Organizaciones de la industria azucarera.....	32
I.3.2 Política pública y marco normativo .....	34
<b>CAPÍTULO II. PROCESO DE PRODUCCIÓN Y NECESIDADES ENERGÉTICAS DEL MISMO.....</b>	<b>37</b>
<b>II.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN DEL AZÚCAR .</b>	<b>37</b>
II.1.1 Labores del campo.....	38
II.1.2 Extracción del jugo.....	38
II.1.3 Clarificación .....	39
II.1.4 Evaporación .....	40
II.1.5 Cristalización.....	40
II.1.6 Centrifugación .....	40
II.1.7 Secado, enfriado y envase .....	41
II.1.8 Refinación del azúcar .....	41

II.2 CONSUMO Y SUMINISTRO DE LA ENERGÍA EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN .....	42
II.2.1 Características generales.....	42
II.2.2. Esquema típico de cogeneración en la industria azucarera .....	45
II.2.3 Esquema de cogeneración alternativo .....	46
CAPÍTULO III. CONSUMO DE ENERGÍA DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MÉXICO .....	49
III.1 BALANCE GLOBAL DE ENERGÍA.....	49
III.1.1 Situación de la elaboración de azúcares dentro del sector industrial .....	49
III.1.2 Consumo final de energía de la industria azucarera. Zafras 2002/03 a 2011/12.....	51
III.2 INTENSIDADES ENERGÉTICAS EN LA INDUSTRIA AZUCARERA.....	53
III.3 COMPARACIÓN INTERNACIONAL .....	56
CAPÍTULO IV. ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS PARA EL SECTOR AZUCARERO.....	59
IV.1 SECADO DEL BAGAZO PREVIO A LA COMBUSTIÓN.....	59
IV.2 POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EXCEDENTE.....	66
IV.3 POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL .....	73
IV.3.1 Características generales .....	73
IV.3.2 Bioetanol a partir de las mieles finales .....	76
IV.3.3 Bioetanol a partir de las mieles intermedias y finales.....	77
IV.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS ALTERNATIVAS .....	81
IV.4.1 Electricidad excedente .....	81
IV.4.2 Bioetanol .....	87
Conclusiones.....	96
Referencias .....	98

## Lista de figuras

1. PIB de la industria azucarera, serie de 1960 a 2011, a pesos constantes de 1993.
2. Gráfico de la relación entre el PIB de la industria azucarera y el PIB total, el de la Industria Manufacturera y el del sector de Alimentos, Bebidas y Tabaco.
3. Producción nacional de azúcar. Comparación de datos del INEGI y la CNIAA.
4. Línea del tiempo, producción nacional total de azúcar de la zafra 1910/11 a la 2012/13.
5. Producción nacional de azúcares y de alcohol. Zafras 1996/97 a 2011/12.
6. Primeros veinte países productores de azúcar en el ciclo 2011/12.
7. Principales países consumidores de azúcar en el ciclo 2011/12.
8. Mayores importadores de azúcar durante el ciclo 2011/12.
9. Principales exportadores de azúcar en el ciclo 2011/12.
10. Evolución de la importación de fructosa del ciclo 1995/96 al 2011/12.
11. Relación entre el consumo de fructosa y de azúcar en México a partir de la apertura a la importación de fructosa Periodo de 2006/07 a 2011/12.
12. Mercado del azúcar en México de 1995/96 a 2011/12.
13. Precios del azúcar en México, a pesos constantes de 2010, del ciclo 2000/01 al 2012/13.
14. Precios corrientes del azúcar estándar en México y en el mundo. Zafras 2000/01 a la 2012/13.
15. Diagrama de producción de azúcar estándar.
16. Esquema de cogeneración tradicional de un ingenio azucarero.
17. Sistema de cogeneración para ingenio productor de azúcar, bioetanol y electricidad excedente.
18. Evolución del consumo energético total de las cinco principales ramas industriales en México. 2001 – 2011.
19. Evolución del consumo energético de la industria azucarera. Periodo: zafras 2002/03 a 2011/12.  
Fuente: elaboración propia, con datos de la UNC.
20. Generación de electricidad, consumo a CFE y consumo total de electricidad del sector azucarero. Zafras 2002/03 y 2011/12.
21. Intensidad energética total y por energético.

22. Intensidades energéticas de la industria azucarera en México, Brasil y las Islas Mauricio.
23. Esquema del secador de bagazo.
24. Diagrama Temperatura-Entropía de un ciclo termodinámico Rankine.
25. Diagrama de proceso de cristalización del azúcar con derivación de mieles B y C hacia destilación.
26. Relación entre la producción Etanol-Azúcar en un ingenio elaborador de ambos productos.

## Lista de tablas

1. Ingenios Independientes participantes en la zafra 2011/2012
2. Grupos industriales propietarios de ingenios participantes en la zafra 2011/12.
3. Disposiciones jurídicas Mexicanas para la agroindustria azucarera.
4. Consumo teórico de energía en cada etapa del procesamiento de una tonelada de caña.
5. Energía eléctrica excedente en sistemas de cogeneración de la industria azucarera.
6. Clasificación de ingenios azucareros mexicanos según la variedad de productos elaborados, porcentaje aportado a la producción nacional de azúcar e intensidades energéticas promedio por grupo. Zafras 2002/03 y 2011/12.
7. Clasificación de los ingenios mexicanos según la presión de generación de vapor, zafra 2011/12.
8. Composición másica y molar de 100kg de bagazo seco.
9. Composición final de los gases de combustión de la caldera.
10. Potencial energético de la operación de secado de bagazo.
11. Consideraciones técnicas para el cálculo de la capacidad de generación eléctrica excedente.
12. Potencial técnicamente factible de generación eléctrica excedente en zafra.
13. Potencial técnicamente factible de generación eléctrica fuera de zafra.
14. Potencial técnicamente factible de generación de electricidad durante y fuera de zafra.
15. Rendimiento de la producción de alcohol a partir de las melazas en México.
16. Potencial de producción de bioetanol en la industria azucarera.
17. Marco regulatorio aplicable a la generación y comercialización de energía eléctrica en Ingenios Azucareros.
18. Datos típicos de operación considerados para la evaluación económica de electricidad excedente.
19. Información técnica y de costos para los esquemas de cogeneración propuestos.
20. Información para la evaluación económica y sobre los precios de venta de electricidad considerados.

21. Balance financiero anualizado y resultados de la evaluación económica para los diferentes escenarios de producción y venta de electricidad.
22. Ingenios azucareros permisionarios de generación eléctrica, al 31 de Marzo de 2014.
23. Datos típicos de operación considerados para la evaluación económica de bioetanol.
24. Capacidad de destilación a instalar según el tipo de ingenio y el modelo de producción elegido.
25. Información utilizada para la evaluación económica de la producción de bioetanol.
26. Balance financiero anualizado y resultados de la evaluación económica para los diferentes escenarios de producción de bioetanol.
27. Permisos otorgados por la SENER para la producción/comercialización de etanol anhidro.

## Lista de acrónimos y abreviaturas

- ANEA: Asociación Nacional de Empresas Azucareras, A.C.
- ATAM: Asociación de Técnicos Azucareros de México, A.C.
- bdp: billones de pesos.
- BNE: Balance Nacional de Energía.
- CEF: Comisión de Estudios de Finanzas Públicas de la Cámara de Diputados.
- CNC: Confederación Nacional Campesina.
- CNIAA: Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohólica.
- CNPR: Confederación Nacional de Propietarios Rurales, A.C.
- CONADESUCA: Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar
- CROM: Confederación Regional Obrera Mexicana.
- DOF: Diario Oficial de la Federación.
- EEUU: Estados Unidos de América.
- FEESA: Fondo de Empresas Expropiadas del Sector Azucarero.
- FINASA: Financiera Nacional Azucarera, S.A.
- GEI: Gases de Efecto Invernadero.
- GJ: Gigajoules.
- IEat: Intensidad Energética por tonelada de Azúcar Total producida.
- IEPS: Impuesto Especial a Productos y Servicios.
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- JMAF: Jarabe de Maíz de Alta Fructosa.
- JMRF: Jarabe de Maíz Rico en Fructosa.
- KARBE: kilogramos de azúcar recuperable base estándar.
- LAASSP: Ley de Adquisiciones, Arrendamientos, y Servicios del Sector Público.
- LDRS: Ley de Desarrollo Rural Sustentable.
- LDSCA: Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar.
- LFEP: Ley Federal de las Entidades Paraestatales
- LSPEE: Ley del Servicio Público de la Energía Eléctrica.
- mbd: miles de barriles al día.
- mdl: millones de litros.
- mdp: millones de pesos.
- mmdl: miles de millones de litros.

mmdp: miles de millones de pesos.

ONISA: Operadora Nacional de Ingenios.

PIB: Producto Interno Bruto.

PROASA: Promotora Azucarera, S.A. de C.V.

SAGARPA: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación

SCIAN: Sistema de Clasificación de Industrias de América del Norte.

SECOFI: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial

SENER: Secretaría de Energía.

STIASRM: Sindicato de Trabajadores de la Industria Azucarera y Similares de la República Mexicana.

TLCAN: Tratado de Libre Comercio de América del Norte.

UNC: Unión Nacional de Cañeros.

UNPASA: Unión Nacional de Productores de Azúcar, S.A.

USDA: Departamento de Agricultura de EEUU.

## Introducción

Hoy en día la industria de la transformación de la caña de azúcar a nivel mundial ha diversificado sus actividades, además de producir y comercializar azúcar de diferentes variedades también elabora etanol anhidro (bioetanol) para su uso en el sector transporte y genera energía eléctrica sobrante que es inyectada a la red. Países como Brasil, las Islas Mauricio y Estados Unidos destacan en el panorama internacional.

A pesar de que México es un importante productor y consumidor del endulzante, no existe un desarrollo notable de la producción de bioetanol y la generación eléctrica con bagazo es sumamente ineficiente. Algunos antecedentes de estudios del potencial de esta rama industrial en el país, son los estudios: “Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México” realizado en 2006 [SENER-GTZ, 2006], y el “Estudio sobre Cogeneración en el sector industrial en México” elaborado en el 2009 [CONUEE, 2009]. Sin embargo no hay estudios que analicen de forma histórica e integral, el consumo de energía de esta rama industrial.

El objetivo de la presente tesis es analizar el consumo de energía de la industria azucarera mexicana, así como de las posibles alternativas. Para ello el trabajo se divide en cuatro capítulos. En el primero se estudia el contexto histórico, económico y estructural del sector azucarero; en el segundo capítulo se describe de manera breve el proceso de transformación y sus necesidades energéticas. El tercer apartado presenta un análisis global del consumo de energía de la industria azucarera mexicana y sus intensidades energéticas y en el último, se proponen varias alternativas de desarrollo para esta rama industrial.

## **CAPÍTULO I. LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MÉXICO**

En este capítulo se presenta una reseña histórica de la industria del azúcar en México, su importancia económica y organización empresarial así como el marco normativo en el que se desenvuelve, que da contexto a la tendencia histórica del consumo de energía y las circunstancias para avanzar en un uso más eficiente.

### **I.1 HISTORIA DEL SECTOR AZUCARERO EN MÉXICO**

#### **I.1.1 Producción de azúcar en la Nueva España**

##### ***I.1.1.1 Etapas***

La primera plantación de caña de azúcar en México la estableció Hernán Cortés en 1522, en San Andrés Tuxtla, Veracruz [Banco de México, 1952]. Posteriormente se llevó la caña a Coyoacán, donde no floreció, y a regiones más bajas (Morelos y parte de Guerrero) donde existen buenas condiciones para su cultivo, y poco a poco la caña de azúcar se cultivó en prácticamente todo el país, a excepción de regiones desérticas y mesetas. El hecho de que en México existieran otras actividades económicas importantes como la minería y la explotación de la madera influyó en que la actividad agroindustrial del azúcar de caña no se desarrollara tan rápidamente como en otras regiones del caribe [Banco de México, 1952].

Las llamadas haciendas azucareras surgieron a partir del otorgamiento de tierras a los protagonistas de la conquista y después de expandirse y consolidarse se convirtieron en una parte importante de la economía colonial. Hasta 1630 esta actividad representó un gran negocio debido a la demanda de dulce de la población, a las exportaciones y a que este producto no tenía control de precios por el estado al no considerarlo de primera necesidad, a diferencia del maíz y el trigo, por ejemplo. La situación de la industria era inmejorable ya que contaba con tierras, licencias, mano de obra indígena y negra y

posibilidad de exportación. A finales del siglo XVI existían 60 ingenios y trapiches<sup>1</sup>, que producían entre 3,000 y 5,000 toneladas anuales de azúcar [Banco de México, 1952]. Las principales zonas productoras eran las de Morelos, Michoacán y Veracruz, siendo Morelos el centro por excelencia de la producción azucarera colonial. Oaxaca, Jalisco, Colima, Nayarit, la zona Huasteca, Guerrero, Chiapas y el sur de Puebla tenían producción en varias escalas, desde grandes ingenios hasta trapiches locales. En pequeña escala el cultivo era generalizado [Banco de México, 1952].

Sin embargo durante toda su historia la agroindustria azucarera mexicana ha experimentado una serie de altibajos, el primero se dio en el año de 1599 cuando se frena esta actividad por orden directa de la Corona con la siguiente justificación: “...debido al abuso que la gente en común va haciendo de los azúcares para golosinas y bebidas...” [Banco de México, 1952]. El virrey en turno, el Conde de Monterrey, prohíbe utilizar indios de repartimiento<sup>2</sup> en los ingenios (ya sólo trabajarían ahí voluntariamente), la fundación de nuevos ingenios y la extensión del cultivo de caña. Después, en 1631, se prohíbe el comercio entre Perú y España, cerrando el paso a la exportación de azúcar. Las restricciones permanecieron vigentes hasta la Real Orden de 1796, aunque surtieron poco efecto ya que durante este lapso fue cuando en realidad se consolida la producción azucarera colonial para el abastecimiento interno, otorgándose más de 55 licencias para la instalación de ingenios y trapiches, autorizadas directamente por el Virreinato [Banco de México, 1952]. Las razones para intentar detener el crecimiento, por parte del Imperio, de lo que prometía ser una próspera industria colonial, obedecieron más bien a intereses proteccionistas ya que el objetivo primordial de la política económica del Imperio era el beneficio de España y se tomó la decisión desde la Corona para que en la Nueva España se produjera plata a como diera lugar, mientras que Cuba, Puerto Rico y Santo Domingo proveerían del azúcar necesario para España y para competir en el mercado mundial. El crecimiento de la industria azucarera en la Nueva España fue constante hasta la década de 1750 cuando se presentó una desaceleración debido a varios factores: un aumento de la oferta respecto a la demanda,

---

<sup>1</sup> Trapiche: molino que se utilizaba empleando a animales de carga como fuerza motriz para la extracción del jugo de la caña de azúcar.

<sup>2</sup> Repartimiento de indios: sistema laboral de adjudicación de mano de obra indígena para los miembros de la casta de españoles aplicado en la Nueva España desde finales del siglo XVI y hasta principios del XIX.

el incremento de precio de los insumos, la difícil obtención de mano de obra y las bajas del precio del azúcar [Landázuri y Vázquez, 1988].

En la segunda mitad del siglo XVIII y hasta 1821 la economía novohispana tiene un vigoroso crecimiento debido principalmente a las reformas impulsadas por los monarcas Borbones (desarrollo de la agricultura de exportación y de la manufactura) y al crecimiento demográfico, que representó un aumento en la demanda interna. En junio de 1796 se levantan las restricciones a la industria azucarera y además se expide una ley de fomento a la producción de azúcar, así es como la Nueva España vuelve a exportar este producto [Landázuri y Vázquez, 1988].

Para ese entonces las haciendas azucareras se habían convertido en grandes unidades socioeconómicas que albergaban a indios, esclavos, señores, molinos, calderas y capillas, por lo que requerían de gran inversión de capital. Con la llegada de apoyos a la agricultura el sector azucarero entra en un periodo de florecimiento, muchos ingenios renovaron sus instalaciones y sustituyeron la tracción animal por la hidráulica, abaratando costos y expandiendo sus propiedades para controlar las corrientes de agua. Las inversiones mencionadas se tradujeron en un incremento en el valor de las haciendas, pero de la misma manera en que llegó el capital se introdujo el sistema de crédito en la agricultura, impulsado por los comerciantes favorecidos por el régimen borbónico y por la Iglesia. La industria azucarera se vinculó rápidamente debido a la necesidad de grandes inversiones, los hacendados realizaban convenios de avío en los que se les adelantaba capital para la producción a cambio de la producción misma, que el comerciante se encargaba de vender. También los comerciantes otorgaban crédito utilizando el concepto de hipoteca sobre el inmueble, si el hacendado no cubría sus deudas, se le pagaba a los acreedores con el remate de la propiedad. No pasó mucho tiempo para que los comerciantes se apoderaran de las haciendas mediante el remate y embargo de las mismas ya que era difícil que los hacendados lograran pagar las deudas, entre los estudiosos de la historia de la Nueva España se tiene la duda de si en el siglo XVIII era lucrativo el negocio del azúcar ya que se reporta que el rendimiento de las inversiones en agricultura no superaba el 6%, cuando los créditos se otorgaban a un 5% anual [Landázuri y Vázquez, 1988]. Ante esta situación los empresarios azucareros recurrieron también al arrendamiento de sus tierras para proveerse de recursos, hecho que eventualmente les traería problemas con la propiedad.

### ***1.1.1.2 Proceso de producción en las haciendas del siglo XVIII***

Dentro de las haciendas azucareras se realizaba tanto la actividad agrícola como la transformación industrial, a grandes rasgos el procedimiento agroindustrial completo de producción de azúcar de caña del siglo XVIII es muy parecido al que se realiza hoy en día; este iniciaba preparando el terreno para el cultivo de la caña, mediante la quema, el barbecho y el surcado de las tierras. Una vez preparado el terreno se sembraba la caña, eligiendo el tipo en función del suelo y el clima del lugar. Después le seguían el riego, crecimiento, cuidados y corte (o zafra) de la planta. La edad a la que se debía cortar la caña de azúcar varió a lo largo del periodo colonial, no era raro en los siglos XVI y XVII tener zafra a los 18 y 22 meses. Para esta época la caña “criolla” se cortaba entre los 12 y los 15 meses [Landázuri y Vázquez, 1988].

La manufactura del azúcar, o el proceso industrial de transformación, comienza con la molienda de la caña, actividad que tiene que realizarse lo más pronto posible después del corte para evitar pérdidas significativas de jugo. En las haciendas se solía amontonar la caña en el campo y de ahí se empleaban carretas tiradas por bueyes para transportarla a los trapiches (grandes estructuras de engranes fabricados con maderas duras que sostenían los rodillos que trituraban la caña), cuya capacidad de molienda era limitada así que se procedía moliendo poco y a ritmo constante. Las ruedas del trapiche se hacían girar ya sea por animales de tiro o mediante fuerza hidráulica y entre dos o cuatro trabajadores pasaban varias veces la caña por los rodillos del molino hasta que dejara de escurrir jugo, el cual se canalizaba a la casa de calderas para el hervido y el bagazo (fibra sobrante después de extraer el jugo a la caña) se secaba al sol para después ser utilizado como combustible en los hornos [Landázuri y Vázquez, 1988].

Las calderas eran ollas de cobre dispuestas en hilera y conectadas entre sí para permitir el paso del jugo. En la primera caldera (la más grande) comenzaba la cocción, y conforme pasaba el jugo por las demás se evaporaba el agua, se filtraba y eliminaban impurezas, las cuales eran removidas manualmente junto con la espuma que se acumulaba en la superficie. El hervido final se realizaba en los tachos, en los que se determinaba cuándo la ahora meladura había llegado al punto de azúcar para en ese instante detener el hervido con la certeza de que al enfriarse se formarían cristales.

Al tomar esta decisión el producto pasaba al tacho de resfrío (un enfriador también de cobre) y se comenzaban a llenar las formas, que eran moldes cónicos de barro de 25cm de diámetro por 50cm de alto, para escurrir las mieles incristalizables. Después se aplanaba el contenido de las formas para forzar el escurrimiento del agua y se blanqueaba con lodo, colocándolo sobre la superficie. El lodo soltaba agua, la cual penetraba despacio la masa y disolvía el jarabe de colores más fuertes (en ese entonces y con tal procedimiento no se obtenía azúcar blanco como el de hoy en día). Después de unos 15 días, los panes (así le llamaban al contenido de las formas) se trasladaban al sol para eliminar el resto del contenido de agua. Ya secos, se raspaban para quitar el azúcar morena de la superficie y se empacaba el azúcar en papel y cuero. A la venta se podía encontrar azúcar blanca o morena, de pan entero, en terrones y en polvo [Landázuri y Vázquez, 1988].

Las mieles que no cristalizaban se utilizaban para alimentar ganado o a la misma población de las haciendas y para fabricar aguardiente, actividad que fue clandestina hasta el año de 1796 cuando se levantó su prohibición. Desde este año y hasta 1821 surgieron destilerías que compraban las mieles a las haciendas.

En cuanto al empleo de la mano de obra un cambio importante fue que el concepto de trabajadores asalariados sustituyó al de la esclavitud, aunque en la mayoría de los casos el salario no se pagaba en efectivo sino que se utilizaban medios indirectos: vales para la tienda de raya, habitación, terreno para sembrar, porciones de la siembra, etc.

### **1.1.2 Producción de azúcar en el siglo XIX (1821 - 1880)**

Durante la primera mitad del siglo XIX el estado de la agroindustria del azúcar permaneció casi sin modificaciones con respecto al del siglo XVIII, fue a partir de la década de 1850 cuando podemos considerar que realmente se moderniza la industria y se introducen cambios sustantivos en el sector. Hasta antes de 1850 parece haber un estancamiento de la actividad agrícola ya que la economía estaba paralizada por la guerra de independencia y las guerras internas posteriores, en ese entonces el capital privado consideró al comercio como una actividad más lucrativa y la Iglesia siguió

participando como institución prestamista bajo el sistema crediticio hipotecario acumulando riqueza en propiedades.

A partir de la segunda mitad del XIX el estado participó en la redistribución de la tierra mediante las siguientes acciones: La aplicación de la “Ley Lerdo” (1856), la “Ley sobre Nacionalización de los Bienes del Clero y Separación de la Iglesia y el Estado” (1856), la “Ley sobre Nacionalización de la Propiedad Eclesiástica” (1859) y la confiscación de bienes a la caída de Maximiliano. Como resultado se reconocieron diferentes tipos de propiedades: la gran propiedad (haciendas), las medianas unidades (ranchos y porciones que la hacienda arrendaba) y la pequeña unidad (tierras de indígenas y de arrendatarios más pobres). Lo anterior, junto con la pacificación del país, hizo que un sector de empresarios nacionales y extranjeros invirtieran en tecnología para el campo, y es entonces cuando las haciendas, que ya cubrían la demanda de alimentos de los centros urbanos y mineros, comenzaron a abastecer a los centros rurales y a adquirir de nuevo una gran importancia económica y política. Al darse esta situación los grandes hacendados conjuntaron sus intereses con los comerciantes y funcionarios públicos, ejerciendo un control local y regional sobre el comercio y producción.

Es entonces cuando los hacendados fueron vistos en general como personas bastante acaudaladas y las instituciones de fomento económico (Banco de Avío y Dirección General de Industrias) no consideraron a este sector como a uno que necesitara apoyo sino que al contrario les gravaron impuestos sobre la producción y comercialización del azúcar [Landázuri y Vázquez, 1988], situación que fue desfavorable para el sector ya que las innovaciones tecnológicas y el mismo proceso productivo hacían que se siguiera dependiendo de préstamos para poder operar esta industria.

Se recurrió al arrendamiento y a la venta de propiedades para cubrir las deudas, lo que resultó en un constante cambio de propietarios siendo beneficiados los prestamistas (Iglesia), los comerciantes que disponían de gran capital para comprar las propiedades y liquidar las deudas, y los grandes arrendatarios que tenían años rentando y trabajando la hacienda. Esta clase dominante comenzó un proceso de concentración de propiedades fraudulento e inclusive violento, que desembocó en un movimiento social caracterizado por invasiones y robos a las haciendas por parte de los campesinos comuneros víctimas de abusos de los hacendados [Landázuri y Vázquez, 1988].

A partir de la segunda mitad del siglo XIX se puso atención en incrementar la productividad de la producción azucarera mediante acciones como la contratación a destajo, el autoabastecimiento de insumos, la eliminación de intermediarios comerciales y las nuevas tecnologías (adoptadas a finales del siglo XIX). Las regiones azucareras fueron lideradas por el Estado de Morelos, que ocupó el lugar más importante en cuanto a volumen de producción de azúcar. Veracruz comenzó a seguir de cerca a Morelos, el estado de Michoacán también fue un importante productor y algunos estados del interior (Querétaro, Puebla, Nuevo León e Hidalgo) y los costeros (de Sinaloa a Chiapas y desde Tamaulipas a Yucatán) también registraron producción de azúcar, piloncillo y aguardiente en pequeña escala [Landázuri y Vázquez, 1988].

Las condiciones del proceso de transformación del azúcar permanecieron prácticamente iguales desde el siglo XVIII hasta mediados del XIX, fue en la segunda mitad cuando aparecieron los primeros cambios significativos, pero es hasta el último tercio del siglo cuando se generalizan. En el proceso agrícola se sustituyó a la caña criolla por la habanera que presentaba mayor resistencia a los cambios climáticos y el tipo de arado también fue modificado; el barbecho, siembra y zafra de la caña se hicieron de la misma manera. Estos pequeños cambios junto con la acumulación que se tenía de conocimientos de cultivo y cosecha derivaron en un incremento de la producción. En el proceso de transformación la molienda siguió siendo la parte más importante, el equipo principal era el trapiche, el cual había cambiado de vertical a horizontal desde finales del siglo XVIII y en su mayoría eran de madera con recubrimientos de hierro y casi siempre eran importados (después comenzaron a fabricarse en la ciudad de México y en las mismas haciendas).

Hasta mediados del siglo XIX las operaciones de purga, hervido y secado no sufrieron cambios sustanciales y las mieles eran vendidas o destiladas en la misma hacienda mediante un proceso muy sencillo que consistía en evaporar el contenido alcohólico dentro de destiladoras. En la segunda mitad del siglo XIX algunos ingenios comenzaron a utilizar el vapor para el movimiento de los trapiches y se introdujo maquinaria y personal extranjero en las haciendas (destiladores y trapiches de Estados Unidos y Europa, y maestros azucareros cubanos). La introducción de las máquinas de vapor significó una revolución en la industria azucarera mexicana, elevando los rendimientos

en azúcar, y otro impacto fuerte en el rendimiento fue la implementación de la centrifugación para sustituir al viejo sistema de purga, elevando la producción de azúcar prácticamente al doble [Landázuri y Vázquez, 1988].

### **I.1.3 Desarrollo de la industria azucarera durante el Porfiriato**

La revolución industrial penetró en el ramo azucarero en muchos países productores durante el siglo XIX, cuando la demanda mundial de azúcar creció más rápidamente que la oferta. A mediados del siglo XIX la mayoría de los ingenios europeos eran modernos mientras que en Estados Unidos sólo existían seis con características similares [Arias, 1990]. Debido a lo redituable de esta actividad los capitales comenzaron a llegar a las colonias, en 1894, Cuba contaba con 350 ingenios modernos y una producción de 1.05 millones de toneladas de azúcar [Arias, 1990], también se invirtió capital extranjero en Brasil, Egipto, Guadalupe, Hawái, Puerto Rico y Tasmania. El mercado internacional llamó la atención de los hacendados mexicanos pero la tecnología antigua de la parte industrial del proceso les impedía competir en él. El atraso frente a productores como Cuba, Brasil, Alemania y Francia era enorme, de un millón de arrobas de caña, que podrían producir 160,000 toneladas de azúcar, sólo se obtenían 50,000 y el resto se perdían en el bagazo y en las mieles incristalizables [Arias, 1990]. La parte agrícola de la producción no estaba tan atrasada como la industrial debido a que las desventajas que tenían los productores del centro del país con respecto a otros estados costeros (agricultura de riego y no de temporal, y tierras menos fértiles) llevaron a los del centro a modernizarse en el cultivo de la caña.

A inicios del Porfiriato el mercado interno del azúcar se encontraba fragmentado por las siguientes razones: la corta vida de anaquel del producto, el cual era de mala calidad y con la exposición a la humedad y el calor lo convertía fácilmente en miel; el alto costo que representaba el transportar el azúcar de un estado a otro, debido en parte a las escasas y malas vías de comunicación y al sistema de alcabalas (pago de impuestos por actividades mercantiles entre estados); y por los aranceles a las importaciones, que hacían imposible la opción de importar el azúcar.

En parte, los hacendados azucareros del centro del país fueron responsables del escaso progreso tecnológico de la industria ya que especulaban sobre el mercado para obtener ganancias extras: sostenían una oferta inferior a la demanda potencial e incrementaban los precios del azúcar [Arias, 1990]. Ya más adentrados en este periodo histórico de México, alrededor del 1900, el mercado interno comenzó un proceso de integración debido principalmente a tres factores: el crecimiento de los ferrocarriles y su ventaja como sistema de transporte de mercancías (los fletes de ferrocarril en 1900 eran cinco veces más baratos que los de carretera), la abolición de las alcabalas y la política proteccionista frente al mercado mundial. En el caso de la industria azucarera, en pocos años las máquinas de vapor sustituyeron a las caídas de agua; las centrífugas, las evaporadoras al vacío y las procesadoras de efecto múltiple marginaron a los trapiches; y el transporte tradicional se sustituyó por redes de vías Decauville<sup>3</sup>. Para 1900 casi todos los trapiches habían desaparecido y la producción se concentró en los hacendados más fuertes, que expropiaron más tierras para la expansión de los sistemas de riego.

En Morelos, de 1902 a 1909 la producción de azúcar casi se duplica pasando de las 28,700 a las 52,000 toneladas anuales [Arias, 1990]. En el mismo lapso, la proporción de azúcar y mieles producidas se invirtió, pasando de 37% de azúcar y 63% de mieles a finales del siglo XIX hasta un 73% de azúcar por un 27% de mieles en 1909, mientras que el precio se mantuvo constante. En 1909 el precio de un kg era de 18 centavos y su costo de elaboración, en condiciones modernas, no rebasaba los 8 centavos [Arias, 1990]. La modernización entonces se centró en la fase industrial, ya no en la agrícola, y el protagonista de la competencia era entonces el capital necesario para las grandes inversiones en esta fase.

A principios del siglo XX las condiciones para negociar con el azúcar en México eran favorables para los comerciantes y hacendados, la demanda se mantenía constantemente por arriba de la oferta, lo que les permitía a los comerciantes especular con los precios. Además el mercado externo también ofrecía buenos precios, haciendo viable la opción de exportar [Arias, 1990]. En un afán de eliminar a los intermediarios, cuatro grandes productores de Morelos constituyeron la “Negociación Azucarera”, organización que

---

<sup>3</sup> Los sistemas de trenes tipo Decauville se utilizaron en todo el mundo a finales del siglo XIX y en la primera mitad del siglo XX, son trenes pequeños que se empleaban en la industria para el transporte interno de materias primas, productos, mercancías, trabajadores, etc. Su nombre viene de la empresa que los fabricaba.

quebró en el año de 1903 cuando una sobreproducción llevó a mantener 30,000 toneladas de azúcar almacenadas y a obtener deudas por siete millones de pesos [Arias, 1990]. A partir de este acontecimiento se crea la “Unión Azucarera Mexicana”, agrupando a los productores de Morelos, Puebla, Jalisco y Michoacán, asociación que expresó claramente el camino a seguir para la industria azucarera mexicana en los primeros años del siglo XX: una oferta constantemente superior a la demanda interna para evitar la especulación con los precios y ver a la exportación como una opción posible y no como una salida para el sobrante de la demanda nacional.

Para ese entonces la industria Mexicana aún estaba en relativo atraso respecto a los demás países productores, debido a esto, después de la crisis de 1904 – 1906 se volvió a vivir un periodo de modernización de la industria azucarera motivado por la necesidad de ser competitivos en el mercado externo. Sin embargo, la revolución de 1910 sorprende a la agroindustria azucarera que estaba en plena transformación.

#### **I.1.4 Reorganización y desarrollo de la industria azucarera hasta la actualidad**

A partir de la revolución se disuelve la organización integrada de la hacienda azucarera. A principios de los treinta, cuando el gobierno promovió de nuevo la producción de azúcar, la industria tuvo que adaptarse a una nueva situación en la que los obreros y campesinos entraban ya en juego. En la integración vertical de la industria con la agricultura existieron conflictos políticos entre los grupos involucrados en la producción de caña y azúcar acerca de la distribución del valor producido, además, al definirse al azúcar como alimento básico y controlar su precio en el mercado interno los consumidores y fabricantes de productos derivados de la caña participaron también en este conflicto [Arias, 1990].

El aumento de la producción de azúcar al haber terminado la revolución derivó en una sobreoferta interna y en la necesidad de coordinar la producción con la distribución nacional, para lo cual en 1931 se formó la Compañía Estabilizadora del Mercado del Azúcar. En 1932 dicha compañía se reorganiza en la sociedad Azúcar, S.A., y al mismo tiempo se fundó el Banco Azucarero para contribuir al financiamiento de la producción; sus accionistas fueron la mayoría de los ingenios y el Banco Nacional de Crédito

Agrícola. En 1938 se forma la Unión Nacional de Productores de Azúcar, S.A. (UNPASA) con el apoyo del presidente Lázaro Cárdenas. En los sexenios de Manuel Ávila Camacho y de Miguel Alemán la UNPASA tomó poder: definió las cuotas de producción y monopolizó la distribución del azúcar y otros derivados de la caña [Arias, 1990]. En los cuarentas se realizaron diversas acciones con el fin de estabilizar la agroindustria azucarera, que se consideraba como un sector en crisis: en 1942 se constituye la Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohólica (CNIAA), institución que sigue en funciones hasta hoy en día; en 1943 se crea la Financiera Nacional Azucarera, S.A. (FINASA), siendo sus accionistas los ingenios afiliados a la UNPASA [Manual Azucarero, 2013]; y en ese mismo año Ávila Camacho promulga el Decreto que habilita a la caña de azúcar como cultivo de interés público. La industria azucarera supera la crisis hasta 1946, cuando la guerra mundial provoca un aumento de la demanda internacional de azúcar, miel y alcohol, lo que provocó que estos productos se exportaran ilegalmente a precios superiores a los precios controlados internos [Manual Azucarero, 2013].

A pesar de los cambios mencionados la industria azucarera continuó utilizando prácticas similares a las del siglo anterior, durante el Porfiriato los hacendados ejercían la hegemonía política, y ahora los generales usaron la suya para acumular capital en el ramo azucarero. Hubo una marcada correlación entre los puestos militares y políticos de Manuel Ávila Camacho y el General Aarón Sáenz con la concentración del capital en sus familias [Arias, 1990].

En las décadas de 1950 y 1960 la producción de azúcar aumentó notablemente bajo controles sobre la producción, comercialización y precios de caña y azúcar. En 1955 el congreso de los Estados Unidos de América (EEUU) aprueba las cuotas del azúcar mexicana, esto da pie a un aumento en la producción nacional destinada a la exportación a EEUU, entonces la elaboración del azúcar volvió a considerarse como un buen negocio y hasta el año de 1960 se construyeron los que en ese entonces serían los últimos ingenios establecidos por la industria privada. El gobierno mexicano vio una gran oportunidad de negocio en el sector azucarero e inicia la construcción de ingenios paraestatales mientras que a la vez durante la zafra de 1962/63 otorgó créditos hipotecarios a la totalidad de la industria azucarera privada, este hecho junto con el congelamiento de los precios del azúcar desde 1958 llevaría, en 1963, a iniciar la

estatización de los ingenios privados y a estatizar también en 1968 a la UNPASA [Arias, 1990] [Manual Azucarero, 2013].

A principios de los setenta la exportación del azúcar se convirtió en una de las principales fuentes de moneda extranjera, aumentando sus ganancias después de la revolución cubana ya que este país dejó de exportar a Norteamérica, lo que se tradujo en un aumento del precio internacional y de la participación mexicana en ese mercado. En 1971 se crea la Comisión Nacional de la Industria Azucarera, que integró a los sectores privados, estatales y a las cooperativas y que se designó como la organización central para manejar todos los aspectos de la producción y distribución del sector, también en este año se forma la Operadora Nacional de Ingenios (ONISA). Sin embargo, los precios internos fijos entre 1958 y 1970 no permitieron amortizar las inversiones realizadas en la modernización y expansión de la industria azucarera, las deudas con FINASA se acumularon con las pérdidas de los industriales y desde 1965 el sector sufrió una descapitalización y como resultado en los setentas se tenía una maquinaria atrasada y en malas condiciones que se reflejó en tiempos perdidos y baja productividad [Arias, 1990].

En 1975 inicia la quiebra formal del sector azucarero con el aumento dramático de la demanda interna debido a la alta tasa del crecimiento demográfico, al gran ritmo de urbanización, y al creciente consumo per cápita. Este proceso no fue acompañado de la expansión de la industria azucarera e inversiones en el sector ya que el control de precios en función de las obligaciones sociales eliminaba los incentivos de inversión en el sector privado. En los siguientes años dejó de exportarse el azúcar e inclusive escaseó en el mercado interno, en parte debido también a que el mercado internacional se desestabilizó por el aumento del precio del kilogramo de azúcar en 1974 de 29.6 a 65 centavos estadounidenses, lo que redujo drásticamente la demanda y para 1975 y 1976 los precios bajaron a 20.9 y 14 centavos [Arias, 1990]. El equilibrio que había entre el mercado interno y externo del sector azucarero se rompió cuando los ingenios aún no se recuperaban de las inversiones de los sesenta, es entonces cuando el gobierno interviene nacionalizando la mayoría de los ingenios en la segunda mitad de los setenta, expropiando 67 ingenios durante el sexenio de Luis Echeverría [Manual Azucarero, 2013]. Para ese entonces los ingenios azucareros tenían un importante atraso tecnológico, problema al que se le sumaron los siguientes: una mala administración, el

sobre empleo, el aumento de gastos en servicios sociales, el manejo ineficiente y la corrupción, todos derivados de la operación de la industria por parte del estado.

En 1980 se forma “Azúcar, S.A.” que absorbe a la CNIA, la UNPASA y la Operadora de Ingenios [Arias, 1990], sin embargo las decisiones para determinar los precios del azúcar se realizaron con base en criterios políticos populares y la intervención del Gobierno no resuelve los problemas, de nuevo no se invierte en la urgente modernización del sector. De 1979 a 1981 el Gobierno, además de acelerar la estatización de ingenios privados, aplica la expansión más vigorosa de la historia en los ingenios paraestatales en operación, esto pareció significar que en breve se estatizaría la totalidad de esta actividad. Sin embargo, en 1981 López Portillo autoriza un incremento en el precio del azúcar y anuncia que el Estado respetará los 16 ingenios que todavía se mantenían en la Industria privada [Manual Azucarero, 2013]. En el siguiente sexenio, el de Miguel De la Madrid, en consecuencia de la recurrente inflación, anualmente hubo incrementos en el precio del azúcar y su gobierno decide privatizar la mayoría de las empresas paraestatales, desincorporando a los ingenios del Estado. Ya en el gobierno de Salinas de Gortari se termina la desincorporación, se libera el precio y se abren las puertas para el azúcar del mercado mundial. En 1994, al terminar el gobierno de Salinas, la mayoría de los ingenios se encontraban, de nuevo, altamente endeudados.

En la administración de Ernesto Zedillo se les inyectó grandes sumas de dinero a los ingenios que habían sido privatizados durante las dos administraciones anteriores para evitar su quiebra, de acuerdo con el proceso que se siguió Financiera Nacional Azucarera otorgó cartas de garantía a la banca extranjera para respaldar créditos para el campo y la industria azucarera logrando reestructurar la deuda de 46 ingenios en 1995. En el año de 1997 comienza la competencia en México entre el azúcar nacional y el jarabe de maíz de alta fructosa (JMAF, JMRF o simplemente fructosa) estadounidense cuando la CNIAA presenta una demanda “antidumping” en contra de la entrada de la fructosa ante la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI), que se resuelve favorable y como consecuencia se gravan impuestos sobre la fructosa importada de Estados Unidos, ya que al entrar a precios menores al azúcar comenzó a sustituir al producto nacional en la industria de las bebidas.

Esta situación tuvo su origen a partir de la entrada en vigor del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) el 1º de enero de 1994, en el cual se incluyó la posibilidad de comercializar entre México y Estados Unidos tanto azúcar de caña como JMAF. Para apoyar la exportación de excedentes en 1997 y el manejo de inventarios de 600 mil toneladas de azúcar durante la zafra 1998/99 el gobierno federal volvió a entregar recursos a los ingenios y, otra vez, estos se vieron incapaces de pagar su deuda. En septiembre de 2001 el Gobierno del entonces presidente Vicente Fox expropia 27 ingenios, propiedad de Grupo Azucarero México, Grupo Santos, Grupo Machado y Consorcio Azucarero Escorpión, además de aplicar un impuesto especial del 20% a los refrescos elaborados con JMRF; estas acciones buscaron proteger y estabilizar a los ingenios azucareros mexicanos [Manual Azucarero, 2013]. Más adelante los conflictos entre los sectores de endulzantes mexicano y estadounidense se hicieron más fuertes ya que a partir del 2003 varios productores transnacionales de JMAF con presencia en México promovieron una serie de demandas en contra del Gobierno mexicano solicitando la indemnización por cientos de millones de dólares, argumentaron ante la Organización Mundial de Comercio (OMC) y ante el Centro Internacional de Arreglo de Diferencias relativas a Inversiones (CIADI) que en México se había establecido un bloqueo a sus actividades comerciales violando el TLCAN, las empresas ganaron las demandas en 2008 [Pérez, 2010]. En el 2006 la Secretaría de Economía publica un acuerdo en el Diario Oficial de la Federación, en el cual permite la entrada de 250 mil toneladas de fructosa libre de arancel, con el plan de facilitar la transición a la apertura total para la fructosa a partir del primero de enero de 2008.

A partir de la expropiación del 2001 existieron mejores condiciones de mercado para el sector azucarero nacional, la zafra de 2004/05 registró una alta producción y desde entonces los industriales privados han venido recuperando sus ingenios o han sido adquiridos en licitaciones por otros grupos (en la zafra de 2011/12 ya sólo había nueve ingenios con participación estatal). De 2010 a 2012 los precios del azúcar fueron bastante elevados y en el año 2012 se registró la mayor importación histórica de JMAF a México, por arriba de las 1.25 millones de toneladas (mdt), sin embargo en el 2013 se observó una caída de precios en el azúcar nacional superior al 40% [USDA, 2013]. A la situación anterior se le suman las posibles afectaciones que puedan derivarse de la nueva reforma fiscal mexicana aprobada en 2013, la cual estableció el pago de impuestos a partir del ejercicio de 2014 para los siguientes productos: \$1.00 peso

mexicanos por litro para las bebidas saborizadas y energizantes cuando contengan azúcares añadidos, y un 8% en los alimentos no básicos que contengan una densidad calórica de 275 kilocalorías o mayor por cada 100 gramos [Cámara de Diputados, 2013].

Siguiendo el contexto histórico descrito podemos inferir que después de los cambios sociales, estructurales y económicos provocados por la revolución mexicana el gobierno asumió gradualmente y hasta finales de la década de los ochentas un control creciente de un sector azucarero caracterizado como sujeto de responsabilidad social y proveedor de un producto básico de primera necesidad. Esta situación cambia drásticamente en las administraciones de Miguel de la Madrid y de Carlos Salinas, ya que con la nueva visión de política neoliberal se hacen intentos por abrir el mercado del azúcar, se privatizan los ingenios estatales y los productos endulzantes (azúcar y JMAF) entran en el TLCAN, resultando en un incremento en las deudas de las industrias, un cambio de propietarios de las mismas y la falta de inversión en la urgente modernización de las fábricas y del proceso agrícola; al día de hoy podemos decir que la industria azucarera sigue estando muy reprimida para competir en el mercado internacional, además de que los líderes mundiales en este sector han diversificado su producción vendiendo excedentes de electricidad y produciendo bioetanol en las mismas fábricas azucareras, lo cual no ha sucedido en nuestro país.

## **I.2 CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS DEL SECTOR**

### **I.2.1 Figura de propiedad**

En la zafra del periodo 2011/12 participaron 54 ingenios de los cuales 49 pertenecen a 14 grupos industriales y los seis restantes son ingenios independientes. En la siguiente tabla se enlistan los ingenios independientes.

**Tabla 1**

Ingenios Independientes participantes en la zafra 2011/2012.

<b>Ingenio</b>	<b>Ubicación</b>
La Primavera	Navolato, Sinaloa
Azsuremex (Tenosique)	Tenosique, Tabasco
El Molino	Tepic, Nayarit
Los Mochis	Ahome, Sinaloa
San José de Abajo	Cuitláhuac, Veracruz
San Nicolás	Cuichapa, Veracruz

Fuente: [Manual Azucarero, 2013].

Uno de los 14 grupos industriales, en el que se agrupan 9 ingenios, mantiene inversión pública a través del Fondo de Empresas Expropiadas del Sector Azucarero (FEESA, entidad paraestatal de la SAGARPA) y de la Promotora Azucarera, S.A. de C.V. (PROASA). Los otros 13 grupos son de propiedad privada [Manual azucarero, 2013]. En la tabla 2 se muestran los grupos industriales y los ingenios de su propiedad.

**Tabla 2** Grupos propietarios de ingenios participantes en la zafra 2011/12.

<b>Grupo</b>	<b>Ingenios</b>
Agazúcar	Puga
Beta San Miguel	Constancia Quesería San Francisco Ameca San Miguel del Njo. (Ponciano Arriaga) San Rafael de Pucté (A. Obregón) Santa Rosalía de la Chontalpa, S.A. de C.V.
FEESA-PROASA	Atencingo Casasano "La abeja" El Modelo El Potrero Emiliano Zapata La Providencia Plan de San Luis San Cristóbal San Miguelito
García González	Calípam El Carmen Nuevo San Francisco
Grupo Azucarero del Trópico	La Gloria La Joya
Grupo Azucarero México	El Dorado Lázaro Cárdenas Tala
La Margarita	Central Progreso José María Morelos La Margarita
Motzorongo	Central Motzorongo El Refugio (Santa Isabel)

<b>Grupo</b>	<b>Ingenios</b>
OAL (Colombia) – GAM (México)	Presidente Benito Juárez
Pantaleón	Pánuco, S.A.P.I. de C.V.
PIASA	Adolfo López Mateos Tres Valles
Porres	Grupo Azucarero San Pedro, S.A. de C.V. Huixtla Santa Clara
Sáenz	Aarón Saenz Garza (Xicoténcatl) El Mante Tamazula
Santos	Alianza Popular Cía. Azucarera del Ingenio Bellavista Cuatotolapam (Cía. Ind. Azucarera) Pedernales Plan de Ayala
Zucarmex	Cía. Azucarera La Fé (Pujilic) El Higo Mahuixtlán Melchor Ocampo

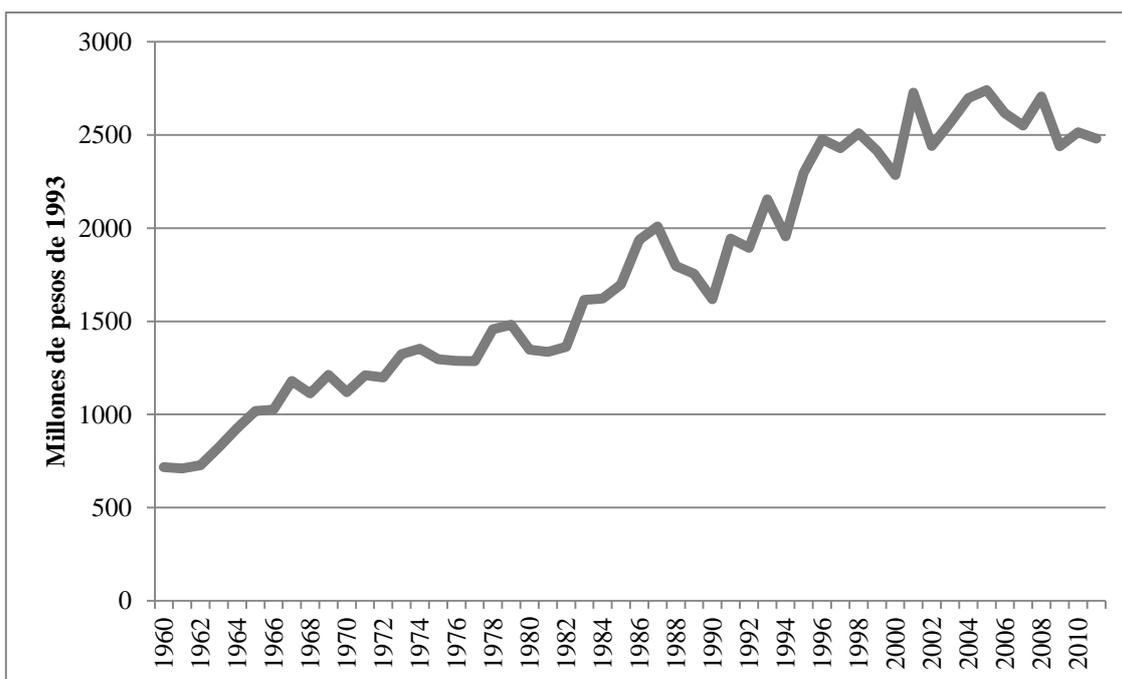
Fuente: [Manual Azucarero, 2013], [UNC, 2013].

## **I.2.2 Producto interno bruto del sector azucarero**

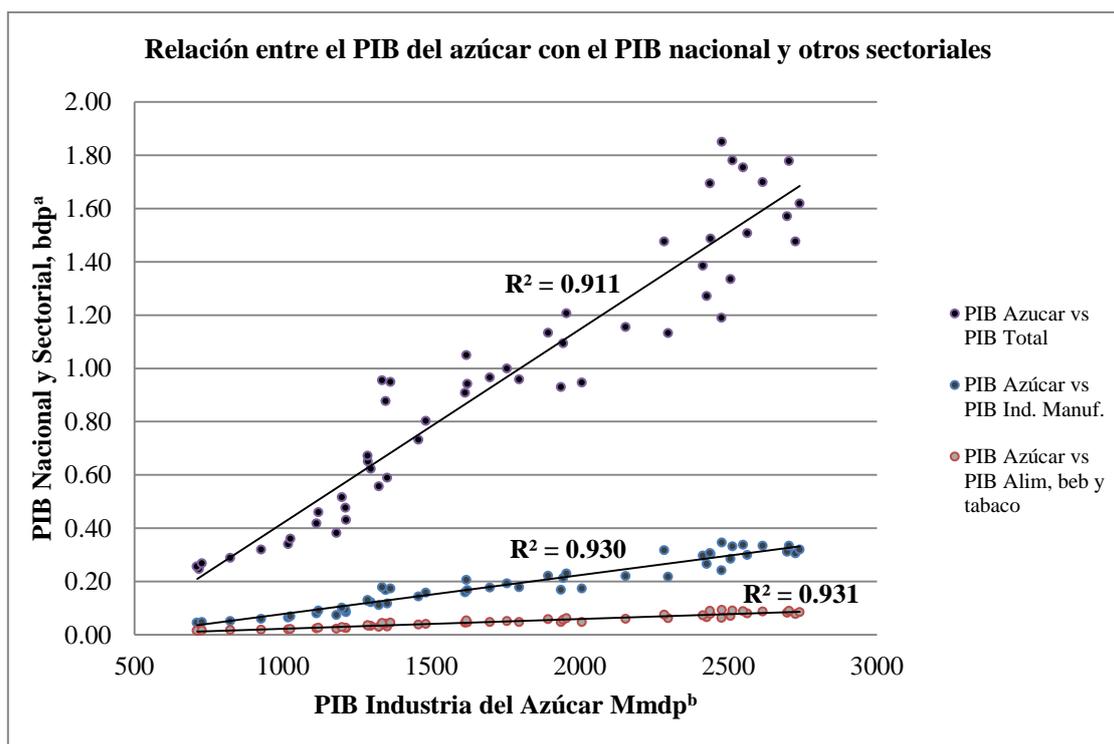
La agroindustria azucarera es importante para la economía del país, no solamente por su participación en el Producto Interno Bruto (PIB), también por el número de empleos directos e indirectos que genera y por la presencia de sus productos en las industrias de alimentos y bebidas. Según datos de la Cámara Nacional de las Industrias Azucareras y Alcoholeras (CNIAA), durante la zafra 2009/10, la agroindustria azucarera dio empleo directo a 448,894 personas e indirecto a 2,212,005 [Secretaría de Economía, 2012].

La Figura 1 muestra la evolución del PIB de la industria azucarera<sup>4</sup>, el cual ha estado vinculado con las diversas desaceleraciones de la economía a nivel nacional y creció 2.5 veces entre 1960 y 2011. En la última década su crecimiento ha sido muy inestable, lo cual se analizará con más detalle más adelante, cuando se analice la producción física. En la Figura 2 se puede apreciar la alta correlación entre el PIB nacional, manufacturero y el del sector bebidas y alimentos, con el PIB del azúcar.

<sup>4</sup> Para realizar un análisis del comportamiento del PIB de la industria azucarera se tomaron los datos que reporta el Sistema de Cuentas Nacionales del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) desde 1960 hasta el 2011, los cuales se encuentran en series diferidas a precios constantes ya sea de 1980, 1993, 2003 o 2008; no se cuenta con una serie histórica desde 1960 hasta 2011 a un precio constante, por lo tanto se elaboró una a precios de 1993 conforme al procedimiento que utiliza la Comisión de Estudios de Finanzas Públicas (CEF) de la Cámara de Diputados [Cámara de Diputados, 2003].



**Figura 1.** PIB de la industria azucarera, serie de 1960 a 2011, a pesos constantes de 1993. Ver Nota 4.



**Figura 2.** Gráfico de la relación entre el PIB de la industria azucarera y el PIB total, el de la Industria Manufacturera y el del sector de Alimentos, Bebidas y Tabaco. Fuente: elaboración propia, con datos del INEGI.

a. bdp: billones de pesos de 1993.

b. Mmdp: miles de millones de pesos de 1993.

En 1960 la industria azucarera aportó un 12.6% al PIB de la industria de alimentos, bebidas y tabaco, un 4.2% al de la industria manufacturera y un 0.85% al PIB nacional; para 1990, las aportaciones fueron de 3.0%, 0.8% y 0.15% respectivamente y para el 2011, el sector azucarero contribuyó con un 2.7%, 0.7 % y un 0.13% respectivamente [INEGI, 2013]. Como vemos, la aportación económica del sector azucarero ha disminuido desde 1960 hasta la actualidad.

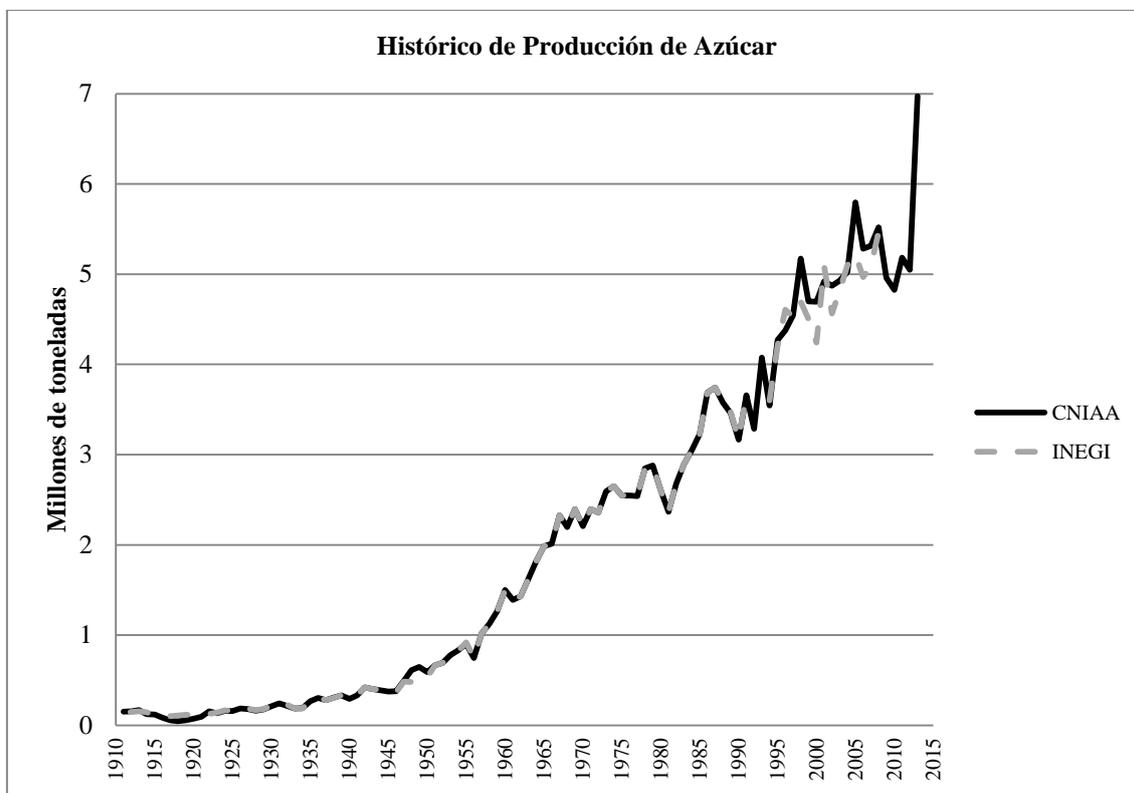
### **I.2.3 Producción nacional**

#### ***I.2.3.1 Producción total de azúcar***

Se cuenta con información oficial de la producción de azúcar en México desde el año de 1910 por parte de dos instituciones: el INEGI y la Cámara Nacional de la Industrias Azucarera y Alcohólica (CNIAA). El INEGI también reporta producción de azúcar desde el año de 1892, antes de esta fecha sólo encontramos estimaciones realizadas por historiadores.

Existen diferencias entre los datos del INEGI y de la CNIAA, la cantidad de azúcar producida que muestran ambas organizaciones coincide sólo en el periodo de 1956 a 1987 (ver Figura 3). En los demás años es diferente, aunque no se aleja mucho la una de la otra. En el caso de la industria azucarera existe una particularidad en la contabilidad de la producción anual reportada: las asociaciones azucareras que llevan la estadística de producción de azúcar reportan por periodo o ciclo de zafra (año zafra), el cual es el tiempo en el que se cosecha la caña y se produce el azúcar. El periodo natural de zafra en el territorio nacional comienza alrededor de los meses de noviembre y diciembre de un año y termina en mayo o junio del siguiente, dependiendo de la zona de cultivo y de las condiciones climáticas. Sin embargo, oficialmente y para fines estadísticos un año zafra se considera del 1 de octubre de un año al 30 de septiembre del siguiente. Tal vez por esta razón no concuerden exactamente los datos del INEGI con el de las asociaciones de azucareros, ya que el primero reporta por años calendario y los segundos lo hacen por años zafra. Para los propósitos de este trabajo utilizaremos los datos de producción de las asociaciones de azucareros, en específico de la CNIAA, de la Unión Nacional de Cañeros (UNC) y del Comité Nacional para el Desarrollo

Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA), los cuales son más confiables ya que la información es recopilada ingenio por ingenio, y no solamente acerca de producción de azúcar sino que también reportan datos agrícolas, de consumos energéticos, rendimiento de fábrica, equipos utilizados, personal empleado, etc.



**Figura 3.** Producción nacional de azúcar. Comparación de datos del INEGI y la CNIAA.

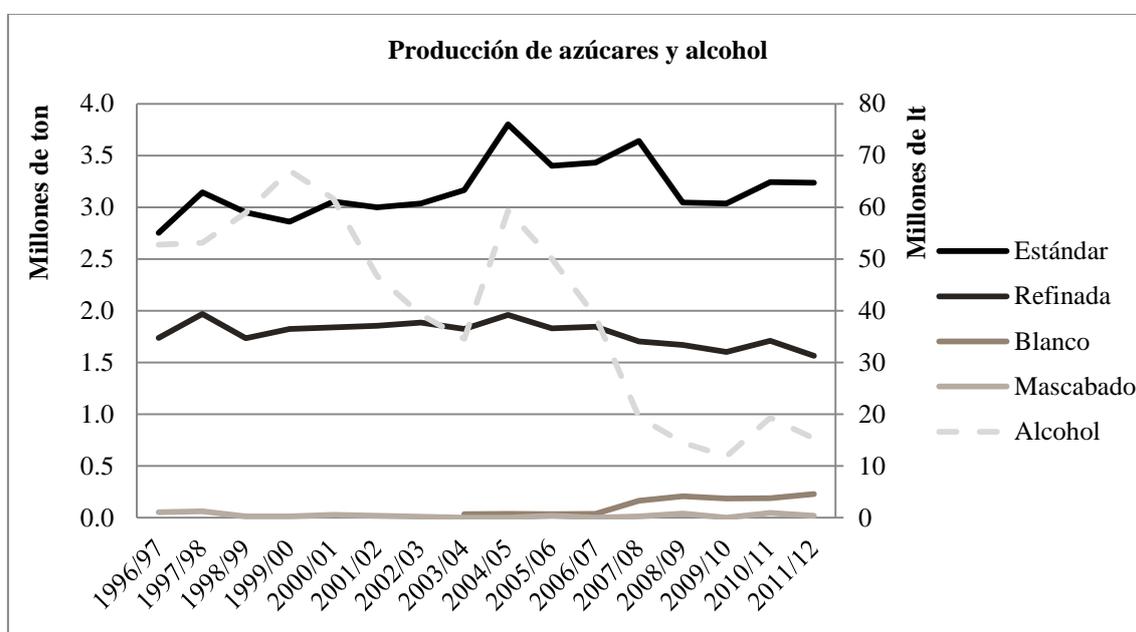
Fuente: Estadísticas históricas de México, INEGI (2009). Manual Azucarero Mexicano, CNIAA (2013).

Durante la zafra 2012/13 se obtuvo el máximo histórico de producción de azúcar con 6.97 millones de toneladas (Figura 3). En esta zafra operaron 55 ingenios que, motivados por los precios altos sostenidos en las dos zafras anteriores, incrementaron en gran medida su producción, resultando en un aumento del 38% en el total de la producción nacional solamente de la zafra 2011/12 a la 2012/13 [SAGARPA, 2013]. De 1910 a 2013 la producción azucarera ha aumentado 46.5 veces, obedeciendo principalmente al crecimiento de la demanda interna para consumo de la población. Durante este mismo periodo se han presentado sucesos históricos, internos y externos, de carácter social, político, económico, comercial e inclusive climatológico que han afectado a la producción azucarera. Estos hechos se relatan en el apartado “a” del primer capítulo del presente trabajo, “Reorganización y desarrollo de la industria

azucarera hasta la actualidad”. Con base en esta información se elaboró una línea del tiempo que se presenta en la Figura 4, en la que se puede ver con mayor claridad la relación entre estos sucesos y el comportamiento de la producción azucarera nacional.

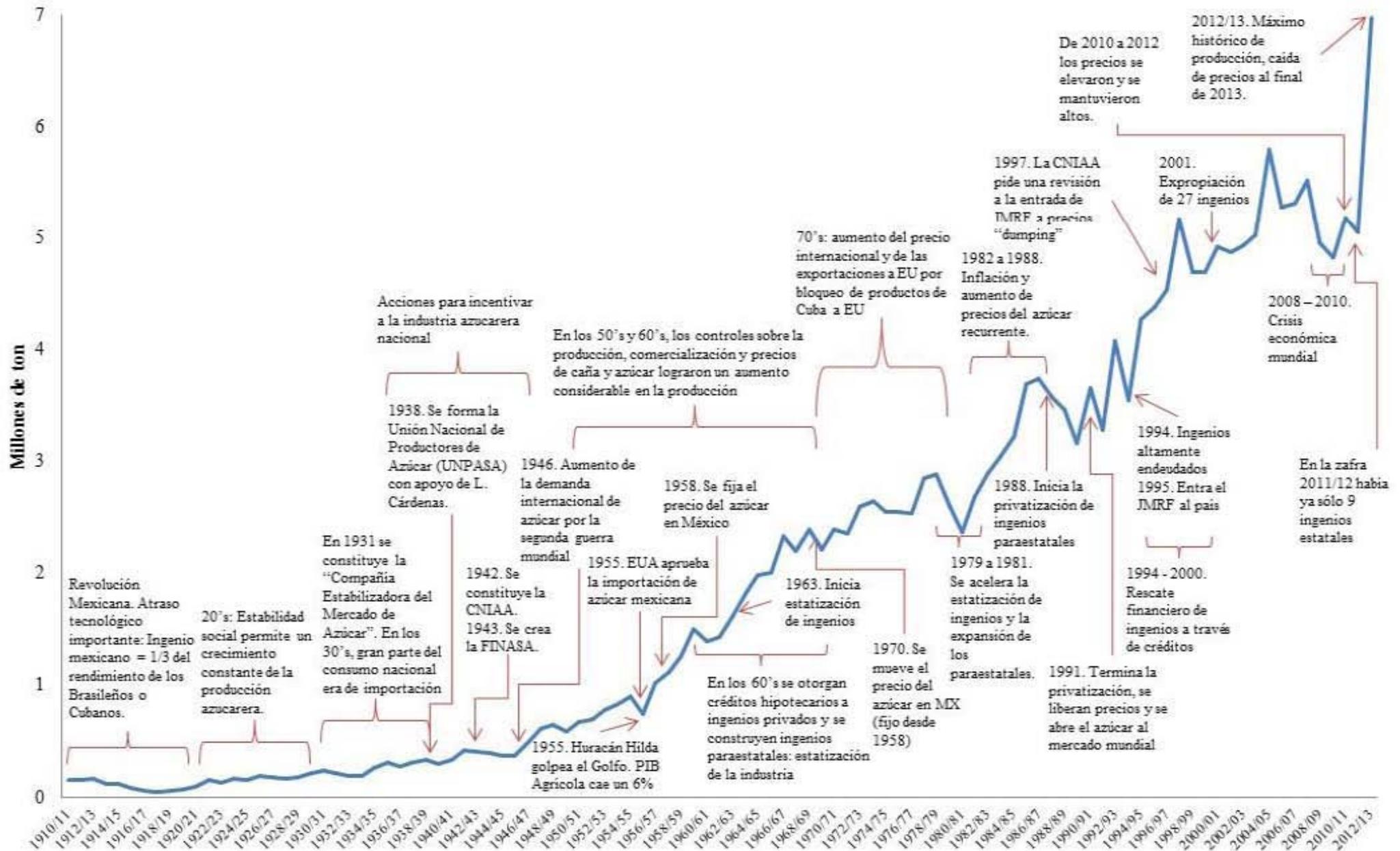
### 1.2.3.2 Producción de variedades de azúcar y de alcohol

Es importante señalar que durante el proceso de transformación del azúcar de caña se pueden obtener diferentes productos: azúcar estándar, refinado, blanco, mascabado, mieles, cachaza, alcohol, bagazo, etc. Para México encontramos datos desagregados de la producción de los ingenios azucareros a partir de la zafra de 1996/97.



**Figura 5.** Producción nacional de azúcares (toneladas, eje izquierdo) y de alcohol (litros, eje derecho). Zafras 1996/97 a 2011/12. Fuente: elaboración propia, con datos de la SAGARPA [SAGARPA, 2013].

### Producción de azúcar 1910–2013. Línea del tiempo



**Figura 4.** Línea del tiempo, producción nacional total de azúcar de la zafra 1910/11 a la 2012/13. Fuente: elaboración propia.

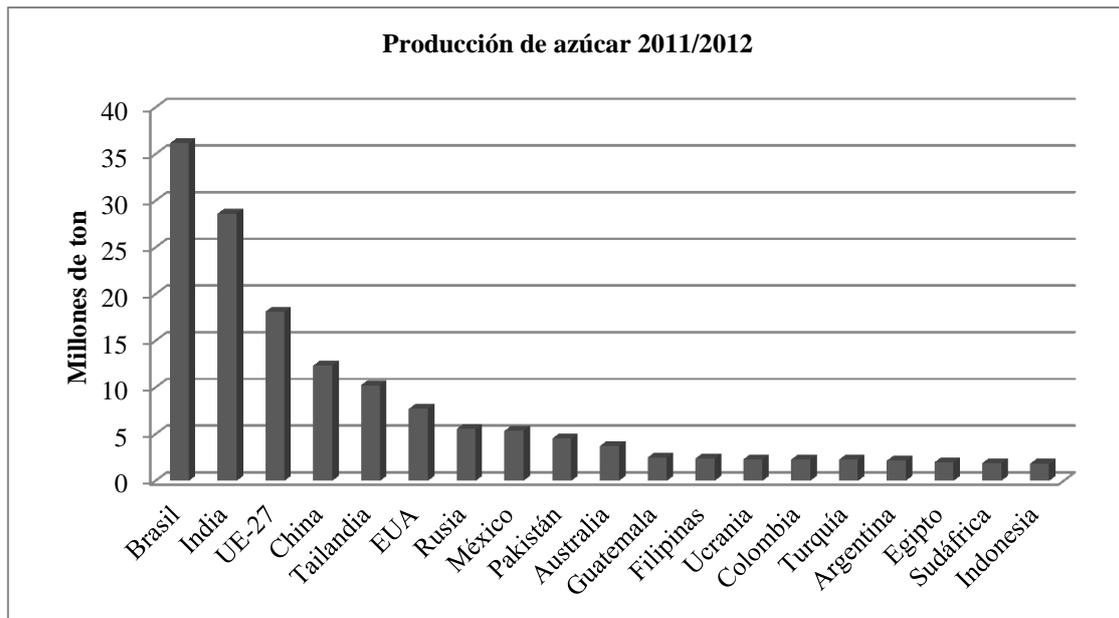
Si vemos la gráfica de la Figura 5 podemos observar cómo ha ido evolucionando la industria azucarera nacional en sus diversos productos. Mientras que la cantidad total de azúcar producida en el periodo comprendido entre la zafra de 1996/97 y la de 2011/12 ha aumentado en un 11%, la producción de azúcar estándar lo ha hecho en un 18% y la de refinado ha caído un 10%. El azúcar denominado “blanco especial” se comenzó a producir en el país durante el ciclo 2003/04 y, aunque en la zafra 2011/12 su participación en el total del azúcar fabricado fue sólo del 4.5%, su producción ha aumentado en un 566% desde su aparición en el mercado. En la gráfica se observa que con el crecimiento de la producción del azúcar blanco se da un descenso de la del refinado. El azúcar mascabado es el tipo de azúcar del que se produce una menor cantidad, y en este periodo su producción cayó un 68%. En cuanto al alcohol de 96°, que se fabrica en algunos ingenios del país, su producción ha descendido un 71% [SAGARPA, 2013].

#### **1.2.4 Mercado mundial del azúcar: panorama actual**

En la mayoría de los países productores de azúcar se sigue un esquema de mercado en el que primero se busca satisfacer la demanda interna y en seguida los excedentes se comercializan al exterior, esto por tratarse de un producto alimenticio básico. El comercio exterior del azúcar se realiza ya sea por libre mercado o bajo tratados o acuerdos específicos entre países exportadores e importadores, como el TLCAN, en el cual se contempla este sector.

En el ciclo 2011/12 la producción total de azúcar en el mundo fue de 171.98 millones de toneladas, la mayor en la historia, siendo los principales productores Brasil, India, la Unión Europea, China y Tailandia; México ocupó el séptimo lugar [USDA, 2013].

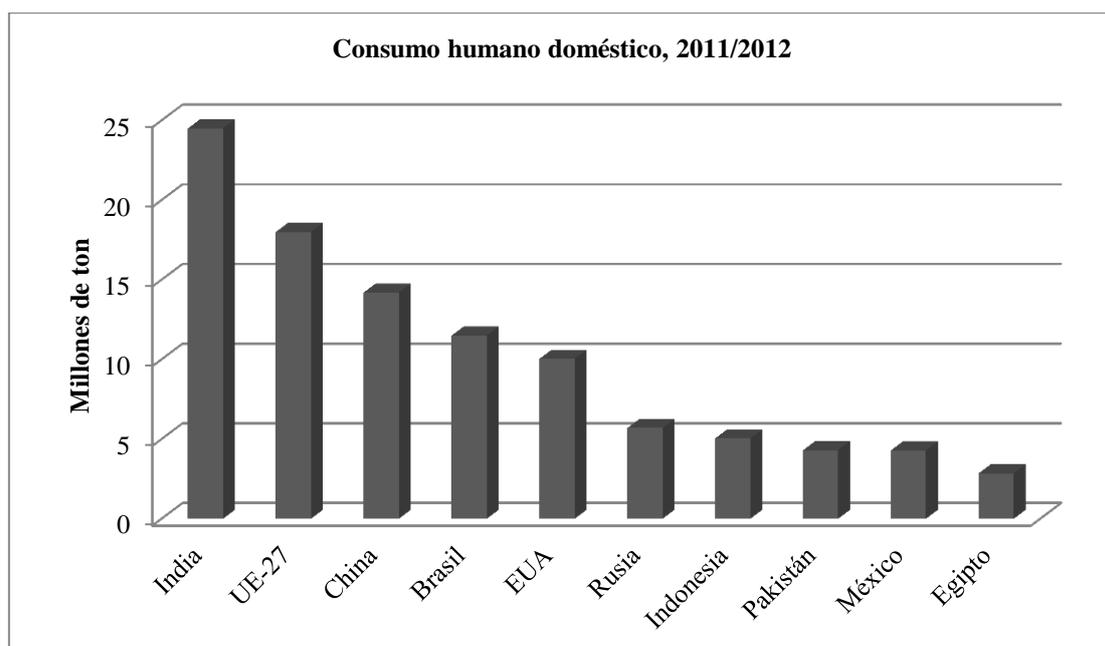
Como vemos en la Figura 6, Brasil lleva la delantera por mucho, dadas sus condiciones naturales ventajosas para el cultivo de la caña de azúcar y el impulso que se ha dado de parte de su gobierno para la modernización y diversificación de su industria, hacia la producción de etanol y de electricidad.



**Figura 6.** Primeros veinte países productores de azúcar en el ciclo 2011/2012.

Fuente: elaboración propia con datos del Departamento de Agricultura de EEUU [USDA, 2013].

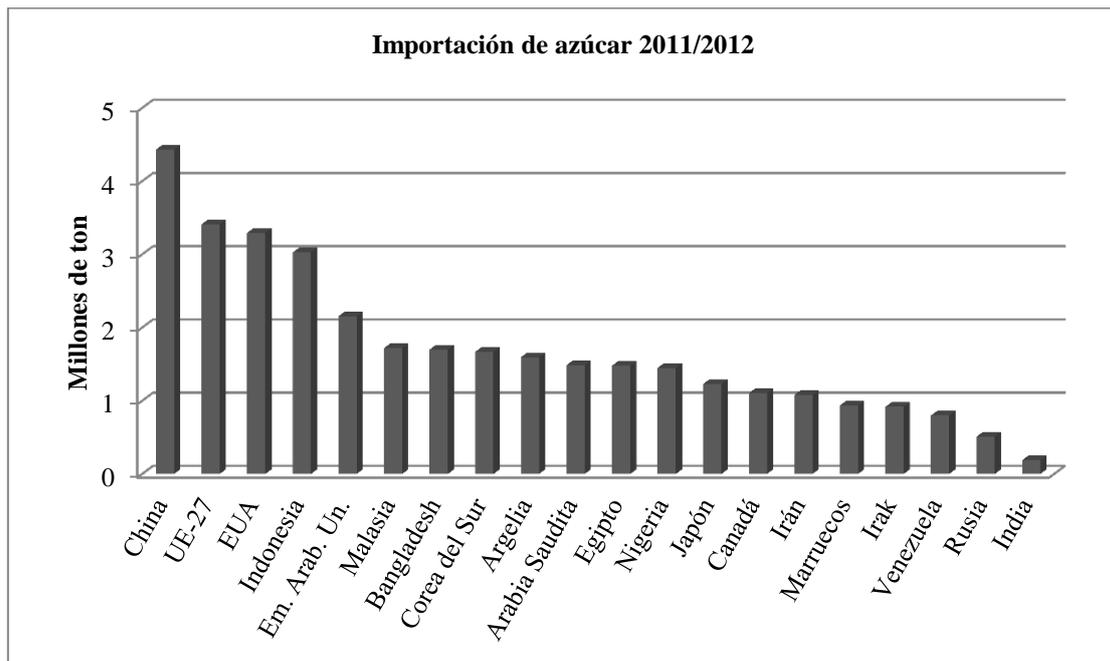
En cuanto al consumo humano doméstico, India es el mayor consumidor a nivel mundial. Este país, en sólo cuatro años, pasó de ser un país importador de azúcar (no alcanzaba a cubrir su demanda interna en el 2008/09) a ser un productor y exportador del producto en la zafra 2011/12. México fue el lugar número nueve en el consumo humano de azúcar [USDA, 2013] (Figura 7).



**Figura 7.** Principales países consumidores de azúcar en el ciclo 2011/2012.

Fuente: elaboración propia con datos del Departamento de Agricultura de E.U. [USDA, 2013].

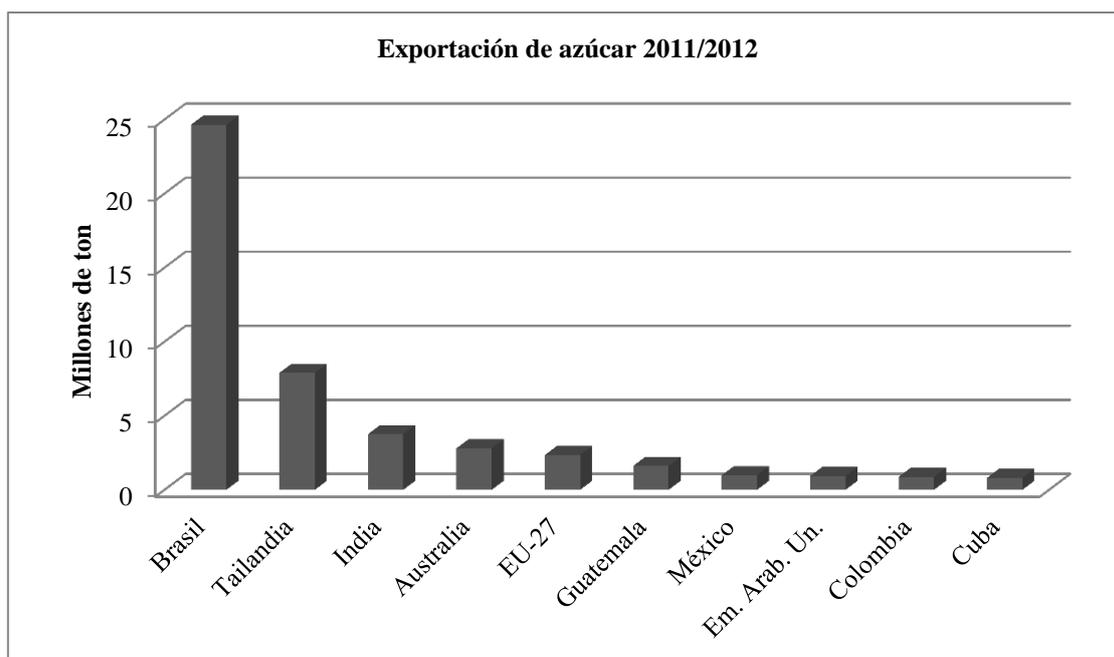
El primer lugar en importaciones es China, que ha cuadruplicado la cantidad de azúcar importada de la zafra 2008/09 a la 2011/12 [USDA, 2013]. La India ha pasado de importar 1,358 toneladas en 2008/09 a tan sólo 188 toneladas en 2011/12, debido al aumento de su producción nacional. México no aparece dentro de los primeros 20 importadores [USDA, 2013] (Figura 8).



**Figura 8.** Mayores importadores de azúcar durante el ciclo 2011/2012.

Fuente: elaboración propia con datos del Departamento de Agricultura de E.U. [USDA, 2013].

En la Figura 9 vemos que en exportación de azúcar Brasil ocupa la primera posición, seguido por Tailandia. En las últimas cuatro zafras México se ha ubicado dentro de los primeros siete países exportadores de azúcar [USDA, 2013].



**Figura 9.** Principales exportadores de azúcar en el ciclo 2011/2012.

Fuente: elaboración propia con datos del Departamento de Agricultura de E.U. [USDA, 2013].

Hoy en día podemos considerar a México como un país de mediana producción y exportación de azúcar, en las últimas zafras ha estado dentro de los primeros siete productores y exportadores del endulzante.

### 1.2.5 Comercio de azúcar y fructosa en México

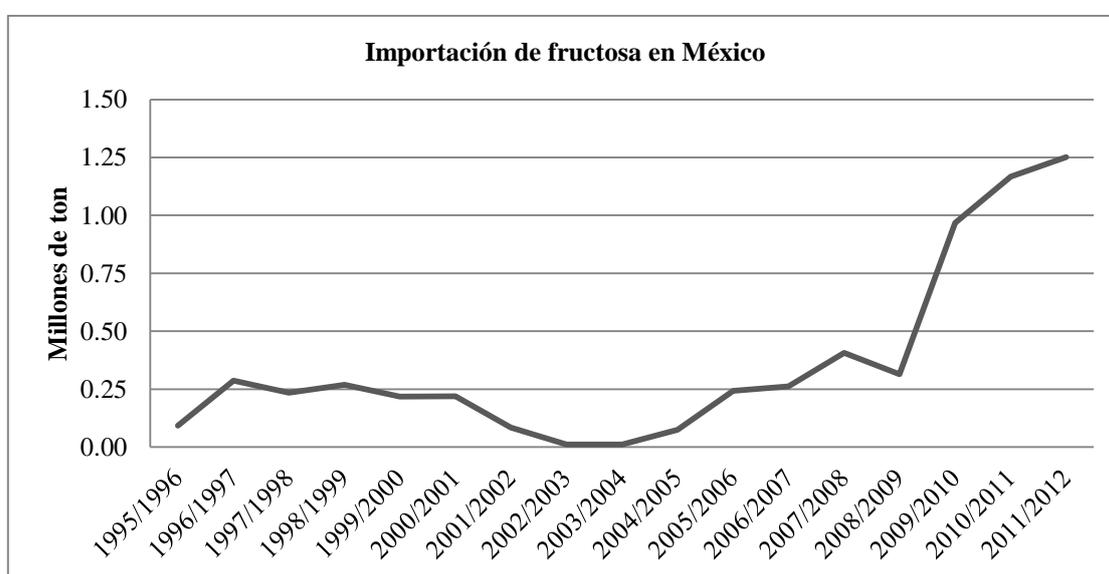
El comercio exterior de azúcar hasta 1994 estaba protegido por la paraestatal Azúcar, S.A., mediante el control de las exportaciones e importaciones así como de los precios locales. Esta institución determinaba el precio de venta según el destino del producto: consumo directo (mayoreo, medio mayoreo y menudeo) y consumo industrial (mayoreo a precio más alto). Esta situación cambió con la entrada del TLCAN.

Con la liberalización de los precios del azúcar en Estados Unidos se establecieron cuotas máximas de importación de azúcar, las cuales iniciaron con 25,000 toneladas en los primeros seis años, 150 mil en el año siete y del año ocho al 14 de un 110% superior al límite del año anterior, hasta actualmente llegar al compromiso por parte de EEUU de la compra de la totalidad de excedentes de la producción azucarera mexicana. En el

mismo TLCAN se acordó ir desgravando gradualmente la fructosa<sup>5</sup> estadounidense para su entrada a México.

Los embotelladores mexicanos de refrescos fueron quienes iniciaron el consumo de fructuosa en 1995 para sustituir al azúcar, por razones de precio fundamentalmente, lo que permitió a los grandes productores norteamericanos de fructosa comenzar a exportar a México importantes cantidades de fructuosa al amparo del TLCAN. En la Figura 10 podemos ver la evolución de las importaciones de fructosa desde 1995 hasta el 2012, en años zafra.

En 1997 la CNIAA presentó ante la entonces SECOFI (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial) una demanda antidumping por la entrada de fructosa a México, debido a que ésta se produce a partir del maíz, que es un producto subsidiado en Estados Unidos y, además, el vecino país es el mayor productor mundial de este cereal. En enero de 1998 se resuelve aprobatoria la demanda y se gravan impuestos a la fructosa norteamericana, también se grava con un Impuesto Especial (IEPS) del 20% a los refrescos producidos con fructosa.



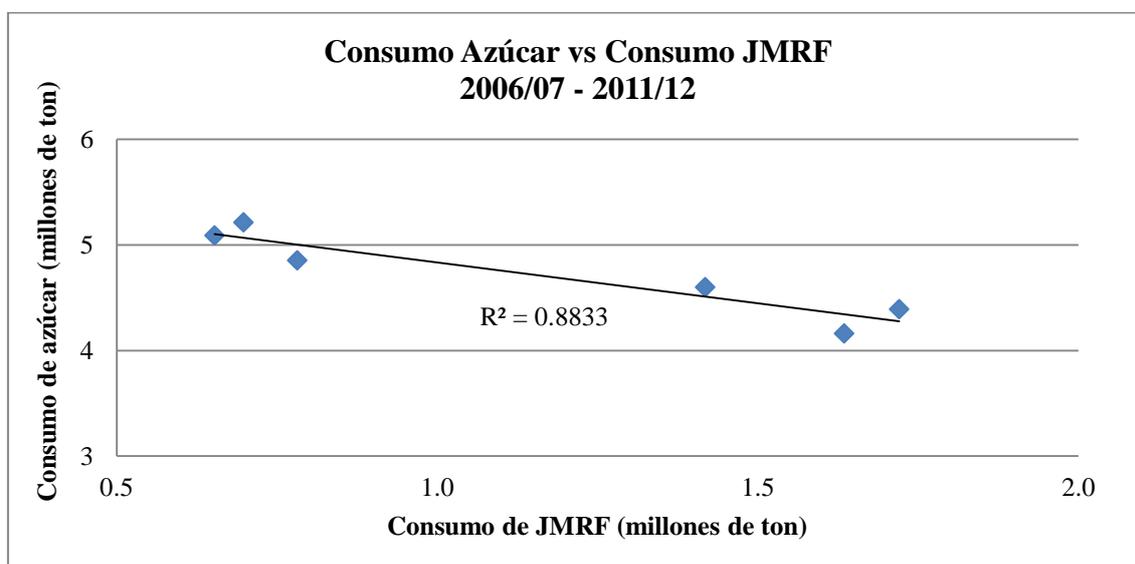
**Figura 10.** Evolución de la importación de fructosa del ciclo 1995/96 al 2011/12.

Fuente: elaboración propia con datos del Departamento de Agricultura de E.U. [USDA, 2013].

<sup>5</sup> La fructosa es una forma de azúcar que no proviene de la caña, se refiere al Jarabe de Maíz de Alta Fructosa. En años recientes la fructosa ha sido asociada a obesidad pues contiene más contenido energético por unidad física.

Las acciones descritas anteriormente llevaron a que en 2001 cayera la importación de la fructosa en el país y a que Estados Unidos presentara quejas ante la Organización Mundial de Comercio por considerar ilegales la aplicación de la demanda “antidumping” y del IEPS. Finalmente, en el 2006 la Secretaría de Economía publica un acuerdo en el Diario Oficial de la Federación, en el cual cede y permite la entrada de 250 mil toneladas de fructosa libre de arancel, y se menciona que el cupo para la fructosa se administrará mediante permisos previos de importación, esto con el fin de facilitar la transición al libre comercio a partir del 1 de enero de 2008. Podemos ver en la gráfica de la figura 10 que la importación de fructosa está creciendo aceleradamente.

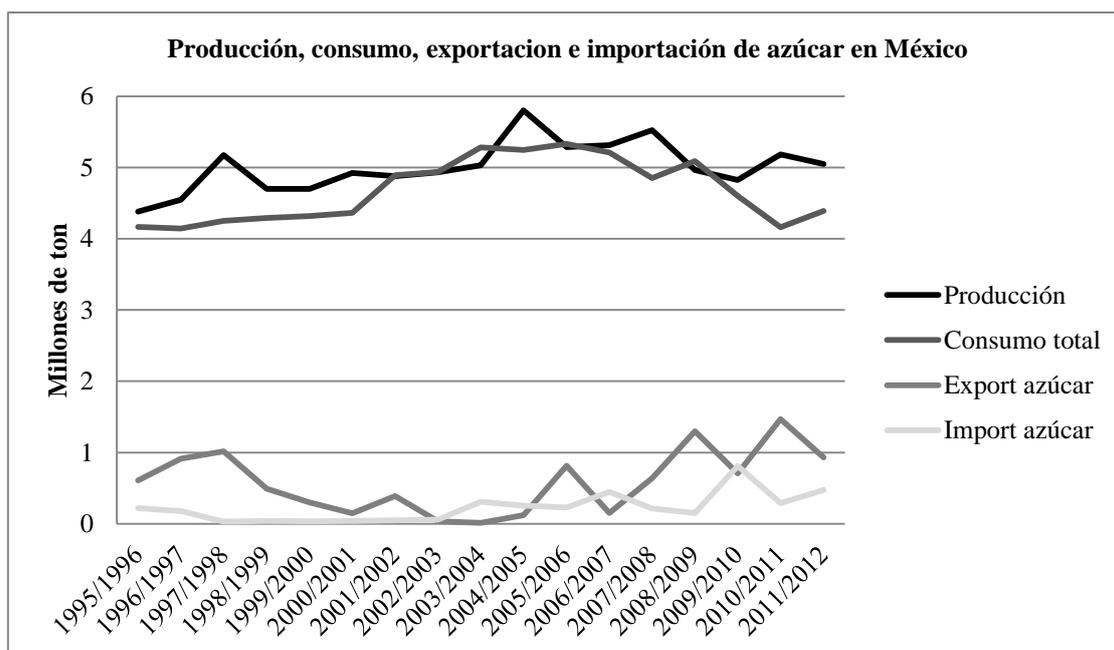
La fructosa sustituye directamente al azúcar en los procesos industriales de endulzamiento de bebidas, si graficamos el consumo nacional de azúcar contra el de fructosa (Figura 11) vemos que a partir de la apertura del mercado para el edulcorante de origen estadounidense el consumo de azúcar ha venido disminuyendo en nuestro país.



**Figura 11.** Relación entre el consumo de fructosa y de azúcar en México a partir de la apertura a la importación de fructosa. Periodo de 2006/07 a 2011/12.

Fuente: elaboración propia con datos del Departamento de Agricultura de E.U. [USDA, 2013].

Sin embargo, en el mercado interno sigue dominando el azúcar. En la Figura 12 se aprecia que al existir excedentes en una zafra, estos van a exportación y si hay faltantes se aumentan las importaciones.



**Figura 12.** Mercado del azúcar en México de 1995/96 a 2011/12.

Fuente: elaboración propia, con datos del Departamento de Agricultura de EEUU [USDA, 2013].

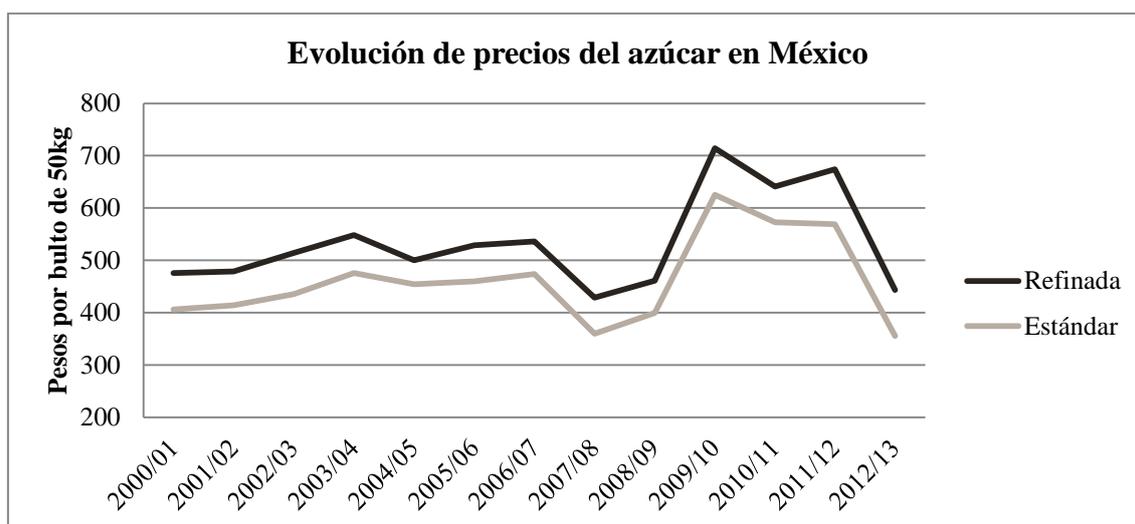
Según datos del CONADESUCA (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar) para la zafra 2011/12 la totalidad de las exportaciones de azúcar fueron destinadas a Estados Unidos, del total de azúcar exportado un 65% fue de azúcar refinada y el resto de azúcar estándar. El 81% de las exportaciones fueron realizadas directamente por los ingenios azucareros, de las cuales el 14% contó con los beneficios del programa de fomento de la Industria Manufacturera, Maquiladora y de Servicios de Exportación (IMMEX), que permite a los industriales importar temporalmente los bienes necesarios para su proceso productivo sin cubrir el pago del impuesto general de importación, del impuesto al valor agregado y, en su caso, de las cuotas compensatorias [SAGARPA, 2013]. El 19% del azúcar de exportación restante fue exportado por otras empresas comercializadoras.

### I.2.6 Comportamiento del precio del azúcar en México y el mundo

El precio de venta del azúcar de caña en nuestro país ha sido fluctuante en los últimos años, en la Figura 13 se observa el precio por bulto de 50 kg de azúcar tanto estándar como refinada desde la zafra 2000/01 hasta la 2012/13 a precios constantes de 2010. Del ciclo 2007/08 al 2011/12 los precios del azúcar aumentaron, pero durante el ciclo

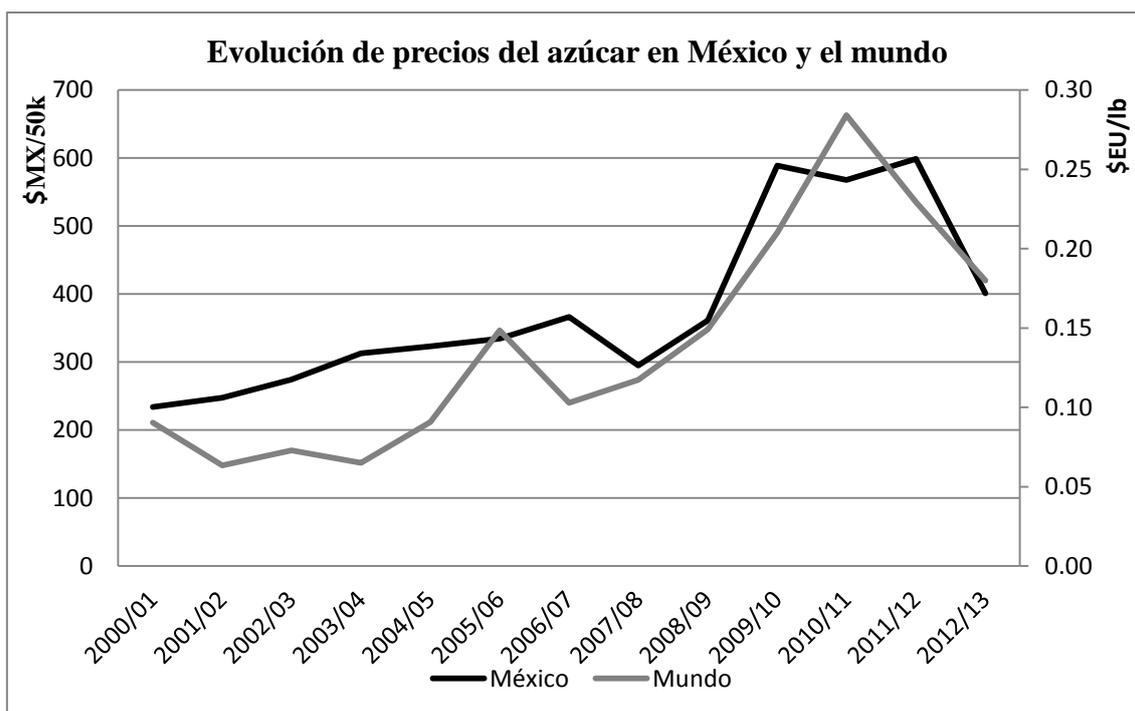
2012/13 se dio una caída en el precio del azúcar del mercado nacional, la cual los industriales azucareros del país atribuyen a la creciente sustitución del azúcar por fructosa estadounidense, ya que ésta ha entrado a México en los últimos 10 años a un precio menor a los 325 pesos bulto de 50 kg, mientras que el azúcar estándar se ha mantenido alrededor de los 500 pesos por bulto [Secretaría de Economía, 2012].

Sin embargo, si analizamos la evolución del precio mundial del azúcar vemos que para el mismo periodo ha mostrado un comportamiento muy similar al del caso mexicano. En la Figura 14 vemos la evolución tanto del precio del azúcar estándar en el mercado mundial, como el del mercado nacional. Actualmente el comercio de los endulzantes se realiza prácticamente en todo el mundo, y hace menos de 5 años se han incorporado al mismo los grandes países asiáticos de China e India, como lo describimos previamente.



**Figura 13.** Precios del azúcar en México, a pesos constantes de 2010, del ciclo 2000/01 al 2012/13.

Fuente: elaboración propia con datos de la SAGARPA [SAGARPA, 2013].



**Figura 14.** Precios corrientes del azúcar estándar en México y en el mundo. Zafras 2000/01 a la 2012/13.

Fuente: elaboración propia con datos de la SAGARPA [SAGARPA, 2013] y del Departamento de Agricultura de EEUU. [USDA, 2013].

## I.3 ESTRUCTURA EMPRESARIAL Y MARCO NORMATIVO DEL SECTOR

### I.3.1 Organizaciones de la industria azucarera

En México existen ocho asociaciones que representan los intereses de los diferentes grupos involucrados en las actividades de la agroindustria azucarera.

#### *Cámara Nacional de las Industrias Azucareras y Alcohólicas (CNIAA)*

Constituida el 31 de agosto de 1942. Tiene la representación de 36 ingenios azucareros, su objetivo central es representar los intereses generales de las actividades industriales azucareras y alcohólicas, así como atender todas las cuestiones que pueden afectarlas; proveer las medidas que tiendan a su desarrollo y participar en la defensa de los intereses particulares de sus asociados. Está afiliada a la Confederación de Cámaras Industriales de los Estados Unidos Mexicanos (CONCAMIN) [Manual Azucarero, 2013].

*Unión Nacional de Cañeros, A.C. (UNC)*

Fundada en 1973, la UNC está afiliada a la Confederación Nacional de Productores Rurales (CNPR), a la Confederación Iberoamericana de Productores de Caña de Azúcar (CIPCA), así como al Organismo Internacional del Azúcar (ISO), a la Asociación Mundial de Productores de Caña de Azúcar y Remolacha (AMPCAR), y a la Federación Internacional de Productores Agrícolas (FIPA) [UNC, reseña histórica, 2013].

*Asociación Nacional de Empresas Azucareras, A.C. (ANEA, A.C.)*

Constituida el 20 de junio de 2008, tiene la representación de 19 ingenios azucareros del país [Manual Azucarero, 2013].

*Asociación de Técnicos Azucareros de México, A.C. (ATAM)*

Constituida el 17 de septiembre de 1946. A esta asociación se encuentran aliados técnicos de varias partes del mundo, así como los principales proveedores de la industria. Sus objetivos son la investigación, el desarrollo y la divulgación de tecnología y administración de la agroindustria azucarera y sus derivados. La ATAM trabaja para que sus asociados mantengan un alto nivel de capacidad técnica y administrativa, optimizando la productividad, promoviendo y fomentando relaciones con organismos nacionales e internacionales similares, para intercambiar experiencias y conocimientos.

*Sindicato de Trabajadores de la Industria Azucarera y Similares de la República Mexicana (STIASRM)*

Formado el 8 de enero de 1937. Es una organización de trabajadores de diversos oficios que prestan sus servicios en los ingenios azucareros, fábricas de fructosa, empresas conexas, procesadoras de bagazo, fábricas de celulosa de caña, empacadoras de bagazo, plantas desmeduladoras de bagazo, fábricas de ron, destilerías de alcohol, de etanol, de aguardiente, y trapiches panocheros y piloncilleros [STIASRM, 2013].

*Unión Nacional de Productores de Caña de Azúcar, CNC., A.C.*

Afiliada a la Confederación Nacional Campesina (CNC) [Manual Azucarero, 2013].

*Confederación Nacional de Propietarios Rurales, A.C. (CNPR, A.C.).*

[Manual Azucarero, 2013].

### *Federación Nacional Azucarera, CROM*

Afiliada a la Confederación Regional Obrera Mexicana (CROM) [Manual Azucarero, 2013].

De los ocho grupos mencionados los más influyentes son la CNIAA y la UNC. La CNIAA publica anualmente el “Manual Azucarero Mexicano”, documento en el cual muestra información sobre los grupos industriales azucareros, las organizaciones, un registro del volumen de producción de azúcar, sucesos históricos, etc. Por su parte, la UNC en su página de internet tiene disponible información estadística por ingenio azucarero, por estado federativo y un colectivo nacional. La información que reportan estas dos organizaciones es recolectada ingenio por ingenio y coincide entre sí.

### **I.3.2 Política pública y marco normativo**

La ley central para la regulación tanto de las actividades agrícolas como industriales del sector azucarero en México es la denominada “Ley para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar” (LDSCA), publicada en 2005. Al hacerse oficial esta ley se constituyó el Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA), con el objetivo de coordinar las actividades previstas en la LDSCA relacionadas con la agroindustria de la caña de azúcar. En su página oficial en internet presentan su misión y visión [CONADESUCA, 2013]:

#### Misión

*“Somos una entidad que coordina acciones de vinculación, promoción, fomento, competitividad e innovación para el desarrollo sustentable de la agroindustria de la caña de azúcar, a través de la planeación y ejecución de políticas públicas que den certidumbre en la toma de decisiones de los actores, soportado en el Sistema Integral de Información y el CICTCAÑA para atender los retos de los mercados nacional e internacional de edulcorantes y bioenergía.”*

#### Visión

*“Ser un organismo público moderno que cuenta con plena confianza del sector agroindustrial de la caña de azúcar, para el diseño de políticas y la instrumentación de*

*estrategias que impulsan su competitividad y productividad, que se ubica como referente en la generación y difusión de información para la toma de decisiones, por medio de la gestión transparente e imparcial, que genera certidumbre entre sus diversos actores, que promueve la sustentabilidad a través de la investigación y desarrollo del sector e impulsa la diversificación que demandan los mercados y tendencias mundiales. En el año 2025, México se ubicará entre los principales niveles de competitividad y productividad de la agroindustria cañera en el mundo.”*

El CONADESUCA reconoce para el sector agroindustrial azucarero el siguiente marco jurídico:

Leyes:

- Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar
- Ley Federal de las Entidades Paraestatales
- Ley de Adquisiciones, Arrendamientos, y Servicios del Sector Público

Reglamentos:

- Reglamento de la Ley de Desarrollo Rural
- Reglamento de la Ley Federal de las Entidades Paraestatales

Otros:

- Contrato uniforme de compra-venta y de siembra, cultivo, cosecha entrega y recepción de la caña de azúcar
- DOF. Precio de referencia del azúcar base estándar para el pago de la caña de azúcar zafra 2012/2013

En la Tabla 3 se resume la relación de cada disposición regulatoria con la industria azucarera.

Tabla 3

Disposiciones jurídicas mexicanas para la agroindustria azucarera.

<b>Disposición</b>	<b>Relación con la industria azucarera</b>
<b>Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (LDSCA)</b>	Norma las actividades de la agricultura y la integración sustentable de la caña de azúcar, de los procesos de la siembra, el cultivo, la cosecha, la industrialización y la comercialización de la caña de azúcar, sus productos, subproductos, coproductos y derivados.
<b>Ley Federal de las Entidades Paraestatales (LFEP)</b>	Regula la organización, funcionamiento y control de las entidades paraestatales de la Administración Pública Federal.
<b>Ley de Adquisiciones, Arrendamientos, y Servicios del Sector Público (LAASSP)</b>	Tiene por objeto reglamentar la aplicación del artículo 134 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de las adquisiciones, arrendamientos de bienes muebles y prestación de servicios de cualquier naturaleza, que realicen: ... V. Las empresas de participación estatal mayoritaria y los fideicomisos en los que el fideicomitente sea el gobierno federal o una entidad paraestatal,
<b>Ley de Desarrollo Rural Sustentable (LDRS)</b>	Artículo 179.- Se considerarán productos básicos y estratégicos, con las salvedades, adiciones y modalidades que determine año con año o de manera extraordinaria, la Comisión Intersecretarial, con la participación del Consejo Mexicano y los Comités de los Sistemas-Producto correspondientes, los siguientes: ... II. caña de azúcar;
<b>Reglamento de la LFEP</b>	Reglamenta la LFEP en lo que toca a la constitución, organización, funcionamiento, control y extinción de las entidades paraestatales.
<b>Reglamento de la LDRS</b>	Reglamenta la LDRS en materia de organismos, instancias de representación, sistemas y servicios especializados, con pleno respeto a los ámbitos de competencia de los tres órdenes de gobierno.
<b>Contrato uniforme de compra-venta y de siembra, cultivo, cosecha entrega y recepción de la caña de azúcar</b>	Disposición contractual mediante la cual el productor de caña se compromete a vender en su totalidad la producción de su área cultivada a determinado ingenio, y por su parte el ingenio a comprarla bajo los requerimientos acordados.
<b>DOF. Precio de referencia del azúcar base estándar para el pago de la caña de azúcar zafra 2012/2013</b>	Aviso por el que se da a conocer el precio de referencia del azúcar base estándar para el pago de la caña de azúcar de la zafra 2012/2013, propuesto por el Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar.

Elaboración propia, con datos de la CONADESUCA [CONADESUCA, 2013].

## **CAPÍTULO II. PROCESO DE PRODUCCIÓN Y NECESIDADES ENERGÉTICAS DEL MISMO**

El presente capítulo presenta una revisión del proceso de producción del azúcar, desde las labores agrícolas, hasta el proceso de refinación. Asimismo, orienta a las áreas de oportunidad de uso más eficiente de la energía, principalmente en la cogeneración.

### **II.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN DEL AZÚCAR**

Los procesos de producción del azúcar se diferencian entre sí según el tipo de azúcar que se desee obtener. Actualmente se comercializan principalmente dos tipos de azúcar en el mundo: azúcar estándar y azúcar refinado; en México a nivel comercial se produce azúcar estándar, refinado, blanco y mascabado. La diferencia entre estos productos radica principalmente en la pureza (contenido de sacarosa) y el color, los ingenios azucareros mexicanos producen en su mayoría azúcar estándar. La fabricación del azúcar estándar, en general, se realiza mediante una sucesión de pasos, los cuales se pueden resumir en los siguientes:

1. Labores del campo
2. Extracción del jugo
3. Clarificación
4. Evaporación
5. Cristalización
6. Centrifugación
7. Secado, enfriado y envase

Aunque las actividades de transformación entre los ingenios azucareros son similares, existen diferentes modificaciones tecnológicas y operativas para cada una de las etapas mencionadas. No es el propósito de este trabajo describir a detalle cada parte de la fabricación del azúcar ni las instalaciones de las fábricas, lo que se desea es explicar de manera general el proceso e identificar los usos de la energía en el mismo; en este

contexto se presenta a continuación una breve descripción del proceso de fabricación del azúcar (en la figura 15 se presenta el diagrama de producción típico de un ingenio).

### **II.1.1 Labores del campo**

Comienza con la preparación del terreno: estudios del suelo y la labranza, ya sea manual o mecánica. En seguida tiene lugar la siembra de la caña, la cual se realiza en un agujero poco profundo o en surcos en la parte superior de un camellón formado con tierra. Poco después de la siembra se añaden los herbicidas y el fertilizante se adiciona después de que empieza el crecimiento. El cultivo necesita grandes cantidades de agua, ya sea por riego o precipitación; en las regiones de regadío se suele limitar el agua antes de la cosecha para concentrar la sacarosa en la caña. La meta de la cosecha es entregar al ingenio tallos de caña de buena calidad, es decir con un alto contenido de sacarosa y poca basura. La costumbre de quemar los campos de caña antes de la cosecha es con el propósito de hacer más fácil la limpieza de la planta cuando se corta manualmente, se dice que un cortador experto puede cortar una tonelada de caña por hora, a este tiempo de corte hay que agregar una hora para limpiar las hojas y puntas de la caña verde y media hora para la misma actividad en la caña quemada [Chen, 1991]. La necesidad de eliminar hojas y puntas se debe a que las hojas tienen un alto contenido de sílice, que contribuye al desgaste de los rodillos de los molinos, y a que las puntas absorben sacarosa durante la molienda, reduciendo el rendimiento en fábrica. La basura se puede recolectar y utilizar como combustible en los hornos (esta materia orgánica representa alrededor de un 20% del peso total de la planta, incluyendo raíces y cepa) como lo hacen en algunos ingenios Brasileños, esto se facilita mediante la cosecha mecánica ya que las máquinas separan la basura y la caña triturable. Sin embargo, los fabricantes de azúcar prefieren la caña quemada y cortada manualmente porque va más limpia que la cosechada por máquinas y la quema previa de la caña concentra un poco la sacarosa y hace más fácil la extracción en el ingenio [Chen, 1991].

### **II.1.2 Extracción del jugo**

La temporada de molienda, conocida como zafra, es el periodo durante el cual se cosecha y procesa la caña de azúcar. Estos pasos deben ser simultáneos para evitar el

almacenamiento y deterioro de la planta. En general, la zafra completa se realiza durante los meses más frescos en los dos hemisferios, en México tiene lugar de noviembre de un año a mayo o junio del siguiente aproximadamente.

La primera etapa del procesamiento del azúcar es la extracción del jugo mediante una serie de molinos. Primero, la caña se prepara para la molienda mediante cuchillas giratorias que cortan los tallos en pedazos pequeños que pasan en seguida a la unidad de molienda, la cual cuenta con varios molinos que utilizan rodillos por los que se hace pasar sucesivamente la caña. Para ayudar a la extracción del jugo se aplican aspersiones de agua o guarapo (el jugo extraído en la molienda) diluido. Este proceso, conocido en los ingenios azucareros como imbibición, maceración o saturación, puede presentar muchas modificaciones; en las prácticas más eficientes más del 95% de la sacarosa de la caña pasa al guarapo, este porcentaje se conoce como Pol de la extracción [Chen, 1991]. El bagazo final que sale del último molino contiene el azúcar no extraído, fibra y alrededor de un 50% de agua. Este material pasa por lo general a las calderas como combustible, pero también se suele prensar para elaborar papel u otros productos.

### **II.1.3 Clarificación**

El jugo procedente de la molienda es ácido y de color verde oscuro, el consiguiente proceso de clarificación o purificación busca remover las impurezas solubles e insolubles del mismo. Se utiliza alrededor de medio kilogramo de cal por tonelada de caña para neutralizar la acidez del guarapo, formando sales insolubles de calcio (fosfato de calcio), y se calienta el jugo hasta la ebullición para coagular las grasas, ceras y gomas, que se precipitarán atrapando los sólidos en suspensión y las partículas más finas [Chen, 1991]. Los lodos que han sido sedimentados se filtran en tambores rotativos, el jugo obtenido del filtro se regresa al proceso de clarificación o se va directamente al jugo clarificado y la torta de la prensa, o cachaza, se desecha o se utiliza como fertilizante en los campos. El jugo clarificado ahora es transparente y pasa a los evaporadores.

#### **II.1.4 Evaporación**

El jugo clarificado contiene aproximadamente 85% de agua, de este porcentaje se eliminan tres cuartas partes en los evaporadores al vacío de múltiple efecto, los cuales consisten en una sucesión de celdas de ebullición al vacío dispuestas en serie. Cada cuerpo subsiguiente tiene un vacío más alto y hierve a una temperatura más baja, de esta manera el vapor de un cuerpo hace hervir el jugo del siguiente, es por esto que se llama de múltiple efecto, ya que el vapor introducido en el primer cuerpo hace la evaporación en los demás. El vapor final pasa a condensación, y el jarabe o meladura se obtiene continuamente del último cuerpo con aproximadamente 65% de sólidos y 35% de agua. Este jarabe puede volverse a clarificar, añadiendo cal y ácido fosfórico y aereándolo junto con la adición de un polímero floculante.

#### **II.1.5 Cristalización**

Los equipos utilizados para la solidificación son conocidos como tachos, que son evaporadores al vacío de simple efecto, donde el jarabe se evapora hasta saturarse de azúcar. Para llevar a cabo la cristalización se añaden semillas de los cristales de azúcar, y según se evapora el agua se va añadiendo más jarabe. El crecimiento de los cristales continúa hasta que se llena el tacho, cuando este está totalmente lleno todos los cristales tienen el tamaño deseado y se forma una masa de cristales y jarabes conocida como masa cocida o templa, la cual se descarga por medio de una válvula de pie a un mezclador o cristalizador separado. La ebullición de esta masa cocida y la re-ebullición de las mieles se llevan a cabo utilizando equipos seleccionados para ajustarse a diferentes condiciones de operación.

#### **II.1.6 Centrifugación**

Las centrífugas son tambores cilíndricos suspendidos de un eje que tienen paredes laterales perforadas forradas por dentro con tela metálica, entre la tela y las paredes hay láminas metálicas con 400 a 600 perforaciones por pulgada cuadrada, y giran a velocidades entre 1,000 y 1,800 rpm [Chen, 1991]. El revestimiento interior retiene los

cristales, que suelen lavarse con agua, y las mieles pasan a través de las perforaciones. Se purga el azúcar y se cortan las mieles, dejando listo el equipo para recibir otra carga. En el sistema mostrado en la Figura 15 la primera ebullición produce azúcar cruda y mieles “A” que se regresan al tacho al vacío para que hiervan de nuevo y se forme la masa cocida “B”. El azúcar A se mezcla con el B y forman el producto comercial llamado *azúcar crudo* o *estándar*, las mieles B tienen una pureza mucho más baja y se vuelven a hervir sobre un pie de cristales formando la masa cocida “C” o de grado bajo, las cuales permanecen varios días en los cristalizadores, donde se enfrían y mantienen en movimiento por agitadores. El azúcar final C se mezcla con el jarabe y se utiliza como semilla para las masas cocidas A y B. Las mieles o *melazas* finales, un material denso y viscoso con aproximadamente una tercera parte de sacarosa, una quinta parte de azúcares reductores y el resto de ceniza, compuestos orgánicos diferentes al azúcar y agua, sirve como base para la alimentación del ganado, fabricación de alcohol industrial, producción de levadura, etanol y otros.

#### **II.1.7 Secado, enfriado y envase**

Un secador típico en un ingenio azucarero está compuesto por uno o más tambores rotativos en paralelo, recibe vapor o aire caliente junto con los cristales de azúcar, removiendo la humedad hasta que el producto sale con un 0.02% o menos [SRH, 1975]. Después de pasar por el secador el producto se envía a los enfriadores, que son básicamente los mismos tambores que los secadores pero sin los elementos de calentamiento. El azúcar se transporta a silos o directamente a su envase, ya sea a granel o en paquetes.

#### **II.1.8 Refinación del azúcar**

Como ya se mencionó, los ingenios del país producen en su mayoría azúcar estándar, sin embargo aún existen algunos muy importantes que elaboran azúcar refinado. La refinación del azúcar de caña es un proceso que requiere de grandes instalaciones, la capacidad va de 500 a 5000 toneladas o más de azúcar por día. El proceso puede dividirse en seis o siete pasos aparentemente sencillos, aunque en la práctica son

complicados ya que la tecnología y el control del proceso implica muchos detalles. Las refinерías se pueden dividir en tres clases:

1. Productoras de muchas calidades de azúcar, incluyendo especialidades.
2. Productoras de azúcar granulado o unas pocas variantes.
3. Productoras exclusivas de jarabes.

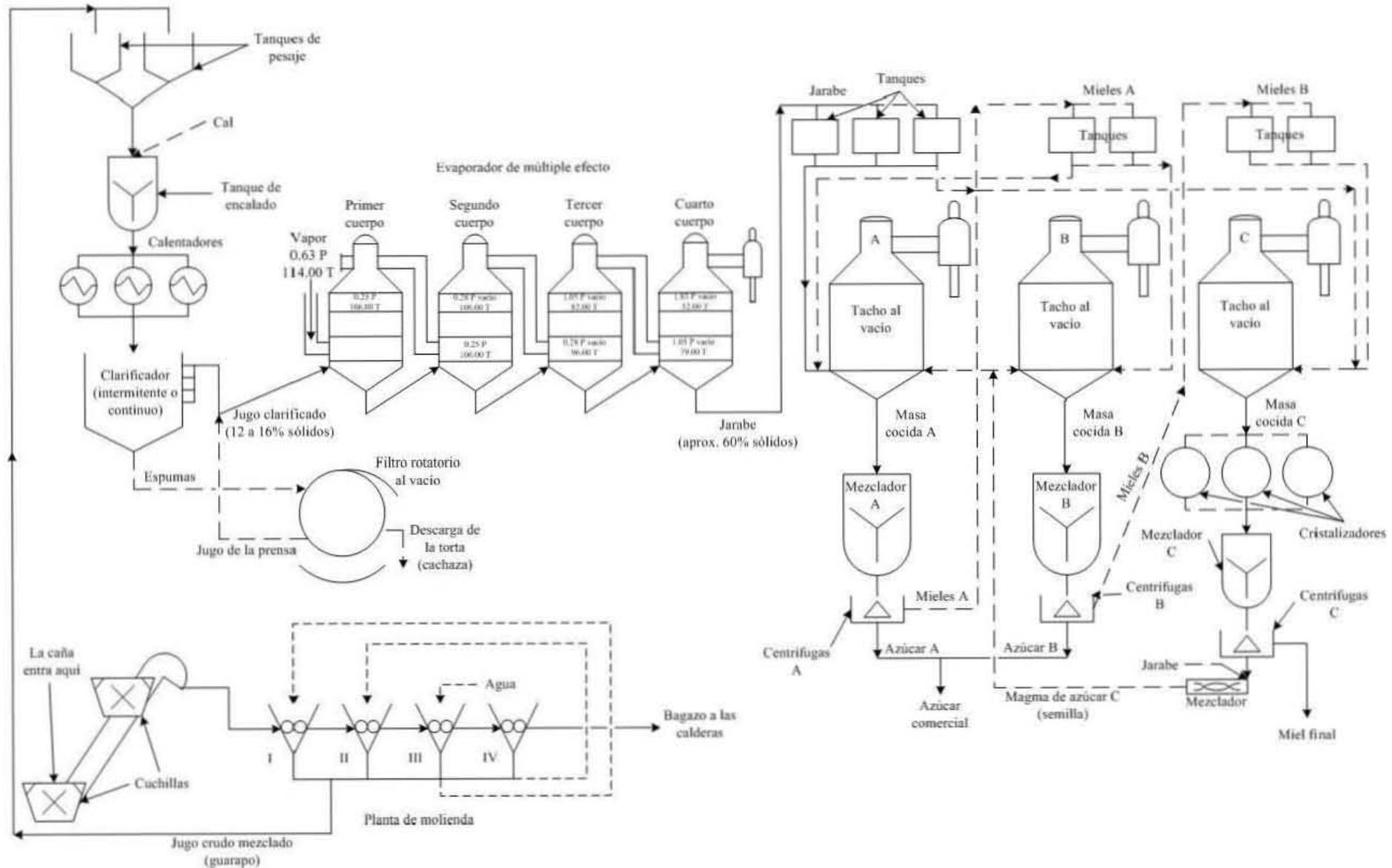
La mayoría de las refinерías se ubican dentro de las primeras dos clases y utilizan carbón activado como el principal decolorante. Las refinерías de jarabe se subdividen en dos tipos: las que usan sistemas de afinación, clarificación, casa de carbón e instalaciones de recuperación y aquellas que solo funden el azúcar crudo entero y decoloran con carbones vegetales activados.

El proceso de producción descrito se representa en la Figura 15, a excepción del primer y último paso (labores del campo y refinación).

## **II.2 CONSUMO Y SUMINISTRO DE LA ENERGÍA EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN**

### **II.2.1 Características generales**

La industria azucarera en México es de las más intensivas en el consumo de energía, durante la zafra 2011/12 consumió 98.54 PJ (con base en datos de la UNC), siendo una de las ramas industriales con un mayor consumo energético en el país: en el año 2011 la industria básica del hierro y del acero consumió 168.97 PJ, la industria cementera 120.47 PJ y la Petroquímica de PEMEX 98.45 PJ, según el Balance Nacional de Energía de 2012 [SENER, 2012]. Las fuentes de energía que utiliza el sector azucarero para abastecer sus necesidades energéticas son: el bagazo, el combustóleo y la energía eléctrica de la red, que para el periodo 2011/12 representaron el 96.3%, 3.5% y 0.18% del suministro energético del sector, respectivamente [UNC, 2013].



**Figura 15** Diagrama de producción de azúcar estándar. Unidades: P (kgf/cm<sup>2</sup>); T (°C).

Fuente: Elaboración propia. *Nota:* los datos de Presión y Temperatura son ilustrativos, los valores varían según el lugar y el esquema utilizado.

El consumo de energía en el proceso de transformación varía de un ingenio a otro debido a varios factores, por ejemplo:

- El esquema y la tecnología de los servicios energéticos de la planta (sistema de cogeneración).
- La tecnología utilizada en el proceso de transformación: entre más eficiente sean los equipos involucrados en la extracción de sacarosa, menor demanda de energía tendrá el proceso.
- La operación que realice el ingenio tanto del proceso productivo como del sistema de cogeneración.
- La calidad de la materia prima utilizada: entre mayor sea el índice KARBE (kilogramo de azúcar recuperable base estándar) se facilita la extracción de la sacarosa y por lo tanto se reduce el consumo de energía.

El comportamiento del consumo de energía en todos los ingenios azucareros es diferente debido a la variabilidad de los factores mencionados. Sin embargo, haciendo una revisión tecnológica se pueden ilustrar valores típicos de consumo energético para cada parte del proceso productivo [Siddharta y Rajkumar, 2001]. En la Tabla 4 se presenta el consumo de energía de las diferentes etapas en un ingenio productor de azúcar estándar al procesar una tonelada de caña. Para la transformación de energía primaria a energía final se considera un 30% de eficiencia en la conversión de energía primaria a energía eléctrica o mecánica, y un 80% para la conversión de energía primaria a energía térmica [Siddharta y Rajkumar, 2001].

El suministro de la energía en los ingenios azucareros se realiza con una planta de cogeneración de energía, en la que se utilizan el bagazo y/o el combustóleo como combustible en las calderas, con el calor generado se produce vapor y a partir de éste se obtiene la energía térmica, mecánica y eléctrica necesaria para el funcionamiento de los equipos de la instalación.

**Tabla 4**

Consumo teórico de energía en cada etapa del procesamiento de una tonelada de caña.

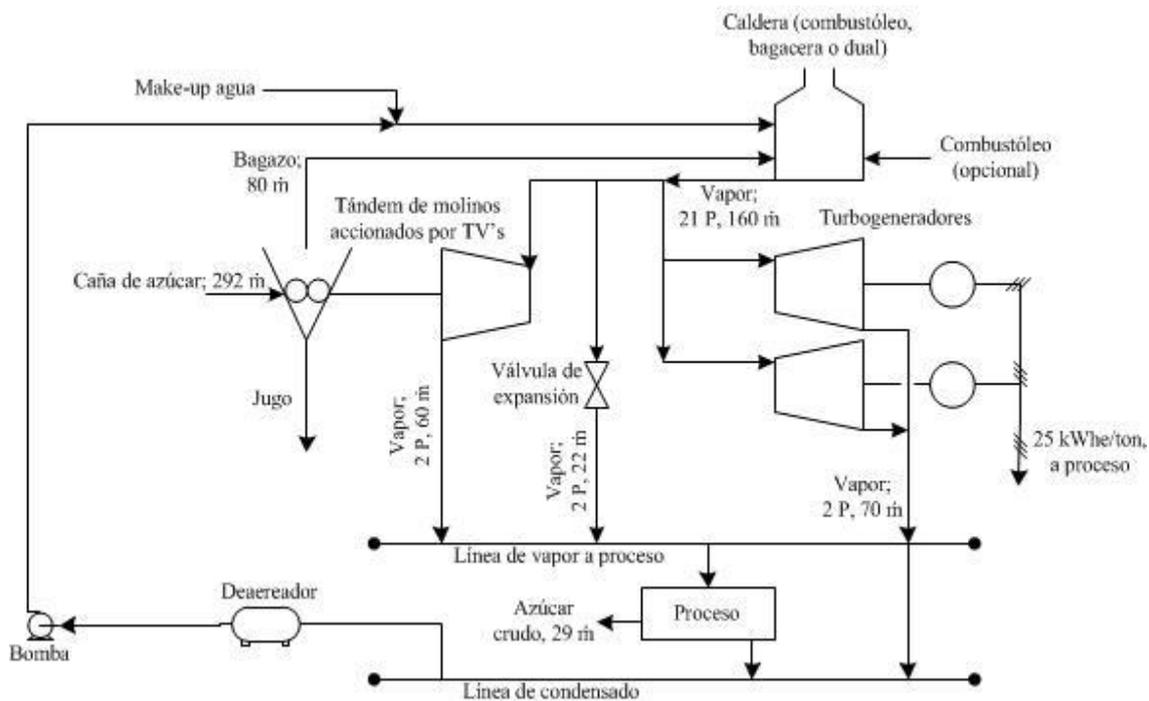
<b>Etapa del proceso</b>		<b>Energía</b>	
<b>Energía mecánica/eléctrica teórica</b>	<b>Energía final (kWh/t)</b>	<b>Energía primaria (MJ/t)<sup>a</sup></b>	<b>% de consumo energético</b>
Preparación de la caña	4.89	58.68	4.03%
Molienda de la caña	7.00	84.00	5.77%
Cristalización	8.00	96.00	6.59%
Centrifugación	4.00	48.00	3.30%
<b>Total energía mecánica/eléctrica</b>	<b>23.89</b>	<b>286.68</b>	<b>19.68%</b>
<b>Energía térmica teórica requerida</b>	<b>Energía final vapor (t/t)</b>	<b>Energía primaria (MJ/t)<sup>b</sup></b>	<b>% de consumo energético</b>
Calentamiento del guarapo	0.06	270.00	18.54%
Evaporación	0.14	630.00	43.25%
Secado	0.06	270.00	18.54%
<b>Total energía térmica</b>	<b>0.26</b>	<b>1170.00</b>	<b>80.32%</b>
		<b>Consumo total (MJ/ton) =</b>	<b>1456.68</b>

Fuente: Siddharta y Rajkumar, 2001.

- a. Considerando una eficiencia de conversión del 30% de energía primaria a energía mecánica-eléctrica.  
 b. Considerando una eficiencia de conversión del 80% de energía primaria a energía térmica.

## II.2.2. Esquema típico de cogeneración en la industria azucarera

En la Figura 16 se muestra un ejemplo de un sistema de cogeneración en el cual el objetivo es satisfacer las necesidades energéticas térmicas, eléctricas y mecánicas de un ingenio productor de azúcar estándar. En promedio, un ingenio productor de azúcar estándar necesita por cada tonelada de caña molida alrededor de 25 kWh de electricidad y 0.5 toneladas de vapor [Alonso-Pippo et al., 2008].



**Figura 16.** Esquema de cogeneración tradicional de un ingenio azucarero. P ( $\text{kgf/cm}^2$ ),  $\dot{m}$  (t/h).

Fuente: elaboración propia, con base en Alonso-Pippo et al. (2008). *Nota:* los valores son ilustrativos, estos varían según el lugar y el arreglo utilizado.

### II.2.3 Esquema de cogeneración alternativo

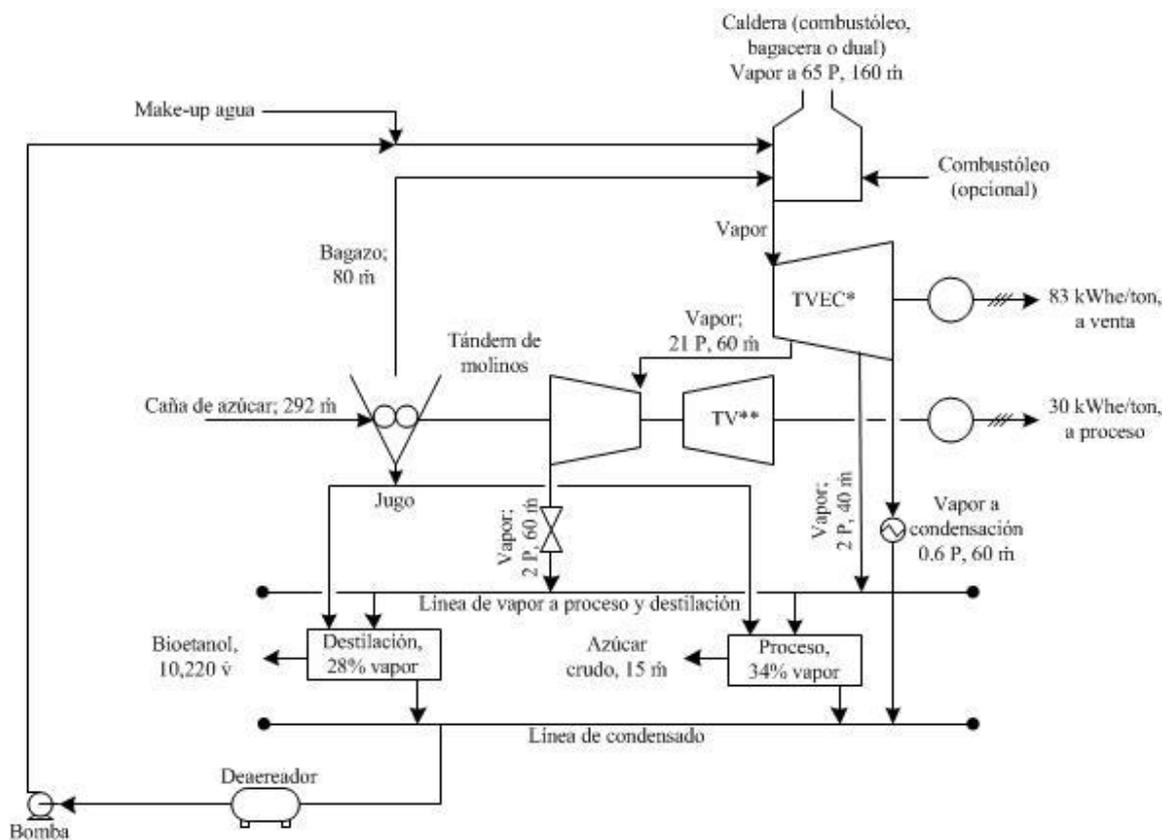
El sistema de cogeneración de la Figura 16 puede modificarse si se desea obtener una mayor producción de energía tanto eléctrica como térmica, cuyos excedentes se pueden utilizar para diferentes propósitos:

- Energía eléctrica excedente:
  - Integración a la red eléctrica para su venta.
  - Electrificación de los equipos de la planta, por ejemplo en la sustitución de las turbinas a vapor por turbinas eléctricas más eficientes.
- Energía térmica excedente:
  - Refinación de azúcar.
  - Elaboración de azúcares de especialidad.
  - Producción de alcohol de 96°, ron y/o bioetanol.

Cada ingenio en particular deberá adoptar un sistema dependiendo de las necesidades energéticas que demanden los productos que se comercialicen. En Brasil, por ejemplo,

desde hace varias décadas los ingenios azucareros son más rentables ya que incrementaron la eficiencia de sus sistemas de cogeneración aumentando la presión de generación del vapor, la energía eléctrica excedente la inyectan a la red para su venta y parte de la energía térmica la utilizan para la producción de bioetanol.

Teniendo en mente una diversificación en los productos de un ingenio veamos la Figura 17 en la que se presenta un esquema con el que se abastece de energía a un ingenio que destina un 34% del vapor para la producción de azúcar, un 28% para la destilación de etanol y el resto se va a condensación; y produce un total de 113 kWh de electricidad, de los cuales 30 kWh van a proceso y 83 kWh se integran a la red eléctrica.



**Figura 17.** Sistema de cogeneración para ingenio productor de azúcar, bioetanol y electricidad excedente.

Unidades: P ( $\text{kgf/cm}^2$ ),  $\dot{m}$  (t/h),  $\dot{v}$  (l/h). Fuente: elaboración propia, con base en Alonso-Pippo et al.

(2008). *Nota:* los datos son ilustrativos, varían según el arreglo utilizado.

\* TVEC: Turbina de vapor de extracción a condensación, con dos extracciones.

\*\* TV: Turbogenerador a vapor.

Como se mencionó anteriormente, cada ingenio debe diseñar el arreglo que mejor se adapte a sus necesidades, se debería seleccionar en principio el más rentable. Podemos

imaginarnos entonces que existen una gran cantidad de arreglos de cogeneración, cuya principal diferencia radica en la presión de generación del vapor. Las presiones que suelen emplearse en la industria azucarera son de 21, 42, 65 y 100 kgf/cm<sup>2</sup>, a las que les denominaremos baja, media, alta y muy alta presión, respectivamente. En la Tabla 5 se muestra un estimado de la energía eléctrica y del bagazo excedente de varios sistemas de cogeneración, partiendo de los parámetros de presión y temperatura del vapor generado, la información fue tomada de un estudio realizado para la industria azucarera Brasileña [BNDES, 2008] y de un artículo publicado en 2013 en el que se evalúa la productividad de diferentes tecnologías empleadas en el mismo país [Dantas, 2013].

**Tabla 5.**

Energía eléctrica excedente en sistemas de cogeneración de la industria azucarera

Parámetros del sistema		Consumo vapor proceso (ton/ton)	Periodo de generación	Uso de biomasa del campo	Electricidad excedente (kWh/ton caña)	Bagazo excedente (kg/ton caña)
<i>P</i> (kgf/cm <sup>2</sup> )	<i>T</i> (°C)					
21	300	0.50	zafra	no	10.4	33
42	400	0.50	zafra	no	25.4	50
42	450	0.50	zafra	no	28.3	48
65	480	0.50	zafra	no	57.6	13
65	480	0.35	zafra	no	71.6	0
100	530	0.40	zafra	no	86.0	0
65	480	0.50	todo el año	50%	139.7	13
65	480	0.35	todo el año	50%	153.0	0

Fuente: [BNDES, 2008], [Dantas, 2013].

En la Tabla 5 puede observarse que a mayor presión del vapor generado se obtienen mayores excedentes de electricidad y de bagazo, esto es debido a que las plantas de cogeneración de los ingenios funcionan siguiendo el ciclo termodinámico Rankine, en el cual es sabido que a mayor presión y temperatura se incrementa la eficiencia energética del mismo. En las últimas dos filas de la tabla se considera el uso de la biomasa de los campos (hojas y puntas de la caña), que actualmente en los cultivos de caña mexicanos se quema previamente a la cosecha para facilitar las labores de corte. Utilizando un sistema como el de la última fila se podrían generar, en un solo ingenio, 153 kWh de electricidad excedente por cada tonelada de caña molida.

## **CAPÍTULO III. CONSUMO DE ENERGÍA DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MÉXICO**

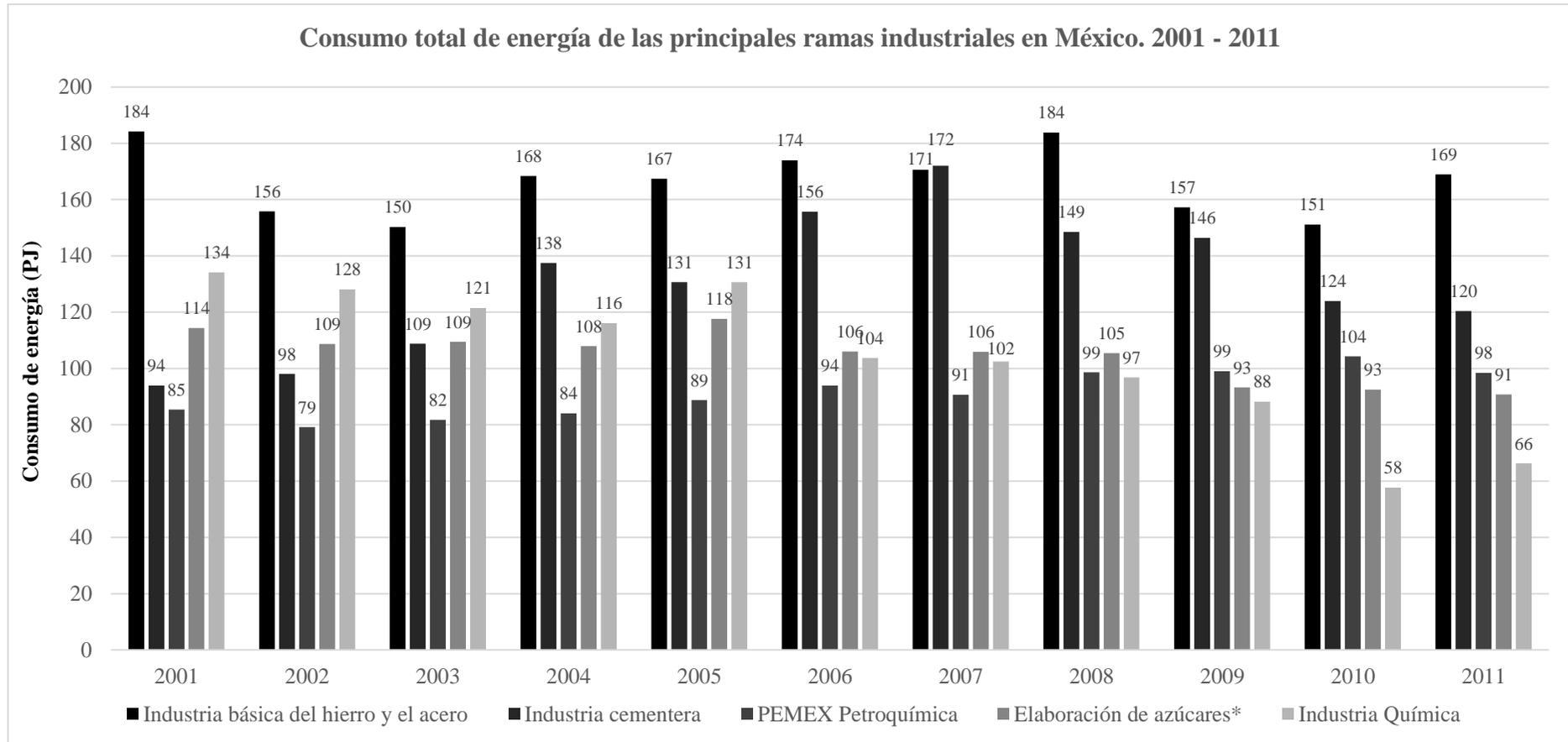
En este capítulo se analiza el consumo de energía e intensidades energéticas del sector azucarero mexicano, entendidas como energía por unidad física de producción, así como su comparación internacional.

### **III.1 BALANCE GLOBAL DE ENERGÍA**

#### **III.1.1 Situación de la elaboración de azúcares dentro del sector industrial**

La SENER (Secretaría de Energía) ubica a la industria azucarera en el sector industrial siguiendo el Sistema de Clasificación de Industrias de América del Norte (SCIAN) como la correspondiente a la rama 31131 denominada “Elaboración de azúcares”, sin mayor nivel de desagregación, en los Balances Nacionales de Energía (BNE) [SENER, 2012].

Al revisar el BNE del 2011, nos damos cuenta que a partir del año 2003 el bagazo utilizado por los ingenios azucareros para la generación de electricidad se deja de contabilizar como consumo final del sector industrial [SENER, 2012, Cuadro 49] y pasa a formar parte de la energía primaria a transformación, dentro de las centrales eléctricas de autogeneración [SENER, 2012, Cuadro 43], sin embargo para realizar un correcto balance de la energía consumida en la industria azucarera debemos considerar al bagazo como consumo energético propio de la rama industrial, ya que se utiliza para el autoabastecimiento de electricidad en los ingenios. Si sumamos dicha cantidad de energía obtenida del bagazo a los demás consumos de la elaboración de azúcares reportados en el BNE el resultado es el total de la energía final consumida en la elaboración de azúcares, de esta manera durante el periodo de 2001 a 2011 ubicamos al sector azucarero dentro de las cinco industrias más intensivas en el uso de energía en México. En la Figura 19 se puede ver el histórico del consumo de las siguientes cinco ramas industriales: 1) Industria básica del hierro y el acero, 2) Industria cementera, 3) PEMEX Petroquímica, 4) Elaboración de azúcares y 5) Industria química.



**Figura 18.** Evolución del consumo energético total de las cinco principales ramas industriales en México. 2001 – 2011.

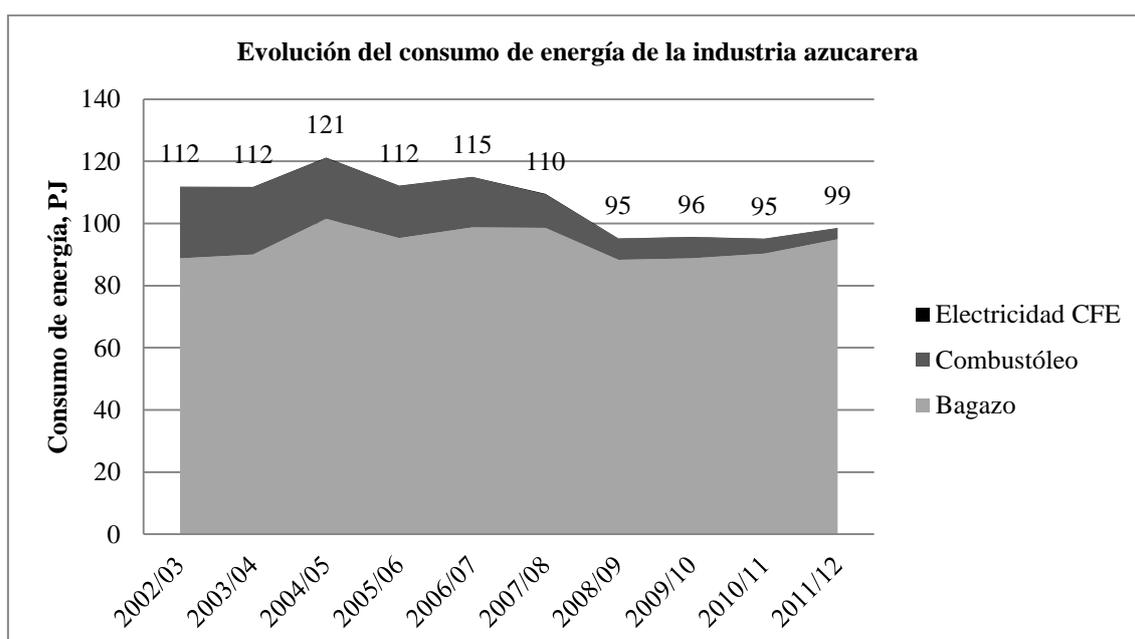
Fuente: elaboración propia con datos de la SENER [SENER, 2012].

\* Para el consumo energético de la “Elaboración de azúcares” a partir del año 2003 se sumó el bagazo consumido para generación eléctrica, ya que en el BNE lo pasaron del consumo del sector industrial al consumo de combustibles para generación de electricidad.

Como se mencionó previamente, la Secretaría de Energía lleva la estadística en años calendario, a diferencia de las organizaciones de industriales azucareros que lo hacen por periodo de zafra. Los datos anuales calculados de la manera indicada en el párrafo anterior, con información de la SENER, son similares a los que se obtienen por periodo de zafra con la información de la Unión Nacional de Cañeros. Para analizar el consumo energético de la industria azucarera recurriremos a los datos de la UNC debido a que además de la información energética también reporta datos agrícolas y de producción de todos los ingenios del país. El periodo de análisis será el que tiene disponible la UNC, desde la zafra 2002/03 hasta la 2011/12.

### III.1.2 Consumo final de energía de la industria azucarera. Zafras 2002/03 a 2011/12

La industria de transformación del azúcar satisface sus necesidades energéticas mediante tres fuentes principales: 1) el bagazo obtenido de la molienda de la caña, 2) el combustóleo, y 3) la electricidad comprada a la empresa eléctrica (en este caso la CFE). La matriz energética de esta rama industrial ha cambiado mucho a lo largo del periodo de análisis, en la Figura 19 podemos observar la evolución de la misma, así como la contribución de cada una de las tres fuentes de energía.

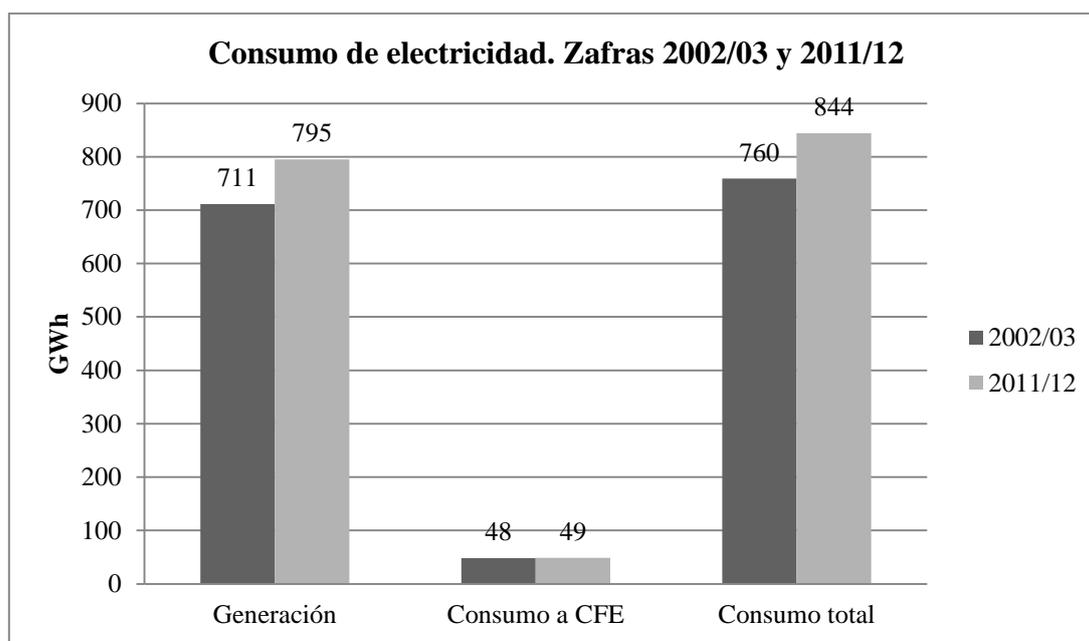


**Figura 19.** Evolución del consumo energético de la industria azucarera. Zafras 2002/03 a 2011/12.

Elaboración propia, con datos de la UNC [UNC, 2013].

De la zafra 2002/03 a la 2011/12 el consumo total de energía de la industria azucarera disminuyó un 11.9%, el de combustóleo se redujo en un 84.9%, la compra de electricidad de CFE aumentó un 1.1% y el consumo energético de bagazo incrementó un 6.9%.

En el Capítulo II se mencionó que el bagazo se utiliza como combustible en las calderas de los ingenios para generar vapor, este se consume como energía térmica en el proceso de transformación y se aprovecha también en los turbogeneradores de electricidad. El consumo eléctrico de los ingenios entonces se compone del autoconsumo (electricidad generada en el mismo ingenio) y de la compra de electricidad a CFE, en la Figura 20 se presenta un gráfico en el que se aprecia el cambio en el consumo de electricidad. El consumo total se aumentó un 11.1% debido a la mayor generación en los ingenios.



**Figura 20.** Generación, consumo a CFE y consumo total de electricidad del sector azucarero. Zafras 2002/03 y 2011/12. Elaboración propia, con datos de la UNC [UNC, 2013].

Con base en la información presentada podemos resumir el panorama de la situación energética de la industria azucarera nacional para el periodo analizado en los puntos siguientes:

1. Esta rama ha sido de las más intensivas energéticamente en el sector industrial.
2. El consumo energético total de la industria azucarera ha disminuido.

3. La distribución de las fuentes de energía ha cambiado.
4. La autogeneración y el consumo de electricidad en los ingenios ha aumentado.

### **III.2 INTENSIDADES ENERGÉTICAS EN LA INDUSTRIA AZUCARERA**

Los cambios en el consumo de energía de la industria del azúcar pueden ser debidos a diferentes causas. Para explicar el comportamiento en el caso mexicano plantearemos las siguientes hipótesis:

1. La variación en el volumen de producción ha sido directamente proporcional a la variación en el consumo de energía: a mayor producción mayor consumo.
2. Ha habido cambios en la distribución de los productos elaborados, hay procesos que demandan más energía que otros: elaborar azúcar refinado y destilar alcohol consumen más energía que solamente producir azúcar estándar, por ejemplo.
3. Eficiencia energética: los cambios tecnológicos y de operación en las fábricas alteran el consumo de energía.

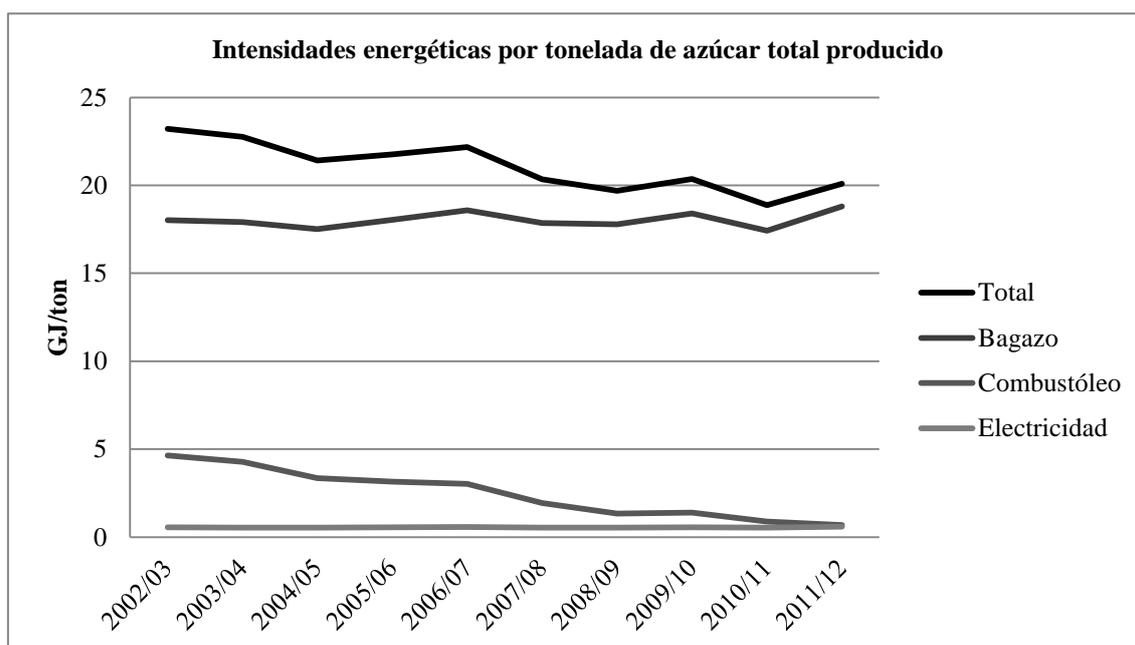
Una manera de relacionar el consumo de energía con la producción de cierto sector industrial es mediante el cálculo de indicadores conocidos como intensidades energéticas, los cuales representan la cantidad de energía necesaria para la elaboración de un producto. Dichos indicadores suelen ser calculados por unidad física o económica, por ejemplo al determinar el consumo de energía derivado de la producción de una tonelada, un kilogramo o un litro de cierto bien estamos hablando de intensidades energéticas por unidades físicas, y cuando calculamos el consumo energético de un sector económico en particular y lo dividimos entre las unidades monetarias de la contribución que el mismo sector hizo al PIB se está haciendo uso de la intensidad energética por unidades económicas. En este trabajo nos centraremos en los indicadores por unidad física para analizar la situación energética de los ingenios azucareros desde un punto de vista técnico.

Para entrar en esta parte, recordemos el comportamiento de la producción de la industria azucarera durante este periodo de análisis. En la Figura 5, en el primer Capítulo,

podemos observar que de la zafra 2002/03 a la 2011/12 la producción total de azúcar aumentó un 2.45%, con esta simple apreciación la primer hipótesis planteada al inicio de este apartado es inválida ya que la producción aumentó y el consumo de energía ha disminuido.

En esa misma Figura, vemos que la producción de azúcar estándar se ha incrementado un 14.2%, y en cambio la de azúcar refinado disminuyó un 17.0%. En la última zafra registrada el azúcar estándar representó un 69% y el refinado un 31% de la producción de azúcar nacional. Otro producto importante de la industria azucarera es el alcohol de 96°, que en México se produce a partir de las mieles incristalizables obtenidas en la centrifugación durante el proceso de transformación. El comportamiento de la producción de alcohol, que cayó un 61% durante las zafras estudiadas, se puede apreciar también en la Figura 5. Tanto la elaboración de azúcar refinado como la destilación del alcohol implican consumir una mayor cantidad de energía que la necesaria para la producción del azúcar estándar. En el caso mexicano la elaboración de azúcar refinado y de alcohol ha disminuido y la de azúcar estándar ha aumentado, esta situación indudablemente contribuyó a que disminuyera el consumo energético de la industria azucarera durante el periodo de análisis y nos lleva a pensar que la segunda hipótesis planteada es posible.

Para analizar la tercera hipótesis se calcularon las intensidades energéticas de la producción total de azúcar. En la Figura 21 se representa el comportamiento del consumo de energía por tonelada de azúcar total producido, durante la zafra 2002/03 se necesitaron 23.21 gigajoules (GJ) de energía para producir una tonelada (t) de azúcar, mientras que en la zafra 2011/12 la intensidad energética se redujo a 20.09 GJ/t. En la gráfica también se incluye la contribución de cada tipo de energético utilizado, el combustóleo pasó de 4.64 GJ/t a 0.68 GJ/t y el aporte tanto del bagazo como de la electricidad aumentaron. Con base en la observación anterior podemos considerar como probable la tercera hipótesis, relacionada con una mejora tecnológica en los ingenios azucareros, sin embargo esta conclusión puede ser engañosa ya que el gráfico de la Figura 20 se construyó con datos nacionales y tomando la información sobre producción sin desagregarla por tipo de producto, es decir, se calculó el consumo de energía total de los ingenios y se dividió entre el total de azúcar producida (azúcar estándar más azúcar refinado más mascabado).



**Figura 21.** Intensidad energética total y por energético. Elaboración propia, datos de la UNC [UNC, 2013].

Al darnos cuenta de esta limitante en el cálculo tomamos la información ingenio por ingenio con el fin de realizar un análisis más preciso de las intensidades energéticas, para tal propósito se clasificaron los ingenios azucareros del país según la variedad de productos elaborados (Tabla 6). De la zafra 2002/03 a la 2011/12 todos los grupos disminuyeron su intensidad energética, esto nos demuestra que además de un cambio en la distribución de los productos elaborados (hipótesis número 2) existieron mejoras tecnológicas de eficiencia energética (hipótesis número 3).

**Tabla 6**

Clasificación de ingenios mexicanos según los productos elaborados. Zafras 2002/03 y 2011/12.

Producto	Num. de ingenios		IAT <sup>a</sup> (GJ/ton)		% producción azúcar	
	2002/03	2011/12	2002/03	2011/12	2002/03	2011/12
1 Solo estándar	33	36	21.43	19.86	52.02%	58.78%
1a Estándar y alcohol	4	1	24.10	15.24	4.61%	4.24%
2 Solo refinado	9	8	27.31	22.37	22.00%	18.34%
2a Refinado y alcohol	6	1	24.72	23.62	10.48%	1.51%
3 Estándar y refinado	4	4	24.84	18.26	8.06%	8.16%
3a Estándar, refinado y alcohol	1	2	31.38	19.71	0.32%	5.14%
4 Mascabado y estándar	1	1	25.75	20.30	2.50%	2.21%
5 Mascabado, estándar y ref.	0	1		22.79	0.00%	1.62%

a. IAT: intensidad energética por tonelada de azúcar total producida, promedio del grupo. Elaboración propia, datos de la UNC [UNC, 2013].

### III.3 COMPARACIÓN INTERNACIONAL

Los resultados anteriores nos muestran que durante el periodo de análisis se realizaron mejoras en eficiencia energética en las instalaciones de los ingenios mexicanos, pero, ¿cómo estamos con respecto a otros países productores de azúcar de caña? Para responder esta pregunta seleccionamos dos líderes en el sector: Brasil y las Islas Mauricio.

#### *Brasil*

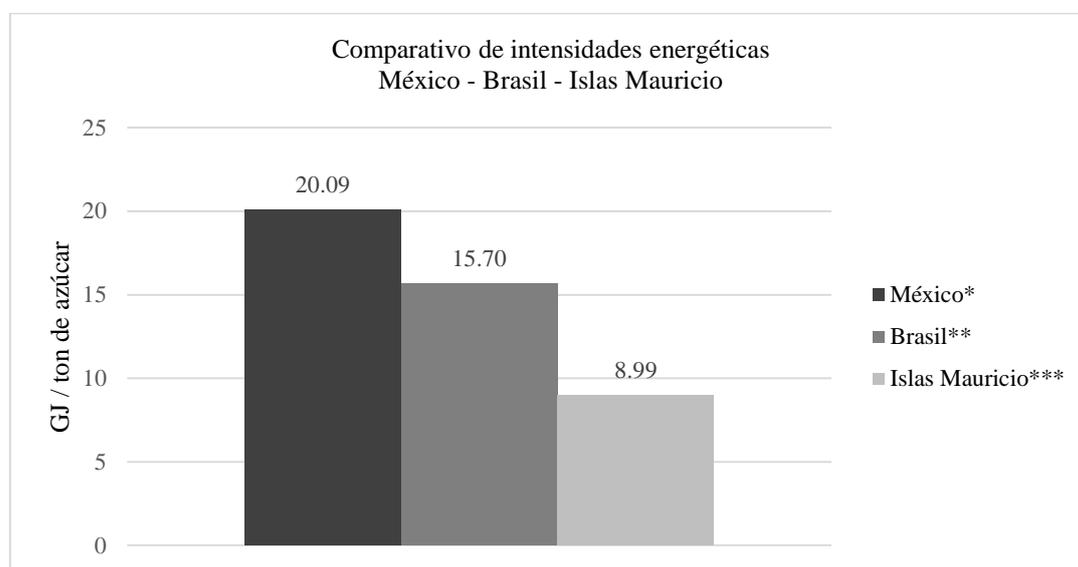
Primer lugar mundial en volumen de producción y exportaciones tanto de azúcar como de etanol a base de caña. Desde la década de 1980 la industria azucarera brasileña integró la producción de azúcar con la de bioetanol, durante la zafra 2012/13 un 50.5% del total de jugo de caña obtenido se destinó a la producción de bioetanol y el resto a la elaboración de azúcar, resultando en 21.362 miles de millones de litros (mmdl) de bioetanol y en 34.097 millones de toneladas de azúcar (mdt) [UNICA, 2013]. A partir de la década pasada la legislación Brasileña ha incentivado la venta de excedentes de energía eléctrica de los autogeneradores privados, como resultado el sector azucarero ha incrementado su capacidad de generación eléctrica de tal modo que al 2011 se generaron 22,240 GWh en los ingenios brasileños (4.6% del consumo eléctrico de Brasil en 2011) [Ministerio de Minas y Energía de Brasil, 2012].

#### *Islas Mauricio*

Ubicadas en el océano Índico, a 900km al oriente de Madagascar, actualmente cuenta con los ingenios azucareros más modernos y eficientes del mundo, generando en promedio 122 kWh de electricidad por cada tonelada de caña procesada. La generación eléctrica en los ingenios contribuye con el 17.2% (481.7 GWh en 2012) del total de la producción de electricidad de la isla [Ministerio de Finanzas de Mauricio, 2013].

En la Figura 22 se presenta el comparativo de las intensidades energéticas de la industria azucarera de los países en cuestión, mientras que en México consumimos un total de 20.09 GJ por tonelada de azúcar producida, en Brasil se necesitan 15.70 GJ y en las Islas Mauricio solamente 8.99 GJ para el mismo propósito. Es importante señalar que para el cálculo en los tres países se utilizó el total de azúcar producida, es decir estándar más refinado, y las proporciones en cada país son diferentes. México es el que

tiene una mayor participación de azúcar refinado (un 31% en la zafra 2011/12); esto puede afectar el resultado, pero si tomamos la intensidad energética de los ingenios mexicanos que solamente producen azúcar estándar (ver tabla 5 en el apartado anterior), que fue de 19.86 GJ/ton, vemos que esta sigue estando por arriba de los valores de Brasil y de Mauricio. La comparación realizada en este trabajo es muy sencilla, es muy probable que al emplear una metodología más completa para el cálculo de las intensidades energéticas de las industrias azucareras los resultados sean diferentes, sin embargo el propósito de esta comparación es conocer la situación de la industria azucarera Mexicana con respecto a los líderes mundiales, objetivo que se cumple con esta simple estimación.



**Figura 22.** Intensidades energéticas de la industria azucarera en México, Brasil y las Islas Mauricio.

\* Intensidad energética de la fase industrial en México para la zafra 2011/12.

\*\* Intensidad energética de la fase industrial en Brasil para el año 2011. Fuente: cálculo propio con datos del Ministerio de Minas y Energía de Brasil y del Instituto Brasileño de Energía y Estadística [Ministerio de Minas y Energía de Brasil, 2012], [IBGE, 2012].

\*\*\* Intensidad energética de la fase industrial en las Islas Mauricio para el año 2012. Cálculo propio con datos del Ministerio de Finanzas de Mauricio [Ministerio de Finanzas de Mauricio, 2013].

Como vimos en el Capítulo II, la eficiencia energética de un ingenio azucarero depende en gran medida del esquema de cogeneración utilizado y en particular de la presión de generación del vapor (alta, media o baja), por este motivo nos enfocamos a investigar a qué presión de vapor están trabajando actualmente los ingenios azucareros mexicanos. Con la información obtenida elaboramos una clasificación de los mismos, resumida en

la Tabla 7, en la cual podemos apreciar que la mayoría de los ingenios mexicanos cuentan con sistemas de cogeneración a baja presión (menor a 25 kgf/cm<sup>2</sup>) como el representado en la Figura 16 del capítulo anterior, diseñado para satisfacer sus necesidades energéticas internas. En la misma tabla se incluye la intensidad energética promedio para cada grupo, vemos que esta disminuye conforme aumenta la presión de operación a excepción del único ingenio que opera a presión alta, el cual tiene una intensidad de 23.62 GJ/ton, esto se debe a que en esa instalación en particular producen solamente azúcar refinado y alcohol, además de que la calidad de la caña en esa región es de media-baja a nivel nacional. En la última columna de la tabla aparece la generación de electricidad por tonelada de caña procesada promedio de cada grupo, vemos también que conforme es más alta la presión del vapor también lo es la generación de electricidad, este indicador en su valor más alto (30.69 kWh/ton de caña) no se acerca al de los ingenios modernos de Brasil y las Islas Mauricio, que está por arriba de 100 kWh/ton. Mientras que en México se opera principalmente a bajas presiones de vapor, en Brasil y las Islas Mauricio es común encontrar ingenios con esquemas de cogeneración modernos, similares al de la Figura 17. Este atraso es la causa principal por la que se presenta una gran diferencia en las intensidades energéticas entre México y los dos países mencionados.

**Tabla 7**

Clasificación de los ingenios mexicanos según la presión de generación de vapor.

Zafra 2011/12.

Tipo	Presión kgf/cm <sup>2</sup>	Num. de ingenios	IEat (GJ/t)	Generación kWh/ton caña
MB	< 17	13	20.93	15.09
B	17 a 25	36	19.90	16.96
M	25 a 45	2	18.02	19.37
A	> 45	1	23.62 <sup>a</sup>	30.69

Fuente: Elaboración propia con datos de la UNC y de la CNIAA [UNC, 2013], [Manual Azucarero, 2013]. MB: muy baja presión, B: baja presión, M: media presión, A: Alta presión. IEat: intensidad energética por tonelada total de azúcar producida. Generación: producción de electricidad en kWh por tonelada de caña procesada. La tabla se elaboró con información de 52 de los 54 ingenios que operaron en la zafra 2011/12.

- a. La intensidad energética para el único ingenio que opera a presión alta es mayor a las demás debido a que este fabrica exclusivamente azúcar refinado y alcohol, procesos más intensivos energéticamente, además de que el contenido de sacarosa en la caña es medio-bajo en esa región.

## **CAPÍTULO IV. ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS PARA EL SECTOR AZUCARERO**

En el presente capítulo se analizan las alternativas para un uso más eficiente de la energía en la industria de transformación del azúcar en México, que incluyen el secado, la cogeneración, la producción de etanol. Finalmente se hace una estimación de los costos.

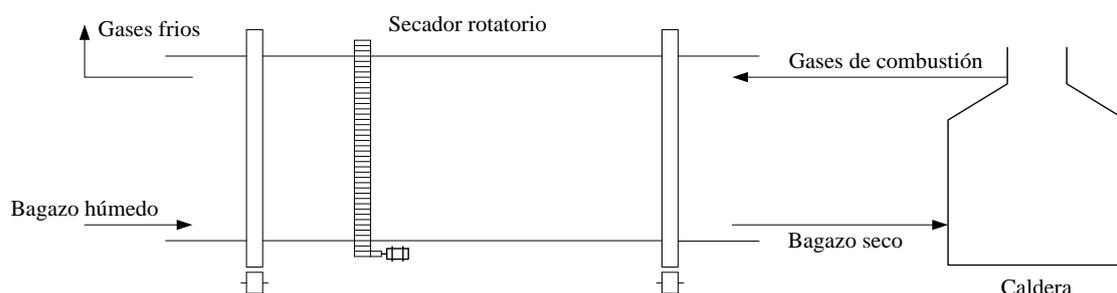
El proceso de transformación del azúcar integra diversas actividades en las que se consume energía, desde las labores propias del campo como el cultivo, el riego, el corte y el transporte de la caña, hasta las actividades de transformación que tienen lugar en los llamados ingenios azucareros. Las propuestas presentadas a continuación se enfocan en la fase industrial del proceso, sin embargo es preciso mencionar que el estudio de la fase agrícola también es muy importante en el consumo de energía global de la actividad agroindustrial azucarera, ya que el rendimiento del campo por hectárea cultivada, la cantidad de azúcar recuperable en la caña (KARBE), la tecnología utilizada para la cosecha de la caña, el tipo de riego utilizado en los campos y la tecnología empleada para transportar la caña de los campos hasta los ingenios, entre otros factores, afectan la demanda de energía del proceso. Teniendo presente lo anterior se evaluaron las siguientes alternativas energéticas: operación de secado del bagazo previo a su combustión, generación y venta de electricidad excedente, y producción y venta de bioetanol.

### **IV.1 SECADO DEL BAGAZO PREVIO A LA COMBUSTIÓN**

En la industria del azúcar de caña el subproducto de la molienda conocido como bagazo contiene alrededor de un 50% de humedad en peso. En México, durante las zafras estudiadas (2002/03 – 2011/12), la humedad promedio del bagazo fue de 51% [UNC, 2013]. Este alto porcentaje de humedad implica que una buena parte de la energía de la combustión sea consumida en la eliminación del agua del bagazo al interior de las calderas. La capacidad calorífica del bagazo aumenta conforme disminuye el contenido de agua en el mismo, por lo tanto al implementar una operación de secado previo al ingreso a las calderas se incrementaría el vapor generado por tonelada de bagazo

quemado, y como resultado se podría sustituir el combustóleo que aún se utiliza, aumentar la generación eléctrica e inclusive tener excedentes de bagazo para tiempos fuera de zafra.

La primera propuesta es entonces aumentar la eficiencia energética del proceso de producción de azúcar mediante la instalación de un secador de bagazo. En la industria azucarera se han utilizado tres diferentes sistemas de secado para el bagazo: en túnel, neumático y rotatorio, siendo el más ampliamente utilizado el de tipo rotatorio debido a su facilidad de operación, mantenimiento y menor costo de inversión [Bombino y Roca, 2003], [Reyes, 2004]. Se pueden utilizar los gases de combustión de las calderas en un secador de tipo rotatorio para aprovechar su energía y evaporar una parte del agua contenida en el bagazo, usualmente los gases de combustión son expulsados al medio ambiente a una temperatura de alrededor de 250 °C, dichos gases pueden ceder su energía hasta llegar a no menos de 120 °C para evitar su condensación y el posterior daño a los equipos [Yarnal y Puranik, 2010]. Se realizó un balance de masa y energía con el objetivo de determinar la cantidad de humedad que es posible retirar del bagazo mediante evaporación, teniendo como fuente de energía los gases de combustión de las calderas. En la Figura 23 se representa el secador de bagazo, en este los gases de combustión se mueven a contraflujo del bagazo, el cual entra del lado izquierdo del esquema y conforme avanza dentro del secador va perdiendo agua hasta salir del mismo y entrar a la caldera para continuar con el proceso de combustión.



**Figura 23.** Diagrama simplificado de un secador rotatorio de bagazo. Elaboración propia.

Para realizar los cálculos del balance energético del secador se necesita conocer la composición química del bagazo, que tomamos de la literatura: 51% de carbono, 39.9% de oxígeno, 5.6% de hidrógeno y 3.5% de cenizas para el bagazo de caña seco [Yarnal y

Puranik, 2010], siendo todos porcentajes máxicos. En la Tabla 8 se presenta la composición másica y molar de una base de 100 kg de bagazo seco.

**Tabla 8**

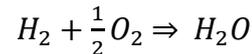
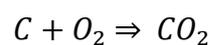
Composición másica y molar de 100 kg de bagazo seco.

Componente	Peso (kg)	M (kg/kg·mol) <sup>a</sup>	kg·moles
Carbono (C)	51.0	12	4.25
Oxígeno (O)	39.9	16	2.49
Hidrógeno (H)	5.6	1	5.60
Ceniza	3.5	-	-

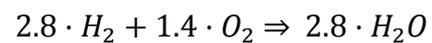
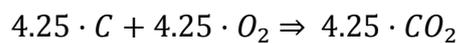
Fuente: elaboración propia con datos de Yarnal y Puranik, 2010.

a. M: masa molar, cantidad de masa por cantidad de sustancia, kg/kg·mol.

Con esta misma base de 100 kg se realizaron los cálculos para el balance de energía, comenzamos describiendo las reacciones de combustión estequiométrica para determinar la composición final de los gases a la salida de la caldera.



Si las reacciones anteriores se llevan a cabo con la composición molar de carbono e hidrógeno propia del bagazo obtenemos lo siguiente:



Recordemos que el bagazo también contiene oxígeno dentro de sus componentes, el cual se debe de restar de los moles requeridos de  $O_2$  para la combustión:

$$O_{2req} = 4.25 + 1.4 - 1.245 = 4.405 \text{ kg} \cdot \text{mol}$$

Usualmente, en las calderas de los ingenios azucareros se inyecta un excedente de 35% de oxígeno ( $O_2$ ) para acercarse a la combustión completa [Yarnal y Puranik, 2010], por lo tanto, en total se utilizan  $4.405 \times 1.35 = 5.95 \text{ kg} \cdot \text{mol}$  de  $O_2$ . La fuente de  $O_2$  es el aire, que contiene un 21% de  $O_2$  y un 79% de nitrógeno ( $N_2$ ), porcentajes molares, entonces  $5.95 \times 79/21 = 22.37 \text{ kg} \cdot \text{mol}$  de  $N_2$  se irían a los gases de combustión a la salida de las calderas, junto con los  $1.54 \text{ kg} \cdot \text{mol}$  de  $O_2$  excedentes, el  $CO_2$  y el  $H_2O$  generados, y el

H<sub>2</sub>O de la evaporación del agua del bagazo dentro de la caldera. La composición final de los gases de combustión sería entonces la descrita en la tabla 9.

**Tabla 9**

Composición final de los gases de combustión de la caldera.

Componente	kg·mol	M (kg/kg·mol)	Peso (kg)
CO <sub>2</sub>	4.25	44.00	187.00
N <sub>2</sub>	22.37	28.00	626.36
O <sub>2</sub>	1.54	32.00	49.28
H <sub>2</sub> O <sub>comb</sub> <sup>a</sup>	2.80	18.00	50.40
H <sub>2</sub> O <sub>bagazo</sub> <sup>b</sup>	-	18.00	104.42·(1-Y)

- a. H<sub>2</sub>O<sub>comb</sub>: vapor de agua proveniente de la reacción de combustión en la caldera.  
 b. H<sub>2</sub>O<sub>comb</sub>: vapor de agua generado en la eliminación de la humedad del bagazo. Y: fracción de agua evaporada en el secador (los 104.42 kg de H<sub>2</sub>O son para una composición de 51.08% de humedad en el bagazo, que es el promedio en México [UNC, 2013]).

Para llevar a cabo el balance de energía se utilizan las ecuaciones 1, 2 y 3. Primero se determina el calor que pueden ceder los gases de combustión (Q<sub>GC</sub>) de la caldera al pasar de 250 a 120 °C (ecuación 1). Se considera que el secador rotatorio opera con una eficiencia térmica del 60% [Reyes, 2004].

$$Q_{GC} = \eta * \sum [m_i * C_{p_i}] * \Delta T = \quad (1)$$

$$\eta [187 * C_{p_{CO_2}} + 626.36 * C_{p_{N_2}} + 49.28 * C_{p_{O_2}} + (50.4 + 104.42 * (1 - Y)) * C_{p_{H_2O}}] * \Delta T$$

En donde:

Q<sub>GC</sub>: calor cedido por los gases de combustión, en kJ.

η: eficiencia térmica del secador = 0.60 (60%).

m<sub>i</sub>: masa del componente i, en kg.

C<sub>p<sub>i</sub></sub>: calor específico promedio entre 250 y 120 °C del componente i, kJ/kg·K.

C<sub>p<sub>CO<sub>2</sub></sub></sub> = 0.983, C<sub>p<sub>N<sub>2</sub></sub></sub> = 1.052, C<sub>p<sub>O<sub>2</sub></sub></sub> = 0.960 y C<sub>p<sub>H<sub>2</sub>O</sub></sub> = 2.005 kJ/kg·K [NIST, 2006].

ΔT: diferencia de temperatura de entrada y salida de los gases, 130 K.

El calor que ceden los gases de combustión dentro del secador es el mismo que requiere una cierta cantidad del agua contenida en el bagazo húmedo para evaporarse (Q<sub>H<sub>2</sub>O</sub>), se considera que el bagazo entra a 30 °C [Yarnal y Puranik, 2010], llevando el agua que se

evapora hasta 120 °C, o sea hasta un equilibrio térmico con los gases de combustión. Empleando las ecuaciones 2 y 3 se completa el balance de energía:

$$Q_{GC} = Q_{H_2O} \quad (2)$$

En donde:

$Q_{GC}$ : calor cedido por los gases de combustión, en kJ.

$Q_{H_2O}$ : Calor necesario para evaporar el agua del bagazo húmedo, en kJ.

$$Q_{H_2O} = H_{@120} - H_{@30} = 104.42 * Y * (h_{H_2O@120} - h_{H_2O@30}) \quad (3)$$

En donde:

$Q_{H_2O}$ : Calor necesario para evaporar el agua del bagazo húmedo, en kJ.

$H_{@120}$ : entalpía del agua a 120 °C,  $H_{@30}$ : entalpía del agua a 30 °C.

104.42: Son 104.42 kg de agua si la base de 100 kg de bagazo seco se considera ahora en una mezcla con un 51.08% de humedad.

$Y$ : fracción de agua evaporada del bagazo húmedo.

$h_{H_2O}$ : entalpía específica del agua; @120: a 120 °C = 2716.5 kJ/kg; @30: a 30 °C = 125.82 kJ/kg [NIST, 2006].

Tenemos entonces una ecuación en la cual la incógnita es la fracción de agua evaporada del bagazo, “ $Y$ ”, al resolverla obtenemos que  $Y = 0.3265$ , lo que significa que con la energía disponible es posible eliminar un 32.65% del total de agua contenida en el bagazo, lo cual equivale a tener un bagazo a la salida del secador con un 41.29% de humedad, a comparación del bagazo húmedo original que contenía un 51.08% (se reduciría en 9.79% la humedad total).

Una menor humedad en el bagazo resulta en un aumento de su poder calorífico, de esta manera se dispone de una mayor cantidad de energía para la combustión en las calderas empleando la misma cantidad de biocombustible. Para calcular el poder calorífico del bagazo dependiendo de su porcentaje de humedad utilizaremos la ecuación 4, obtenida de la Asociación de Técnicos del Azúcar de Sudáfrica [SASTA, 2009]:

$$PCI = [19,605 - 196.05(\%H) - 207.60(\%C) - 31.14(^{\circ}Brix)] \quad (4)$$

En donde:

PCI: Poder calorífico inferior (o neto), en kJ/kg.

%H: % de humedad, en peso.

%C: % de cenizas, en peso.

°Brix: Grados brix.

Los datos promedio de composición del bagazo de las zafra analizadas son: 51.08% de humedad, 2.80% de contenido de cenizas y 2.36 °Brix [UNC, 2013], con los cuales obtenemos un poder calorífico neto de 7082.4 kJ/kg para el bagazo húmedo, muy parecido al que utiliza la SENER de 7,055 kJ/kg en los balances nacionales de energía [SENER, 2012]. Después del secado de bagazo, la humedad se reduciría desde un 51.08% hasta un 41.29%, y el poder calorífico neto del bagazo sería de 9,067 kJ/kg, aumentando un 28%.

Para darnos una idea del potencial de esta propuesta tomemos como base la zafra 2011/12, en la que la producción total de bagazo fue de 13,477,068 toneladas. Con la ecuación 5 se obtiene el potencial energético del total de bagazo generado:

$$P_{BS} = M_B * PCI_{BS} * 10^{-6} \quad (5)$$

En donde:

P<sub>BS</sub>: Potencial energético del bagazo seco, en PJ.

M<sub>B</sub>: Cantidad de bagazo generado, en toneladas.

PCI<sub>BS</sub>: Poder calorífico neto del bagazo seco, de 9,067 kJ/kg.

Secar 13,477,068 toneladas de bagazo da como resultado un potencial energético de **122.20 petajoules (PJ)**, cantidad suficiente para satisfacer la totalidad del consumo energético de la industria azucarera, sustituyendo tanto el combustóleo como la electricidad comprada a CFE y obteniendo **un excedente de energía de 23.25 PJ**, que puede ser utilizado en tiempos fuera de zafra para generar **1,615 GWh** de electricidad en aproximadamente 90 días de operación. En la Tabla 10 se presenta un resumen de los resultados.

**Tabla 10**

Potencial energético de la operación de secado de bagazo

<b>Potencial de energía del bagazo seco = 122.2 PJ</b>		
<b>Consumo de energía 2011/12</b>		
<b>Fuente de energía</b>	<b>Real (PJ)</b>	<b>Con operación de secado (PJ)</b>
Bagazo	94.92	98.94
Combustóleo	3.45	0
Electricidad CFE	0.18	0
Total <sup>a</sup>	98.54	98.94
Excedentes <sup>b</sup>	0	23.25
<b>Potencial de generación eléctrica fuera de zafra</b>		
Energía disponible (PJ)		23.25
Eficiencia en transformación <sup>c</sup>		0.25
Electricidad generada (GWh) <sup>d</sup>		1,615
Días de operación <sup>e</sup>		90

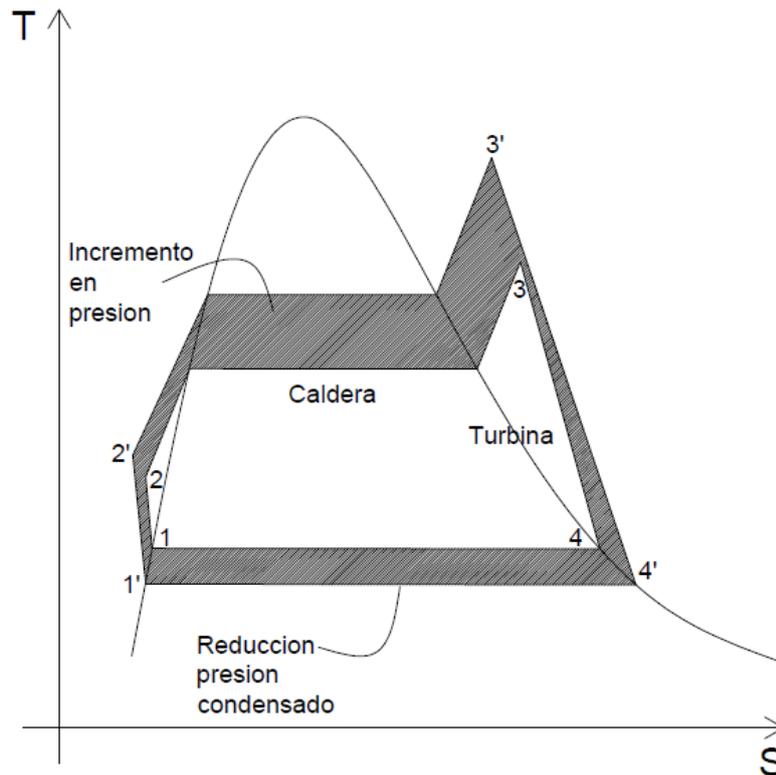
- El consumo total de energía con la operación de bagazo es mayor al real porque al sustituir la electricidad de CFE se considera la eficiencia en la conversión del bagazo a electricidad dentro de los ingenios, que es de un 25% [Ingenios Morelenses, 2013].
- Diferencia entre los 122.20 PJ de potencial del bagazo seco y los 98.76 PJ consumidos.
- Eficiencia de generación eléctrica =  $(\eta_{\text{caldera}}) * (\eta_{\text{turbinavapor}}) * (\eta_{\text{generador}}) = 0.25$  [Ingenios Morelenses, 2013].
- Energía disponible transformada a electricidad,  $(23.25 \text{ PJ} / (0.0036 \text{ PJ/GWh})) * 0.25 = 1,615$ .
- Días de operación considerando la capacidad instalada actual en todos los ingenios del país, de 595.5 MW [Manual Azucarero, 2013], y un factor de planta de 0.8 típico de una central termoeléctrica [Copar, 2011].

Ante el enorme potencial de esta propuesta nos preguntamos si en México existen o no actualmente ingenios en los que se aplique un secado al bagazo, se encontró que solamente tres de los 54 ingenios que operaron durante la zafra 2011/12 utilizaron una operación de secado de bagazo en algunas de sus calderas: los ingenios Tamazula, en Jalisco, El Carmen, en Veracruz, y Puga, en Nayarit [Manual Azucarero, 2013]. Cabe señalar que gran parte de los ingenios mexicanos utilizan los gases de combustión de las calderas como medio de precalentamiento ya sea del aire o del agua. Hay que tener en cuenta lo anterior, ya que se utilizaron datos promedio típicos de operación de los ingenios para elaborar esta propuesta y los resultados de las estimaciones pueden cambiar dependiendo de la disponibilidad de los gases de combustión en cada instalación. El cálculo ideal tendría que hacerse con base en datos de operación de las plantas de generación de vapor de cada uno de los ingenios.

## IV.2 POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EXCEDENTE

En México, la gran mayoría de los Ingenios azucareros cuentan con sistemas de cogeneración diseñados para satisfacer sus necesidades energéticas. Durante la zafra 2011/12 la generación de electricidad promedio por tonelada de caña procesada en México fue de 16.75 kWh/t [UNC, 2013], mientras que en las Islas Mauricio se generaron en promedio 122 kWh/t en el año 2012 [Ministerio de Finanzas de Mauricio, 2013], más de 7 veces lo que se genera en los Ingenios mexicanos. Este único dato refleja el atraso tecnológico en el que se encuentra el sector azucarero mexicano con respecto al estado actual de la industria en otros países. En la Figura 16 del Capítulo II se aprecia el esquema de cogeneración mayoritariamente utilizado en nuestro país, en el que se genera vapor a baja presión ( $21 \text{ kgf/cm}^2$ ) y se utilizan turbinas a contrapresión, en las que el vapor que se extrae pasa directamente al proceso. En cambio, un esquema de cogeneración como el de la Figura 17, que genera vapor a alta presión ( $65 \text{ kgf/cm}^2$ ) y envía el vapor de salida de la turbina directamente a condensación, tiene la capacidad de producir electricidad excedente con el objetivo de inyectarla a la red eléctrica para su venta.

La presión a la que se genera el vapor es un parámetro de operación determinante para la industria azucarera en términos de la eficiencia energética del proceso y la capacidad de generación de electricidad excedente. La explicación termodinámica es sencilla, en el Capítulo II mencionamos que las plantas de cogeneración de los ingenios funcionan bajo el ciclo termodinámico Rankine. En la Figura 24 se representa dicho ciclo en un diagrama Temperatura-Entropía (T-S), el área comprendida entre los puntos del 1 al 4 es el trabajo entregado por el ciclo original, y el área entre los puntos 1' y 4' es el trabajo entregado por el mismo ciclo optimizado. Podemos pensar que el área interior es la correspondiente a un esquema como el de la Figura 16, y el área sombreada representa la cantidad extra de energía que se puede obtener al aumentar la presión de generación de vapor y reducir la presión a la que se condensa, es decir al cambiar hacia un esquema del tipo de la Figura 17.



**Figura 24.** Diagrama T-S de un ciclo termodinámico Rankine.

El área sombreada representa el trabajo extra que se puede obtener al incrementar la presión de generación del vapor y disminuir la presión a la descarga de la turbina. Elaboración propia.

En el primer capítulo describimos la situación actual para los ingenios azucareros como no muy favorable debido a varios factores: los precios del azúcar a la baja, la sustitución del azúcar nacional por la fructosa estadounidense, nuevos impuestos a los alimentos de alto contenido calórico, entre otros. Ante tal panorama el sector azucarero podría apostar por la diversificación de sus productos, como lo hicieron Brasil y las Islas Mauricio. Si se plantea el objetivo de generar electricidad excedente en los Ingenios, los sistemas de cogeneración tendrían que modificarse y modernizarse; se propone entonces que en México se adopten esquemas similares al representado en la Figura 17 (presión alta en las calderas + turbinas a condensación).

Para conocer el potencial de generación eléctrica excedente en la industria azucarera es necesario determinar la potencia eléctrica técnicamente viable a instalar, esto se hace con base en el estado actual del sector azucarero y en algunas consideraciones tomadas. Primero, se clasifican los ingenios azucareros en dos grupos según la presión de generación de vapor a la que trabajan (ver Tabla 7, en el Capítulo III):

- Grupo A: 13 instalaciones operando a muy baja presión, menor a  $17 \text{ kgf/cm}^2$ .
- Grupo B: 39 instalaciones operando por encima de  $17 \text{ kgf/cm}^2$ .

Las siguientes consideraciones se toman para el cálculo (se pueden ver resumidas en la Tabla 11):

- Los ingenios del Grupo A modifican sus operaciones a alta presión ( $65 \text{ kgf/cm}^2$ ).
- El Grupo B cambiaría sus plantas hacia muy alta presión ( $100 \text{ kgf/cm}^2$ ).
- Los potenciales de generación eléctrica excedente se obtienen de la Tabla 5, presentada en el Capítulo II.
- En México se consumieron un promedio de 0.53 toneladas de vapor por tonelada de caña molida (t/t) en la zafra 2011/12 [UNC, 2013]. Para el cálculo se considera que los cambios en los ingenios llevan a mejorar el consumo de vapor a 0.5 t/t de caña para el Grupo A, y a 0.4 t/t para el Grupo B (Tabla 5, Capítulo II).
- El consumo de electricidad en los Ingenios mexicanos fue de 18.3 kWh totales (generados + comprados a CFE) por tonelada de caña procesada en la zafra 2011/12 [UNC, 2013]. Para el cálculo se considera que todos los Ingenios Mexicanos demandarían 25 kWh/t de caña (Tabla 5, Capítulo II).
- Los días de duración de la zafra para los Grupos A y B se tomaron como los de la zafra 2011/12. El tiempo de paro en las instalaciones de cada Grupo es el promedio del periodo comprendido entre las zafras 2002/03 y 2011/12; este tiempo perdido se debe principalmente a las lluvias, que detienen el acarreo de la caña a los ingenios, así como a paros en la fábrica por mantenimiento.
- La capacidad de molienda de caña para cada Grupo de Ingenios es la correspondiente a la zafra 2011/12.

**Tabla 11**

Consideraciones técnicas para el potencial de generación eléctrica excedente.

	<b>Grupo A</b>	<b>Grupo B</b>
Presión de vapor (kgf/cm <sup>2</sup> )	65	100
Consumo de vapor (t/t)	0.5	0.4
Generación de electricidad (kWh/t) <sup>a</sup>	82.6	111
Consumo eléctrico propio (kWh/t) <sup>b</sup>	25	25
Electricidad excedente (kWh/t) <sup>c</sup>	57.6	86
Días totales de la zafra (2011/12)	153	157
Tiempo perdido promedio (%) <sup>d</sup>	20%	20%
Días hábiles de operación (2011/12) <sup>e</sup>	123	127
Capacidad de molienda de caña (t/d) <sup>f</sup>	63,204	304,103

Fuente: elaboración propia con datos de la UNC, del BNDES y de Dantas [UNC, 2013], [BNDES, 2008], [Dantas, 2013].

- Generación total de electricidad, en kWh por tonelada de caña procesada.
- Consumo eléctrico para usos propios de la instalación, en kWh/t de caña procesada.
- Diferencia entre la Generación eléctrica total y el Consumo propio de la instalación.
- Tiempo de paro en ingenios, promedio de 10 zafras analizadas (2002/03 – 2011/12).
- Días de operación de los ingenios tomando en cuenta el tiempo perdido.
- Capacidad de molienda total del grupo, toneladas de caña por día de operación, zafra 2011/12.

Para determinar la potencia instalable y la generación eléctrica excedente se emplean las ecuaciones 6, 7, 8, 9 y 10. La capacidad de molienda (CM) de cada grupo de ingenios es la variable que determina el potencial de generación eléctrica.

$$Gt = (Gi * CM * Dh) * 10^{-3} \quad (6)$$

En donde:

Gt: Generación de electricidad total durante la zafra, en MWh.

Gi: Generación eléctrica total por tonelada de caña molida, de tabla 11, kWh/t.

CM: Capacidad de molienda por día de operación, de tabla 11, en t/d.

Dh: Días hábiles de operación durante la zafra, de tabla 11.

$$Ht = Dt * 24 \quad (7)$$

En donde:

Ht: Horas totales de operación durante la zafra.

Dh: Días hábiles de operación durante la zafra, de tabla 11.

24: 24 horas de operación por día, tres turnos de trabajo.

$$CI = \frac{Gt}{Ht} \quad (8)$$

En donde:

CI: Potencia de generación eléctrica a instalar, en MW.

Gt: Generación de electricidad total durante la zafra, de la ecuación 6, en MWh.

Ht: Horas totales de operación durante la zafra, de la ecuación 7.

$$Cpe = (25 * CM * Dt) * 10^{-3} \quad (9)$$

En donde:

Cpe: Consumo propio de electricidad en los ingenios, en MWh.

25: Son 25 kWh que demandaría cada instalación, por tonelada de caña molida.

CM: Capacidad de molienda por día hábil de operación, de tabla 11, en t/d.

Dh: Días hábiles de operación durante la zafra, de tabla 11.

$$Ge = Gt - Cpe \quad (10)$$

En donde:

Ge: Generación excedente de electricidad en periodo de zafra, en MWh.

Gt: Generación de electricidad total durante la zafra, de la ecuación 6, en MWh.

Cpe: Consumo propio de electricidad en los ingenios, de ecuación 9, en MWh.

Resolviendo las ecuaciones anteriores, con los datos de la tabla 11, se estima que en tiempos de zafra los Ingenios del Grupo A podrían generar aproximadamente 447 GWh de electricidad excedente, instalando un total de 218 MW, mientras que los pertenecientes al Grupo B generarían alrededor de 3,309 GWh con una potencia instalada de 1,406 MW. La electricidad total excedente generada por el sector azucarero sería de **3,756 GWh** durante el periodo de zafra. En la Tabla 12 se presenta un resumen de los resultados.

**Tabla 12**

Potencial técnicamente factible de generación eléctrica excedente en zafra.

	<b>Grupo A</b>	<b>Grupo B</b>	<b>Total</b>
Capacidad a instalar (MW)	218	1,406	1,624
Horas de operación en zafra	2,946	3,036	-
Generación eléctrica total (GWh)	641	4,271	4,911
Consumo propio (GWh)	194	962	1,156
<b>Electricidad excedente (GWh)<sup>a</sup></b>	<b>447</b>	<b>3,309</b>	<b>3,756</b>

Elaboración propia, utilizando las ecuaciones 6 a 10 con los datos de la tabla 11.

Los resultados pueden variar si se calculan por el lector, debido al redondeo.

a. Diferencia entre la generación total y el consumo propio.

La capacidad de las plantas de cogeneración instaladas en los Ingenios azucareros podría utilizarse también en tiempos fuera de zafra, produciendo electricidad exclusivamente para inyectarla a la red. Para determinar el potencial de generación eléctrica fuera de zafra se utilizan las ecuaciones 11, 12 y 13:

$$CEi = \frac{Ge}{Ht} * 10^3 \quad (11)$$

En donde:

$CE_i$ : Capacidad de generación eléctrica excedente instalada, en MW.

$Ge$ : Generación eléctrica excedente durante la zafra, de la tabla 12 en GWh.

$Ht$ : Horas de operación durante la zafra, de tabla 12.

$$Hf = (365 - Dz) * 24 * 0.8 \quad (12)$$

En donde:

$Hf$ : Horas totales de operación fuera de zafra.

365: Número de días en un año.

$Dz$ : Días totales de la zafra, de la Tabla 11.

24: Número de horas en un día.

0.8: Factor de planta del 80%, considerado similar al de una central típica de generación eléctrica [Copar, 2011].

$$Gf = CEi * Hf * 10^{-3} \quad (13)$$

En donde:

$Gf$ : Generación de electricidad fuera de zafra (GWh).

CEi: Capacidad instalada de generación eléctrica excedente, de la ecuación 11, en MW.

Hf: Horas totales de operación fuera de zafra, de ecuación 12.

En tiempos fuera de zafra se obtendrían un total de **4,961 GWh** de electricidad (Tabla 13). Si sumamos los excedentes de electricidad del periodo de zafra con la producción eléctrica del resto del año, obtenemos como resultado un potencial total de generación eléctrica de **8,716 GWh anuales, cantidad equivalente a un 3.1% de la generación neta total de electricidad en México en el año 2012**, que fue de 282,097 GWh<sup>6</sup> (Tabla 14). En un estudio coordinado por la CONUEE en el año 2009, se detectó una capacidad técnicamente viable de instalación de sistemas de cogeneración en la industria azucarera de 1,025 MW [CONUEE, 2009], menor a la que se obtuvo en el presente trabajo, de 1,241 MW.

**Tabla 13**

Potencial técnicamente factible de generación eléctrica fuera de zafra.

	<b>Grupo A</b>	<b>Grupo B</b>	<b>Total</b>
Capacidad excedente instalada (MW)	152	1,090	1,241
Horas de operación fuera de zafra	4,076	3,985	-
<b>Generación eléctrica fuera de zafra (GWh)</b>	<b>618</b>	<b>4,343</b>	<b>4,961</b>

Elaboración propia, utilizando las ecuaciones 11 a 13.

Los resultados pueden variar si se calculan por el lector, debido al redondeo.

**Tabla 14**

Potencial técnicamente factible de generación de electricidad durante y fuera de zafra.

	<b>Grupo A</b>	<b>Grupo B</b>	<b>Total</b>
Electricidad excedente durante la zafra (GWh)	447	3,309	3,756
Generación eléctrica fuera de zafra (GWh)	618	4,343	4,961
<b>Generación anual en el sector azucarero (GWh)</b>	<b>1,065</b>	<b>7,651</b>	<b>8,716</b>

Elaboración propia, resumen de los datos de las tablas 10 y 11.

<sup>6</sup> Generación de energía eléctrica neta = Generación bruta total – Usos propios, calculada con los datos del Sistema de Información de la SENER [SENER, 2014].

## IV.3 POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

### IV.3.1 Características generales

La producción de etanol a partir de la caña de azúcar no es una actividad nueva, en el primer Capítulo se mencionó que desde el siglo XVIII en las haciendas se producía aguardiente a partir de las mieles incristalizables obtenidas junto con el azúcar, también se señaló que en el siglo XX los ingenios azucareros instalaron destilerías para la producción de alcohol etílico, tanto para uso farmacéutico como para bebidas (ron).

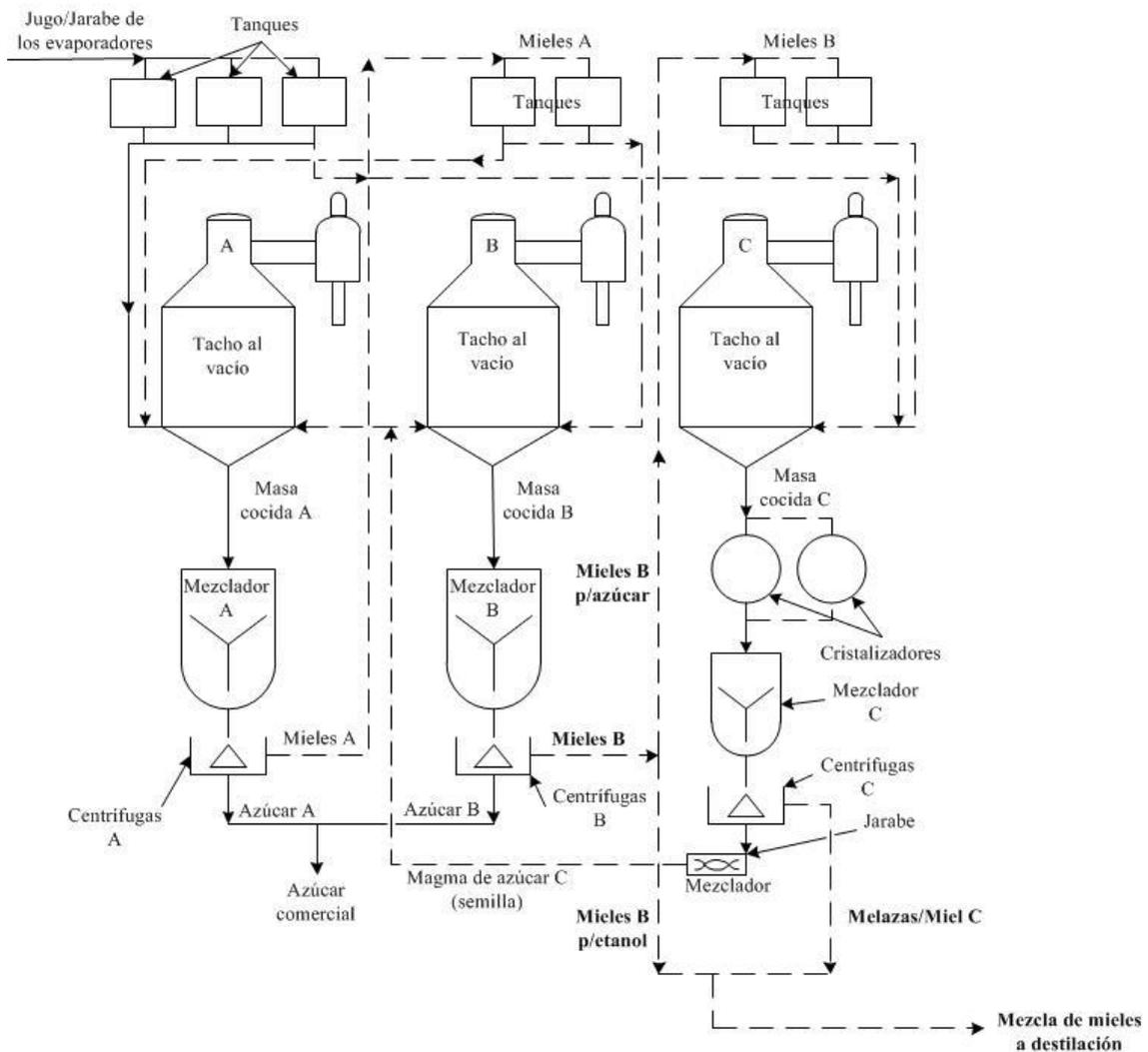
La elaboración de alcohol fue importante para la industria azucarera hasta mediados de los noventa, alcanzando un máximo de 81.2 millones de litros en el año de 1994 [INEGI, 2010]. Esta actividad disminuyó desde que se intensificó la regulación de la misma: en 1995 el proceso de producción, envasado y etiquetado de alcohol etílico se controló por la Secretaría de Salud a través de la norma oficial mexicana NOM-138-SSA1-1995 [SS, 1995], al año siguiente las descargas de las aguas residuales de los ingenios también se vieron sujetas a una norma, la NOM-001-ECOL-1996 [SEMARNAT, 1996]. A causa de ambas regulaciones los costos de producción del alcohol de caña se elevaron, ya que se tuvo que modificar el proceso y tratar las aguas residuales. Para 1996 la producción ya había caído a 66.9 millones de litros anuales, en el 2008 bajó hasta 33.5 millones de litros y en la zafra 2011/12 se produjeron 15.3 millones de litros de alcohol en solamente cuatro ingenios que operaron sus destilerías.

Durante el tiempo en el que ha descendido la producción de alcohol en México no se aprovechó la infraestructura de destilación en la industria azucarera para producir etanol anhidro. El etanol anhidro, comúnmente conocido como bioetanol, es un alcohol etílico que se caracteriza por tener muy bajo contenido de agua y ser compatible para mezclar con gasolinas en cualquier proporción para producir un combustible oxigenado con mejores características. Sustituye al dañino MBTE (metil-terbutil-éter), su uso generalizado es como aditivo de gasolinas, mezclándose (según cada país) en diferentes proporciones y también es utilizado en la industria farmacéutica y en análisis de laboratorio. En Brasil, líder mundial en producción, consumo y exportación de bioetanol de caña, se implementó un programa de aprovechamiento del alcohol

proveniente de la industria azucarera para su utilización como combustible en el transporte debido al incremento en las importaciones de petrolíferos derivadas de la segunda crisis mundial del petróleo, el programa se conoció como “Pró-Álcool” y arrancó en el año de 1975 [Márquez, 1995]. Los brasileños tomaron la decisión de desarrollar la iniciativa Pro-Alcohol cuando las importaciones de petrolíferos alcanzaron un volumen igual al 40% de las exportaciones de petróleo de dicho país [Márquez, 1995]. En contraste, durante el 2013 las importaciones de petrolíferos en México (536.94 miles de barriles al día, o mbd) fueron equivalentes a un 50% de las exportaciones de crudo (1077.68 mbd), mientras que de los 655 miles de barriles diarios de gasolinas que se consumieron en el país, el 48% fueron de importación [SENER, 2014]. El utilizar bioetanol en el transporte trae consigo un beneficio ambiental de reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), en el 2011 el sector transporte fue el mayor contribuidor a las emisiones de GEI con un 39.9% de las 432.7 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq totales asociadas al consumo de combustibles [SENER, 2012].

El sector azucarero es un buen candidato para la fabricación de biocombustible, el cual podría ser consumido en el sector transporte al sustituir un porcentaje de la gasolina utilizada en los motores, reduciendo los GEI asociados a la combustión de gasolinas de fuentes fósiles no renovables y disminuyendo la dependencia de gasolinas importadas.

En el Capítulo II se describió a grandes rasgos el proceso de transformación del azúcar, en la Figura 15 de dicho capítulo se aprecia que durante la cristalización y centrifugación es cuando se separa el azúcar de las mieles incristalizables, esto se realiza en tres pasos y se obtienen las llamadas mieles A, B y C. El etanol se puede obtener mediante una operación de fermentación con una posterior destilación de cualquiera de este tipo de mieles, así como del jugo directo de la caña; en Brasil, por ejemplo, la operación más común se realiza utilizando como materia prima la totalidad de las melazas finales C, y una parte de las mieles B; esto permite una gran flexibilidad para los ingenios ya que pueden ajustar la producción azúcar/bioetanol según les sea más conveniente [Macedo, 2000]. En la Figura 25 se representa el proceso de cristalización del azúcar, resaltando la posible derivación de las mieles intermedias (mieles B) y finales (mieles C) para la producción de bioetanol.



**Figura 25.** Diagrama de proceso de cristalización del azúcar, derivación de mieles B y C a destilación.

Fuente: elaboración propia a partir del diagrama de la Figura 15, Capítulo II.

En el presente trabajo se estima el potencial de producción de bioetanol en los ingenios mexicanos, tomando como base los datos de la zafra 2011/12 y bajo tres diferentes criterios:

1. Bioetanol a partir sólo de las mieles finales (o mieles tipo C).
2. Bioetanol tanto de las mieles tipo C como de las mieles intermedias B, considerando una reducción del 15% en la producción de azúcar. Este porcentaje obedece a que aproximadamente en México se tiene una capacidad de exportación del 16.38% del total del azúcar producido (con base en las zafra 2010/11 y 2011/12 [USDA, 2013]), por lo tanto un 15% de disminución en la producción de azúcar no desabastecería la demanda interna del endulzante.

3. Bioetanol tanto de las mieles tipo C como de las mieles B, considerando una reducción del 50% en la producción de azúcar. Esta propuesta es más atrevida, ya que destinar una gran parte de las mieles B hacia la producción de bioetanol puede tener varias consecuencias, por ejemplo una disminución de la producción de azúcar nacional con el consecuente aumento de las importaciones, un incremento en la superficie de caña cultivada, afectaciones en los precios la caña y del azúcar, entre otros.

#### **IV.3.2 Bioetanol a partir de las mieles finales**

En México, sólo un 4% de las melazas finales se utilizaron para producir etanol durante la zafra 2011/12 [UNC, 2013], el 96% restante fue comercializada por los ingenios y utilizada principalmente como base para la alimentación del ganado y para la fabricación de ron [Ingenios Morelenses, 2013].

En el año 2006 la SENER, en conjunto con la Cooperación Técnica Alemana (GTZ) y un equipo de expertos, elaboró el estudio “Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México” [SENER-GTZ, 2006]. En el mencionado trabajo se encontró que las melazas mexicanas contienen entre un 32% y un 63% de Azúcares Reductores Totales (ART, o azúcares fermentables) [SENER-GTZ, 2006]. A partir de este contenido de ART se pueden obtener entre 6 y 12 litros de bioetanol por tonelada de caña procesada (l/t) [SENER-GTZ, 2006]. Este rango es muy amplio, sin embargo podemos estimar el rendimiento promedio en México para la producción de alcohol de las mieles finales por tonelada de caña procesada con base en las estadísticas que publica la Unión Nacional de Cañeros. En la Tabla 15 se presentan tres columnas, en la primera se muestra la proporción de mieles finales por tonelada de caña procesada, en la segunda el rendimiento de la producción de alcohol de 96° a partir de las mieles finales y en la tercera el rendimiento de producción de alcohol por tonelada de caña procesada, calculado a partir de las dos primeras columnas. El promedio para las diez zafras analizadas es de 8.87 l/t, que cae dentro de los 6 a 12 l/t reportados en el estudio de la SENER.

**Tabla 15**

Rendimiento de la producción de alcohol a partir de las melazas en México.

Zafra	Mieles finales por ton de caña (kg)	Alcohol por ton de mieles (lt)	Alcohol por ton de caña (lt)
2002/03	37.71	239.95	9.05
2003/04	36.70	238.16	8.74
2004/05	37.22	219.72	8.18
2005/06	38.03	237.60	9.04
2006/07	36.06	240.00	8.66
2007/08	38.18	258.05	9.85
2008/09	35.07	268.80	9.43
2009/10	34.39	244.51	8.41
2010/11	37.72	231.26	8.72
2011/12	36.81	234.68	8.64
<b>Promedio =</b>			<b>8.87</b>

Elaboración propia con datos de la UNC [UNC, 2013]

Con la ecuación 14 se calcula entonces el potencial de producción de bioetanol a partir de las mieles finales C, tomando las toneladas de caña procesadas en la zafra 2011/12 y el rendimiento promedio de obtención de alcohol en las últimas 10 zafras. El resultado es un potencial de **410.12 millones de litros de bioetanol**, producidos solo a partir de mieles tipo C.

$$Bc = Tc * Ic \quad (14)$$

En donde:

Bc: potencial de producción de bioetanol a partir de las melazas finales (mieles tipo C), en litros.

Tc: toneladas de caña procesadas durante la zafra 2011/12 (46,231,229 ton).

Ic: rendimiento de la producción de bioetanol a partir de las melazas finales, de 8.87 litros por tonelada de caña procesada.

#### IV.3.3 Bioetanol a partir de las mieles intermedias y finales

Como se mencionó anteriormente, en Brasil la práctica más rentable para los ingenios azucareros es la de producir bioetanol tanto de las mieles finales C como de las intermedias B, modulando la utilización de estas últimas según la cantidad de azúcar y etanol que se desee elaborar. La relación entre la producción de etanol y azúcar es lineal

e inversamente proporcional, es decir, al aumentar la cantidad de mieles intermedias destinadas a la planta de destilación se reduce la cantidad de azúcar producido, y a su vez aumenta la de etanol. En las instalaciones que producen tanto etanol como azúcar se suele utilizar la siguiente expresión para determinar la relación etanol-azúcar [SENER-GTZ, 2006]:

$$\eta_{fab} = \frac{ART_{productos}}{ART_{caña}} \quad (15)$$

En donde:

$\eta_{fab}$ : eficiencia de la fábrica

$ART_{productos}$ : Azúcares reductores totales contenidos en los productos

$ART_{caña}$ : Azúcares reductores totales contenidos en la caña

Para producir un litro de etanol anhidro son necesarios, en teoría, 1.473 kg de azúcares reductores totales (ART, suma de la sacarosa más los otros reductores como la glucosa y fructosa, todos fermentables), y para obtener un kilogramo de azúcar estándar se necesitan 1.05 kg de ART [SENER-GTZ, 2006]. La caña mexicana en las últimas 10 zafas contenía en promedio un 13.57% en peso de sacarosa [UNC, 2013], y, a falta de datos experimentales, se puede considerar que el resto de los ART en la caña representan un 0.5% en el peso de la misma [SENER-GTZ, 2006]. Por lo tanto, la ecuación 15 se puede expresar de la siguiente manera:

$$\eta_{fab} = \frac{1.05 * Az + 1.473 * Et}{140.7} \quad (16)$$

En donde:

$\eta_{fab}$ : eficiencia de la fábrica

Az: kilogramos de azúcar obtenidos por tonelada de caña procesada

Et: litros de etanol por tonelada de caña procesada

140.7: son los kilogramos de ART contenidos en una tonelada de caña.

Ahora, si tomamos la eficiencia de las fábricas azucareras promedio en el país durante las últimas 10 zafas, que es de un 82.7% [UNC, 2013], y una base de una tonelada de caña procesada, se puede establecer una ecuación para determinar la producción de etanol dependiendo de los kilogramos de azúcar que se deseen sacrificar:

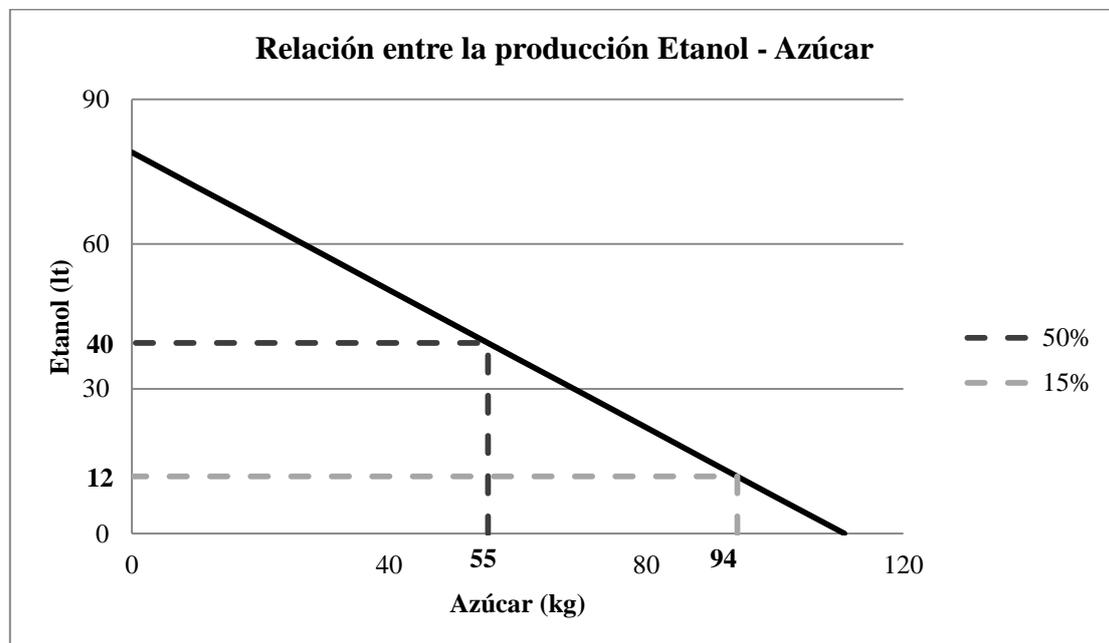
$$Et = 79 - 0.713 * Az \quad (17)$$

En donde:

Et: litros de bioetanol.

Az: kilogramos de azúcar.

Con la ecuación 17 obtenemos que con una reducción del 15% en la producción de azúcar se obtendrían 94.2 kg de azúcar y 11.85 lt de bioetanol, mientras que al disminuir un 50% la elaboración de azúcar se producirían 55.4 kg de endulzante y 39.50 lt de bioetanol. En la Figura 26 se presenta el gráfico de la ecuación 17.



**Figura 26.** Relación entre la producción Etanol-Azúcar en un ingenio elaborador de ambos productos.

Las líneas punteadas roja y verde representan el caso en el que se redujera un 50% y un 15%, respectivamente, la producción de azúcar con tal de aumentar la de bioetanol. Elaboración propia, tomando como base una tonelada de caña procesada, con datos de rendimiento y eficiencia promedio en México de las zafas 2002/03 a 2011/12.

Tomando como base la producción de caña de la zafra 2011/12, que fue de 46,231,229 toneladas, se podrían obtener 957.97 millones de litros de bioetanol (mdl), tanto de las mieles B como de las mieles finales con una disminución del 15% en la producción de azúcar, y hasta 2,236.30 Mdl de bioetanol de ambas mieles sacrificando un 50% de la producción azucarera. En la Tabla 16 se presenta un resumen de los resultados.

**Tabla 16**

Potencial de producción de bioetanol en la industria azucarera.

Caña procesada zafra 2011/12 (ton)	46,231,229	
<b>Bioetanol de mieles C</b>		
Rendimiento (l/tc <sup>a</sup> )	8.87	
Potencial (mdl <sup>b</sup> )	410.12	
Potencial (mbd <sup>c</sup> )	7.07	
<b>Bioetanol de mieles B</b>		
	<b>% reducción de azúcar</b>	
	<b>15%</b>	<b>50%</b>
Rendimiento (l/tc)	11.85	39.50
Potencial (mdl)	547.85	1,826.18
Potencial (mbd)	9.44	31.47
<b>Potencial total de bioetanol (mieles C + B)</b>		
	<b>% reducción de azúcar</b>	
	<b>15%</b>	<b>50%</b>
millones de litros/zafra	957.97	2,236.30
miles de barriles diarios	16.51	38.54
% consumo gasolinas <sup>d</sup>	2.52%	5.88%

Elaboración propia.

- a. l/tc: litros de bioetanol por tonelada de caña procesada.
- b. mdl: millones de litros por zafra.
- c. mbd: conversión a miles de barriles al día, 1 barril = 158.99 l.
- d. Porcentaje que representa el potencial de bioetanol con respecto al consumo nacional de gasolinas en el año 2013, que fue de 655.14 mbd [SENER, 2014].

El sacrificar un 15% de la producción de azúcar en los ingenios mexicanos nos permitiría obtener una cantidad de bioetanol suficiente para sustituir alrededor del 2.5% del consumo nacional de gasolinas, recordemos que este porcentaje de reducción de la elaboración de azúcar se propuso por ser menor al de las exportaciones del endulzante con el objetivo de no desabastecer la demanda nacional. Si se plantea un escenario que tenga un mayor impacto en la sustitución de las gasolinas de fuentes fósiles necesariamente se vería afectado el mercado nacional del azúcar y de la caña, siendo posible un aumento de las hectáreas cultivadas para este propósito y una alteración en los precios de la caña y del azúcar. Es necesario hacer una investigación más a fondo al respecto para conocer los posibles impactos económicos, ambientales y sociales que derivarían de un programa de sustitución de combustibles fósiles por bioetanol de caña de azúcar.

## IV.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS ALTERNATIVAS

### IV.4.1 Electricidad excedente

Anteriormente se describió el sistema de suministro de energía que utilizan los ingenios azucareros, el cual consiste en un esquema de cogeneración: se quema biomasa o combustibles fósiles en calderas, se genera vapor y con éste se abastece tanto al proceso que demanda energía térmica como a las turbinas que producen la electricidad (Capítulo II). En Brasil, durante la década de los 80's y parte de los 90's, lo usual era encontrar sistemas de cogeneración diseñados para satisfacer el consumo interno de los ingenios, con calderas que generaban el vapor alrededor de 21 kgf/cm<sup>2</sup> y 350 °C [Dantas, 2013]. Conforme la regulación del mercado eléctrico brasileño se fue abriendo, los ingenios azucareros modificaron los esquemas de cogeneración elevando la presión de generación del vapor en las calderas a 65 y algunos hasta 100 kgf/cm<sup>2</sup> con el objetivo de aumentar la eficiencia del ciclo termodinámico y generar excedentes de electricidad, ya que comercializarlos se ha vuelto una actividad rentable en dicho país [Dantas, 2013].

En México, actualmente la mayoría de los ingenios azucareros generan vapor a los niveles de presión que se utilizaban en Brasil hace 30 años [UNC, 2013], las plantas de generación de energía de los ingenios Mexicanos no se han modernizado, esto a pesar de que la regulación permite la comercialización de electricidad por parte de un particular bajo los esquemas descritos en la “Ley del Servicio Público de la Energía Eléctrica” (LSPEE) [Cámara de Diputados, 2012].

El marco regulatorio que abarcan las actividades de generación y comercialización de energía eléctrica es amplio, el caso particular de los ingenios azucareros lo podemos ubicar dentro de las disposiciones señaladas en la Tabla 17.

Tabla 17

Marco regulatorio aplicable a la generación y comercialización de energía eléctrica de los ingenios.

Disposición	Descripción
Ley del Servicio Público de la Energía Eléctrica (LSPEE) <sup>a</sup> . Última actualización: 09/04/2012	Señala las actividades que no se consideran servicio público (Art. 3º), las de autoabastecimiento y cogeneración están incluidas; para dichas actividades la SENER entregará los permisos (Art. 37).
Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE) <sup>b</sup> Última actualización: 7/06/2013	Considera dentro de las energías renovables a los bioenergéticos (Art. 3º), según lo determine la LPDB.
Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (LPDB) <sup>c</sup> . Última actualización: original del 01/02/2008	Dentro de los bioenergéticos se reconoce a la biomasa de actividades agrícolas (Art. 2º), es el caso del bagazo de caña.
Reglas para la interconexión al sistema eléctrico nacional para permisionarios o generadores con fuentes de energía renovable o cogeneración eficiente <sup>d</sup>	La CRE publicó este conjunto de reglas el 22 de mayo de 2012, los ingenios caen dentro del modelo de contrato de interconexión para Centrales de Generación con Energía Renovable o Cogeneración Eficiente (tensión mayor a 69 kV y capacidad mayor a 500 kW).
Modelo de Contrato de Interconexión para Centrales de Generación de Energía Eléctrica con Energía Renovable o Cogeneración Eficiente <sup>e</sup>	Publicado el 28 de abril de 2010, establece que el pago (de parte de CFE) de la energía sobrante del suministrador en un mes dado será el correspondiente al 85% del Costo Total de Corto Plazo (CTCP) para ese mes y en el periodo horario y tarifa correspondiente.

a) [Cámara de Diputados, 2012], b) [Cámara de Diputados, 2013b], c) [Cámara de Diputados, 2008], d) [CRE, 2012], e) [CRE, 2010].

Según la regulación energética Mexicana<sup>7</sup> existen entonces dos posibilidades de comercialización de energía eléctrica excedente para los ingenios: 1) venta de la electricidad sobrante a la CFE, a un precio correspondiente al 85% del CTCP, y 2) comercialización bajo una sociedad de autoconsumo. Las dos opciones mencionadas se evalúan económicamente para dos ingenios tipo, siguiendo la clasificación de los ingenios mexicanos del apartado anterior: Grupo A, en el que se incluyen a los ingenios que operan a una presión de 17 kgf/cm<sup>2</sup> o menor, y Grupo B, en el que se ubican los demás ingenios.

Un parámetro de operación importante es la capacidad de molienda de la instalación, con base en esta se calcula la potencia de la planta de cogeneración: un ingenio tipo A muele alrededor de 3,000 toneladas de caña por día (tcd), uno tipo B muele aproximadamente lo doble (6,000 tcd) [UNC, 2013]. Los datos típicos de la operación de los Ingenios A y B considerados para la evaluación económica se presentan en la Tabla 18.

<sup>7</sup> A finales de 2013 se modificó la Constitución para ampliar la participación de la industria privada en la energía eléctrica. Esto no modifica en gran medida las opciones presentadas en esta tesis, ya que la cogeneración implicaría vender los excedentes a CFE o a alguna empresa privada.

**Tabla 18**

Datos típicos de operación considerados para la evaluación económica de electricidad excedente.

	<b>Ingenio A</b>	<b>Ingenio B</b>
Capacidad de molienda (tcd) <sup>a</sup>	3,000	6,000
Capacidad de molienda (tch) <sup>b</sup>	125	250
Días de zafra <sup>c</sup>	151	155
Tiempo perdido <sup>d</sup>	19.6%	19.6%
Días de operación por zafra <sup>e</sup>	121	125
Horas de operación por zafra <sup>f</sup>	2,912	2,989
Días fuera de zafra <sup>g</sup>	244	240
Factor de planta <sup>h</sup>	0.8	0.8
Días de operación fuera de zafra <sup>i</sup>	195	192
Horas de operación fuera de zafra <sup>j</sup>	4,678	4,617

- a. Capacidad de molienda de caña en toneladas de caña por día [UNC, 2013]
- b. Capacidad de molienda en toneladas de caña por hora, dividiendo entre 24 la anterior.
- c. Días de zafra promedio del grupo en la temporada 2011/12 [UNC, 2013]
- d. Tiempo de paro promedio de los ingenios mexicanos, zafra 2011/12 [UNC, 2013]
- e. Días de operación del ingenio durante la zafra, considerando el tiempo perdido.
- f. Horas de operación durante la zafra considerando tres turnos (24 h/d).
- g. Días restantes del año en el periodo fuera de zafra (365 – días de zafra)
- h. Factor de planta similar al de una planta termoeléctrica [COPAR, 2011]
- i. Días de operación fuera de zafra considerando el factor de planta
- j. Horas de operación fuera de zafra considerando tres turnos (24 h/d)

Los escenarios de evaluación económica se construyen contemplando las dos opciones de venta de electricidad (a CFE o en sociedad de autoconsumo) para ambos tipos de ingenios (A o B), considerando además el periodo de generación excedente de electricidad: 1) solamente durante el periodo de zafra, y 2) durante y fuera del periodo de zafra, es decir, durante todo el año.

La propuesta técnica para los sistemas de cogeneración a instalar se basa en la que se presentó anteriormente en este Capítulo (Capítulo IV, apartado “b” Potencial de generación de electricidad excedente), en la cual se contempla que los ingenios del Grupo A instalen sistemas de cogeneración a 65 kgf/cm<sup>2</sup> y 480 °C, y los del Grupo B a 100 kgf/cm<sup>2</sup> y 530 °C. Los costos de inversión y de operación y mantenimiento (O&M) de cada esquema de cogeneración, así como los datos técnicos básicos, se presentan en la Tabla 19.

**Tabla 19**

Información técnica y de costos para los esquemas de cogeneración propuestos.

	Ingenio A	Ingenio B
<b>Parámetros básicos del sistema de cogeneración<sup>a</sup></b>		
Presión de vapor (kgf/cm <sup>2</sup> )	65	100
Temperatura del vapor (°C)	480	530
Consumo específico de vapor del ingenio (t/t)	0.5	0.4
<b>Potencial de generación eléctrica (kWh/tc)<sup>a</sup></b>		
Excedente	57.6	86
Para usos propios	25	25
Total	82.6	111
<b>Capacidad de cogeneración a instalar (MW)<sup>b</sup></b>		
Excedente	7.2	21.5
Para usos propios	3.1	6.3
Total	10.3	27.8
<b>Costos del sistema de cogeneración<sup>c</sup></b>		
Costo unitario de inversión (MX\$2013/kW)	20,614	19,793
Costo de inversión total (MX\$2013)	212,841,652	549,260,822
Costo unitario de O&M (MX\$2013/kW·año)	1,188	1,188
Costo total de O&M (MX\$2013/año)	12,261,877	32,955,649
<b>Generación de electricidad excedente para comercializar (MWh)<sup>d</sup></b>		
En periodo de zafra	20,968	64,271
Fuera de zafra	33,683	99,255
Total anual	54,651	163,526

a. Ver Tabla 5, Capítulo 2.

b. Calculada utilizando los datos de la Tabla 5 junto con los de la Tabla 18.

c. [Dantas, 2013] y [Alonso-Pippo et al., 2008]. Los costos son en pesos mexicanos del 2013.

d. Calculada multiplicando la capacidad a instalar (b) por las horas de operación (Tabla 18).

Al renovar el sistema de cogeneración de la planta azucarera, los ingenios obtendrían ingresos por la venta de los excedentes de electricidad. En la opción de venta a CFE se ofrece un precio del 85% del CTCP, para el presente trabajo se tomó el promedio de dicho costo para la región tarifaria de Veracruz, ya que es el Estado que concentra una mayor producción de azúcar con un 35% durante la zafra 2011/12 [UNC, 2013]. En el mes de diciembre del 2013 el CTCP mencionado fue de 517.07 pesos por MWh [CFE, 2014]. En la opción de comercialización de electricidad en sociedades de autoconsumo se debe considerar también el costo por porteo (transmisión y distribución de la electricidad) que cobra la CFE a los permisionarios, al generar electricidad a partir de fuentes de energía renovable la CFE establece un cobro de 0.03037 \$/kWh (a pesos del 2010) [CRE, 2010b]. Para que una propuesta de sociedad de autoabastecimiento sea atractiva para los posibles socios ésta debe de generar beneficios económicos tanto para el generador (en este caso los ingenios) como para los consumidores. Los usuarios de

energía eléctrica de alto consumo son posibles candidatos para convertirse en socios consumidores de energía, siguiendo esta lógica se considera que el ingenio podría comercializar la electricidad sobrante entre los posibles socios a un precio equivalente al 80% del correspondiente a la tarifa comercial Ordinaria a Media Tensión (OM), que en diciembre de 2013 fue de 1.431 \$/kWh para la Región Sur que es en la que se concentran la mayoría de los municipios de Veracruz [CFE, 2014b]. En la Tabla 20 se resume la información de precios de venta de electricidad mencionados.

**Tabla 20**

Información para la evaluación económica y sobre los precios de venta de electricidad considerados.

<b>Información para la evaluación económica</b>	
Tasa de descuento considerada <sup>a</sup>	12%
Tiempo de vida de la instalación <sup>b</sup>	25 años
<b>Opciones de venta de electricidad</b>	<b>Precios</b>
<b>A CFE</b>	
Precio 85% CTCP (MX\$2013/MWh) <sup>c</sup>	517.07
<b>En sociedad</b>	
Costo por transmisión (MX\$2010/kWh) <sup>d</sup>	0.03037
Costo por transmisión (MX\$2013/kWh) <sup>e</sup>	0.03395
Precio referencia OM dic'13 (MX\$2013/kWh) <sup>f</sup>	1.431
Factor de precio de la tarifa OM	80%
Precio para la evaluación (MX\$2013/kWh) <sup>g</sup>	1.145

a. Tasa de descuento contemplada por la CFE para la evaluación de los proyectos de inversión de plantas generadoras de electricidad [COPAR, 2011]

b. [Alonso-Pippo et al., 2008]

c. [CFE, 2014]

d. [CRE, 2010b]

e. Conversión de pesos de 2010 a pesos de 2013, calculado con el factor  $2013/2010 = 1.118$  obtenido a partir del Índice Nacional de Precios al Consumidor [INEGI, 2013].

f. [CFE, 2014B]

g.  $(\text{Precio de referencia}) \times (\text{factor}) = 1.431 \times 0.8 = 1.145$

Los flujos de efectivo anualizados, así como los resultados de la evaluación económica de los diferentes escenarios de generación de energía eléctrica excedente en los ingenios tipo se presentan en la Tabla 21. Con base en los indicadores de rentabilidad se puede considerar que existe sólo una opción económicamente viable de venta de electricidad para los ingenios azucareros: en la que se produzca electricidad durante y fuera de la zafra (es decir, todo el año) y en sociedades de autoabastecimiento. Un ingenio pequeño (Ingenio A) tendría que realizar una inversión de alrededor de 213 millones de pesos

(mdp), y generar electricidad durante todo el año para alcanzar un periodo simple de retorno de la inversión de 4.4 años y una tasa interna de rendimiento (TIR) del 23%. La inversión para el Ingenio B sería mayor, cercana a 550 Mdp, pero los indicadores de rentabilidad son más atractivos: 3.7 años para el retorno de la inversión y 27% para la TIR. El vender electricidad a la CFE no es una opción económicamente atractiva, pero sí lo es si se vendiera la electricidad alrededor de un 80% del precio de la tarifa OM bajo un esquema de sociedad de autoconsumo de energía, resultando esta posibilidad interesante tanto para el ingenio como para los posibles consumidores.

**Tabla 21**

Balance financiero anualizado y resultados de la evaluación económica para los diferentes escenarios de producción y venta de electricidad.

Concepto	Balance financiero anualizado <sup>a</sup>			
	Ingenio A		Ingenio B	
	Sólo zafra	Todo el año	Sólo zafra	Todo el año
Costo total de la inversión	212,841,652	212,841,652	549,260,822	549,260,822
Costo anualizado de la inversión	27,137,304	27,137,304	70,030,738	70,030,738
Costo anual de O&M	4,076,388	12,261,877	11,246,133	32,955,649
Costo anual de porteo (sociedad)	711,914	1,855,547	2,182,168	5,552,132
Ingresos de electricidad excedente				
A CFE	10,841,871	28,258,466	33,232,648	84,554,444
En sociedad	24,004,067	62,564,674	73,577,588	187,204,823
Flujo neto de efectivo anual <sup>b</sup>				
A CFE	6,765,483	15,996,590	21,986,515	51,598,794
En sociedad	19,215,765	48,447,250	60,149,286	148,697,042
Indicadores de rentabilidad <sup>c</sup>	Resultados de la evaluación económica			
	Ingenio A		Ingenio B	
	Sólo zafra	Todo el año	Sólo zafra	Todo el año
<b>Venta de excedentes a CFE</b>				
Tiempo de retorno (años)	31.5	13.3	25.0	10.6
B/C	0.25	0.59	0.31	0.74
TIR	0%	6%	0%	8%
<b>Comercialización en sociedad</b>				
Tiempo de retorno (años)	11.1	4.4	9.1	3.7
B/C	0.71	1.79	0.86	2.12
TIR	8%	23%	10%	27%

a. Todas las cantidades son en pesos mexicanos del 2013.

b. Flujo neto: A CFE = Ingresos – Costo de O&M; En Sociedad = Ingresos – Costo de O&M – Costos de Porteo.

c. Indicadores (Tiempo de retorno, B/C y TIR) calculados según las recomendaciones de Remer y Nieto [Remer y Nieto, 1995].

Ahora, veamos la situación actual de las modalidades de generación eléctrica en los ingenios azucareros en México. En la Tabla 22 se aprecia que 27 de los 54 ingenios

mexicanos ya generan electricidad bajo el esquema de autoabastecimiento, solamente seis ingenios lo hacen en la modalidad de cogeneración (venta a CFE) y aún existen 21 ingenios con el permiso de Usos Propios Continuos (UPC). Como hemos visto, en todos los ingenios hay una gran oportunidad de modernización tecnológica, pero especialmente en los 21 ingenios con permiso UPC que obtuvieron su licencia de generación entre el año 1968 y 1987. Además, si recordamos el potencial de generación eléctrica del sector azucarero, presentado en la Tabla 14 del presente capítulo, de los 8,716 GWh/año que son técnicamente factibles de generar sólo se tiene permiso para 1,442.5 GWh/año (16.6% del potencial).

**Tabla 22**

Ingenios azucareros permisionarios de generación eléctrica, al 31 de Marzo de 2014.

Tipo	#	Capacidad total autorizada (MW)	Capacidad promedio (MW/ing)	Generación anual autorizada (GWh)	Generación promedio (GWh/ing)	Horas de operación (h/año)	Fechas de otorgam.
AUT.	27	308.53	11.43	487.72	18.06	1,581	1998-2010
COG.	6	128.36	21.39	458.79	76.47	3,574	2005-2012
U.P.C.	21	252.41	12.02	495.99	23.62	1,965	1968-1987
<b>Total</b>	<b>54</b>	<b>689.30</b>	<b>44.84</b>	<b>1,442.50</b>	<b>118.15</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

Fuente: Tabla de permisos de generación e importación de energía eléctrica de la CRE [CRE, 2014].

AUT: permisionario bajo modalidad de contrato de autoabastecimiento.

COG: permisionario de cogeneración.

U.P.C.: permisionario de usos propios continuos.

#### IV.4.2 Bioetanol

Actualmente, la producción de bioetanol es una actividad rentable para la industria azucarera de Brasil: durante la zafra 2012/13 se produjeron 590 millones de toneladas (mdt) de caña, de las cuales el 50% se utilizaron para la producción de etanol y se obtuvieron 23.2 mil millones de litros del biocombustible [Unica, 2014], lo que permite que en dicho país toda la gasolina comercializada incluya de un 18 a un 25% de bioetanol de caña [Unica, 2014].

De manera análoga a la evaluación de generación eléctrica se proponen dos ingenios tipo, uno representativo del Grupo A (Ingenio A) y otro del Grupo B (Ingenio B) para la evaluación económica de la producción de bioetanol, se toman datos característicos de operación de los 13 ingenios pertenecientes al Grupo A y de los 39 ingenios del Grupo

B y se evalúan ambos casos. En la Tabla 23 se presenta la información de operación para cada caso.

**Tabla 23**

Datos típicos de operación considerados para la evaluación económica.

	<b>Ingenio A</b>	<b>Ingenio B</b>
Capacidad de molienda (tcd) <sup>a</sup>	3,000	6,000
Rendimiento de mieles C (%tc) <sup>b</sup>	3.70%	3.68%
Rendimiento de azúcar (%tc) <sup>c</sup>	10.54%	11.00%
Proporción de azúcar refinado <sup>d</sup>	30.3%	31.1%
Días de zafra <sup>e</sup>	151	155
Tiempo perdido <sup>f</sup>	19.6%	19.6%
Días de operación por zafra <sup>g</sup>	121	125

Fuentes: Unión Nacional de Cañeros [UNC, 2013], SAGARPA [SAGARPA, 2013] y comunicación personal con ingenios azucareros [Ingenios morelenses, 2013].

- a. La capacidad promedio de molienda de los ingenios del Grupo A es de alrededor de 3,000 toneladas de caña por día (tcd), mientras que la del Grupo B es cercana a 6,000 tcd [UNC, 2013].
- b. Porcentaje promedio de mieles obtenidas por tonelada de caña procesada.
- c. Cantidad promedio de azúcar obtenida por tonelada de caña procesada.
- d. Porcentaje de producción de azúcar refinado con respecto al total producido.
- e. Promedio de duración de la zafra 2011/12 para cada grupo.
- f. Tiempo perdido en las instalaciones durante la zafra, promedio de las zafras 2002/03 a 2011/12.
- g. Días reales de operación por zafra, descontando el tiempo perdido.

Anteriormente se mencionaron tres diferentes posibilidades de obtención de bioetanol: 1) exclusivamente de mieles finales, 2) tanto de mieles finales como de mieles B con una reducción del 15% en la obtención de azúcar y, 3) tanto de mieles finales como de mieles B con una reducción del 50% en la producción de azúcar. Con los datos de la Tabla 23 y los rendimientos de producción de bioetanol de la Tabla 16 se obtiene la capacidad necesaria a instalar en cada ingenio tipo según el modelo de producción de bioetanol (Tabla 24).

**Tabla 24**

Capacidad de destilación a instalar según el tipo de ingenio y el modelo de producción elegido.

Modelo de producción	Capacidad a instalar (l/d)	
	Ingenio A	Ingenio B
Mieles C	26,613	53,226
C+B - 15% Az	62,164	124,328
C+B - 50% Az	145,116	290,232

Fuente: elaborada a partir de las Tablas 16 y 23.

El costo referencia de la inversión, de 6.4 millones de dólares del 2008, es para una planta de destilación de 300 mil l/d, para la cual se contempla la instalación de plantas de fermentación y destilación, tanques de almacenamiento de etanol, laboratorio, juego de refacciones para los equipos, sistema de enfriamiento de agua y deshidratación en tamiz molecular [Alonso-Pippo et al., 2008]. En ingeniería es sabido que existe un “escalamiento de costos” que depende de la capacidad de los equipos a instalar, por lo general entre mayor es la capacidad el precio unitario de instalación (pesos o dólares por kW, por litros, por toneladas de capacidad, etc.) se reduce, este es el caso de las plantas de destilación [Ulrich y Vasudevan, 2009]. Para llevar el costo de referencia mencionado a los distintos niveles de capacidad según el modelo de producción y el ingenio tipo (Tabla 24) se utiliza la siguiente ecuación:

$$C1 = C2 \cdot \left(\frac{K1}{K2}\right)^a \quad (18)$$

En donde:

C1: costo del equipo a determinar.

C2: costo del equipo de referencia.

K1: capacidad del equipo del que se desea obtener el costo.

K2: capacidad del equipo de referencia.

a: factor de escalamiento de costos por capacidad, de 0.6 para el caso de las plantas de destilación [Ulrich y Vasudevan, 2009].

La elaboración del etanol a partir de mieles C implica para los ingenios el dejar de recibir los ingresos derivados de la venta de las mismas, así como el utilizar mieles intermedias tendría como consecuencia un costo por la reducción en las ventas de azúcar. Estos ingresos perdidos representan el flujo negativo en el balance financiero de

la evaluación económica. El flujo positivo lo constituyen los ingresos obtenidos por la venta del bioetanol, para los que se consideraron dos precios de venta: 1) el propuesto por PEMEX en la licitación publicada en el año 2012 [PEMEX, 2012], y 2) el correspondiente al 80% del precio de la gasolina Magna a diciembre de 2013. En la Tabla 25 se presenta la información utilizada para realizar el balance financiero.

**Tabla 25**

Información utilizada para la evaluación económica de la producción de bioetanol.

Costo referencia de inversión (US\$2008) <sup>a</sup>	6,400,000
Tiempo de vida de la planta (años) <sup>a</sup>	10
Factor de escala por capacidad <sup>b</sup>	0.6
Tipo de cambio peso/dólar 2013 <sup>c</sup>	12.76
Tipo de cambio peso/dólar 2008 <sup>c</sup>	11.17
Tasa de descuento <sup>d</sup>	12%
MX\$2013/MX\$2008 <sup>e</sup>	1.21
Precio de bioetanol propuesto por PEMEX (MX\$/lt) <sup>f</sup>	7.47
Precio de bioetanol al 80% de gasolina magna (MX\$/lt) <sup>g</sup>	9.70
Precio de venta de azúcar estándar (MX\$/t) <sup>h</sup>	8,016
Precio de venta de azúcar refinado (MX\$/t) <sup>h</sup>	9,987
Precio de venta de mieles C (MX\$/t) <sup>i</sup>	1,000

a. [Alonso-Pippo et al., 2008].

b. [Ulrich y Vasudevan, 2009].

c. [Secretaría de Economía, 2014].

d. Similar a la que se utiliza en CFE para evaluar los proyectos de inversión [COPAR, 2011].

e. Factor de conversión de pesos del 2008 a pesos del 2013, obtenido a partir del Índice Nacional de Precios al Consumidor [INEGI, 2013].

f. Precio de compra propuesto por PEMEX en la licitación del 2012 [PEMEX, 2012].

g. 80% del precio de venta de la gasolina PEMEX Magna, en diciembre del 2013 [PEMEX, 2013].

h. Precios de venta de azúcar para la zafra 2012/13 [SAGARPA, 2013].

i. Las mieles finales son vendidas por los ingenios a un precio de alrededor de 1,000 pesos por tonelada [Ingenios morelenses, 2013].

Utilizando la información de las Tablas 23, 24 y 25 se elabora el balance financiero anualizado y se obtienen los resultados de la evaluación económica de la producción de bioetanol, presentados en la Tabla 26, a partir de la cual se rescatan los siguientes aspectos relevantes:

1. Los esquemas productivos rentables, tanto para ingenios pequeños (Ingenio A) como para los grandes (Ingenio B), son en los que se considera la obtención de

- bioetanol de las mieles finales (Mieles C) y de mieles finales e intermedias con una reducción del 15% en la producción de azúcar ( $C + B - 15\%Az$ ).
2. Dentro de los escenarios rentables, los pertenecientes al Ingenio B son más atractivos (menor tiempo de retorno de inversión, mayor relación beneficio/costo y mayor TIR). Esto se debe a que existe un factor de escalamiento por capacidad en la inversión de las plantas destiladoras (es decir, entre mayor sea la capacidad instalada el precio unitario de los equipos es menor), a que los ingresos provenientes de la venta del bioetanol son mayores y a que el Ingenio B cuenta con mejores factores de operación (más días de operación por zafra, mejor rendimiento de los ingenios, etc.) que el Ingenio A.
  3. Los flujos netos de efectivo y, por consecuencia, los indicadores de rentabilidad, son muy sensibles a los precios de venta del azúcar. En la presente evaluación se utilizaron los precios promedio de la zafra 2012/13 (ver Tabla 25), sin embargo estos han ido a la baja y durante la zafra 2013/14 han disminuido hasta alrededor de 7,000 pesos por tonelada de azúcar estándar [SAGARPA, 2013]. Los precios del azúcar a la baja hacen más atractiva la opción de sustitución de azúcar por bioetanol, en este sentido el escenario " $C + B - 15\%Az$ " resulta muy atractivo ya que se puede modular la relación bioetanol/azúcar sin comprometer el abasto nacional del endulzante y optimizando los ingresos de los ingenios azucareros al ajustarse su producción según las condiciones del mercado.
  4. Todos los escenarios de producción de bioetanol que contemplan una reducción del 50% en la venta de azúcar ( $C + B - 50\%Az$ ) no son rentables con los parámetros utilizados en la presente evaluación. Si un ingenio azucarero, ya sea grande o pequeño, decidiera producir una mayor cantidad de bioetanol que la obtenida al sacrificar un 15% de su producción de azúcar, tendría que incrementar la compra de caña de azúcar y la capacidad de molienda de sus instalaciones, o bien conseguir mieles finales de otros ingenios. Cada caso en particular debería analizarse a fondo, ya que un aumento en la compra de caña de azúcar puede tener consecuencias como la sustitución de cultivos locales, cambios de uso de suelo, mayor consumo de agua de riego, aumento de los GEI derivados de la fertilización de los campos y del transporte de la caña, entre otros.

Es importante señalar que la evaluación económica presentada en este trabajo tiene el propósito de servir como referencia para diferentes opciones de producción de bioetanol, los resultados no son definitivos y pueden variar para cada ingenio ya que sus condiciones de operación y de comercialización de productos son diferentes. Sin embargo este análisis funciona bien como base para un estudio posterior a fondo, en el que se incluyan los costos que no se contemplaron ya que no se tuvo acceso a ellos por ser muy particulares de cada instalación, por ejemplo: los derivados del procesamiento de las mieles B hasta azúcar estándar o refinado, de la mano de obra necesaria para la producción de bioetanol, del tratamiento de los residuos generados, de la producción del vapor necesario para la operación de la planta destiladora, entre otros.

Tabla 26

Balance financiero anualizado y resultados de la evaluación económica para los diferentes escenarios de producción de bioetanol.

Concepto	Balance financiero anualizado <sup>a</sup>					
	Ingenio A			Ingenio B		
	Mieles C	C+B - 15%Az	C+B - 50%Az	Mieles C	C+B - 15%Az	C+B - 50%Az
Costo total de la inversión	20,047,342	33,437,136	55,749,369	30,449,341	50,786,720	84,676,138
Costo anualizado de la inversión <sup>b</sup>	3,548,062	5,917,844	9,866,755	5,389,051	8,988,445	14,986,336
Costos anuales por menor venta de miel/azúcar	13,469,624	63,027,270	178,661,778	27,484,028	133,866,278	382,091,526
<b>Flujos de efectivo positivos por venta de etanol<sup>c</sup></b>						
A precio propuesto por PEMEX	24,135,562	56,377,044	131,607,169	49,549,828	115,740,951	270,186,903
A un 80% del precio de la gasolina Magna	31,336,833	73,198,131	170,874,494	64,333,896	150,274,309	350,801,941
<b>Flujo neto de efectivo anual<sup>d</sup></b>						
A precio propuesto por PEMEX	10,665,938	-6,650,226	-47,054,609	22,065,800	-18,125,327	-111,904,623
A un 80% del precio de la gasolina Magna	17,867,209	10,170,861	-7,787,284	36,849,867	16,408,032	-31,289,585
Indicadores de rentabilidad <sup>e</sup>	Resultados de la evaluación económica					
	Ingenio A			Ingenio B		
	Mieles C	C+B - 15%Az	C+B - 50%Az	Mieles C	C+B - 15%Az	C+B - 50%Az
<b>A precio propuesto por PEMEX</b>						
Tiempo de retorno (años)	1.9	NR	NR	1.4	NR	NR
B/C	3.0	NR	NR	4.1	NR	NR
TIR	52%	NR	NR	72%	NR	NR
<b>A un 80% del precio de la gasolina Magna</b>						
Tiempo de retorno (años)	1.1	3.3	NR	0.8	3.1	NR
B/C	5.0	1.7	NR	6.8	1.8	NR
TIR	89%	28%	NR	121%	30%	NR

a. Todas las cantidades están en pesos mexicanos del año 2013.

b. Costo anualizado de la inversión, a 10 años y con una tasa de descuento del 12%.

c. Ingresos anuales obtenidos por la venta de bioetanol, al precio propuesto por PEMEX en la licitación del 2012 y a un 80% del precio de la gasolina PEMEX Magna.

d. El flujo de efectivo neto anual es el resultado de restar los flujos positivos menos el costo anual de la menor venta de mieles y azúcar.

e. Indicadores (Tiempo de retorno, B/C y TIR) calculados según las recomendaciones de Remer y Nieto [Remer y Nieto, 1995]. NR: No Rentable.

Los escenarios de producción de etanol a partir de mieles finales presentan indicadores muy atractivos, esto nos lleva a preguntarnos por qué no se produce actualmente biocombustible bajo este esquema en los ingenios azucareros. En el año 2006 se realizó un estudio de factibilidad de la utilización de biocombustibles en el sector transporte en México, elaborado por un grupo internacional de expertos en conjunto con la SENER [SENER-GTZ, 2006].

A partir de los resultados y recomendaciones del estudio mencionado, en febrero de 2008 se publicó la “Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos” (LPDB), en la que se instruyó a la creación de una “Comisión intersecretarial de bioenergéticos”, la cual tiene la función de participar “...en la elaboración de programas de corto, mediano y largo plazos, relacionados con la producción y comercialización de insumos, y con la producción, el almacenamiento, el transporte, la distribución, la comercialización y el uso eficiente de Bioenergéticos” [Cámara de diputados, 2008]. Dicha Comisión ha impulsado dos licitaciones para la compra de bioetanol a base de caña por parte de PEMEX, una en el 2009 y otra en el 2012: la primera no se concretó debido a que los licitantes adjudicados no firmaron el contrato correspondiente al considerar que el aumento de los precios de la caña que sucedieron en ese año no harían rentables las inversiones en el sector, y la segunda fue declarada desierta por parte de PEMEX porque los precios ofrecidos por los participantes rebasaron el tope que la paraestatal tenía contemplado [Cámara de Senadores, 2014]. Como vimos en los resultados del análisis económico (Tabla 26), la opción de vender bioetanol al precio ofrecido por PEMEX en la licitación del 2012 no resulta atractiva para la mayoría de los escenarios, pero sí para el esquema de producción a partir de mieles tipo C; sin embargo, en los términos de dicha licitación PEMEX pidió un compromiso de abasto de mínimo 50 millones de litros por año (mdl/año) en el primer año [Cámara de Senadores, 2014]. Según las estimaciones del presente trabajo, un ingenio mexicano pequeño (tipo A) podría producir alrededor de 3.2 Mdl/año a partir de mieles tipo C, mientras que un ingenio grande tendría la capacidad de 6.5 Mdl/año. Por lo tanto, no ha sido posible para un solo ingenio el sacar adelante un proyecto de bioetanol debido a: 1) el único comprador que se muestra interesado es PEMEX, no hay más opciones claras para la venta del bioetanol en México; 2) el precio que ofrece PEMEX es poco atractivo para desarrollar inversiones en plantas destiladoras de bioetanol; y 3) en la única opción

rentable, a partir de melazas finales, un solo ingenio no alcanzaría a satisfacer la demanda mínima que ha solicitado PEMEX en sus licitaciones.

A pesar del panorama descrito anteriormente, que puede parecer desalentador, la comercialización del bioetanol no está limitada a realizarse exclusivamente con PEMEX (ni la LPDB, ni su Reglamento prohíben venderlo a otros clientes). Como resultado de las licitaciones de compra de etanol anhidro lanzadas por PEMEX, un total de 20 empresas obtuvieron de la SENER permisos de producción y comercialización de bioetanol, los cuales les fueron otorgados por un periodo de 30 años (Tabla 27). Podrían proponerse entonces otras opciones de comercialización, por ejemplo el buscar desarrollar programas locales de producción de bioetanol en los Estados productores de azúcar, aprovechando los permisos que actualmente cuentan algunas empresas, y con el apoyo del Gobierno del Estado para la mezcla del mismo en las gasolinas consumidas dentro de la Entidad. Esta idea debería estudiarse a detalle, pero con base en las experiencias anteriores fracasadas impulsadas por la Comisión Intersecretarial es claro que deben de buscarse más opciones además de la venta del bioetanol a PEMEX.

**Tabla 27**

Permisos otorgados por la SENER para la producción/comercialización de etanol anhidro.

<b>Empresa</b>	<b>Objeto</b>	<b>Otorgamiento</b>
Alcoholera de Zapopan, S.A. de C.V.	Etanol Anhidro	12/03/2012
Blue Fuel, S.A.P.I. de C.V.	Etanol Anhidro	25/02/2010
Bioner, S.A. de C.V.	Etanol Anhidro y Biodiesel	14/09/2010
Destilmex, S.A. de C.V.	Etanol Anhidro	15/12/2009
Avance Regional Agroindustrial, S.A. de C.V.	Etanol Anhidro	15/12/2009
CIA. Azucarera la Fe, S.A. de C.V.	Etanol Anhidro	15/12/2009
Bioenergía Agroindustrial, S.A.P.I. de C.V.	Etanol Anhidro	15/12/2009
Bioenergeticos Mexicanos, S.A.P.I. de C.V.	Etanol Anhidro	15/12/2009
Asfaltos Emulsionados de Alto Rendimiento, S.A. de C.V.	Etanol Anhidro	15/12/2009
Destill's International, S.A. de C.V.	Etanol Anhidro	15/12/2009
Destiladora del Papaloapan, S.A. de C.V.	Etanol Anhidro	15/12/2009
Destiladora del Valle, S.A. de C.V.	Etanol Anhidro	15/12/2009
Biotecnología en Combustibles, S.A. de C.V.	Etanol Anhidro	15/12/2009
Destiladora de Alcoholes y Mieles, S.A. de C.V.	Etanol Anhidro	15/12/2009
Global Marketing Corporation S.A. de C.V.	Etanol Anhidro	28/05/2012
Combustibles y Energéticos Renovables PM S.A. de C.V.	Etanol Anhidro y Biodiesel	29/06/2012
Fabricación de alimentos Tenerife, S.A. de C.V.	Etanol Anhidro	19/12/2012
Blue Fuel, S.A.P.I. de C.V.	Etanol Anhidro	22/08/2011
Destilados La Ideal, S.A. de C.V.	Etanol Anhidro y Biodiesel	13/09/2011

Fuente: Portal de transparencia del Gobierno Federal [SENER, 2014b].

## Conclusiones

Históricamente la industria azucarera mexicana ha enfrentado diversos obstáculos para su desarrollo, prácticamente desde los inicios de esta actividad en tiempos de la colonia cuando se le relegó a un segundo plano ya que el principal negocio era la exportación de minerales preciosos. Durante el siglo XX la industria azucarera a nivel mundial se desarrolló tecnológicamente, pero México no logró mantenerse al ritmo de los otros países debido a varios sucesos de índole político y social que llevaron a la quiebra y el posterior rescate de los ingenios azucareros en varias ocasiones (Capítulo I). Hoy en día se vive un fuerte atraso tecnológico en un entorno de competencia en el mercado internacional, los ingenios azucareros mexicanos son muy ineficientes si tomamos como referencia a los países más representativos del sector (Capítulo III). La gran mayoría de los ingenios azucareros Mexicanos operan con tecnología similar a la que se empleaba en Brasil en la década de los ochentas (Capítulo IV), situación que los lleva a competir en un mercado abierto en gran desventaja con respecto a las mejores prácticas internacionales.

Además de modernizarse, el sector azucarero en el mundo se ha diversificado. Actualmente en Brasil el 15.7% de la energía total consumida en el país proviene de la caña de azúcar, se mezcla bioetanol de caña en todas sus gasolinas en una proporción del 18% al 25% y se produce energía eléctrica en los ingenios que satisface alrededor del 3% de la demanda nacional [Unica, 2014]. Con base en los resultados del presente trabajo se estima que el potencial técnicamente viable de producción de bioetanol en México, sin comprometer el abasto nacional de azúcar de caña, es de 956 millones de litros anuales, equivalente a un 2.5% del consumo nacional de gasolinas, y el potencial de generación eléctrica es de 8,716 GWh/año, similar al 3.1% de la generación neta total de energía eléctrica en México (Tablas 14 y 16, Capítulo IV). Para determinar el potencial económicamente viable se tendría que realizar una investigación de mercado con base en el modelo de evaluación económica presentado en el Capítulo IV, en el que encontramos esquemas para la producción de bioetanol atractivos, con periodos simples de retorno de la inversión de entre uno y tres años (Tabla 26), y para la generación de electricidad de alrededor de cuatro años (Tabla 21).

El Gobierno mexicano ha realizado algunos esfuerzos de carácter regulatorio para impulsar al sector. En el año 2005 se publicó la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (LDSCA), y también se han promovido otras disposiciones que podrían alentar a la modernización y diversificación de la industria azucarera nacional, aunque no van dirigidas particularmente a ésta, como la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (LPDB) y el Programa de Introducción de Bioenergéticos (derivado de la LPDB). Con base en la importancia económica y social del sector azucarero nacional y en las grandes oportunidades de mejora y de desarrollo de alternativas energéticas descritas en el presente trabajo se justifica que se dirija la mirada hacia este sector y se elabore e implemente un plan de desarrollo integral de la industria azucarera nacional, con metas y objetivos claros y que tome en cuenta a todos los actores relevantes.

## Referencias

- [Alonso-Pippo et al., 2008]  
Alonso-Pippo, Walfrido, et al. *Sugarcane energy use: The Cuban case*. Energy Policy 36 (2008) 2163 – 2181.
- [Arias, 1990]  
Arias, Patricia (1990). *Industria y Estado en la vida de México*. El Colegio de Michoacán (1990).
- [ATAM, 2013]  
*Sitio web de la Asociación de Técnicos Azucareros de México*.  
<http://www.atamexico.com.mx/>. 30 de septiembre de 2013, 13:45 hr.
- [Banco de México, 1952]  
Banco de México (1952). *La Industria Azucarera de México, Tomo I*. México, Talleres Gráficos de la Nación.
- [BNDES, 2008]  
Banco para el Desarrollo de Brasil (BNDES), Centro de Gestión de Estudios Estratégicos (CGEE) (2008). *Bioetanol de caña de azúcar: energía para el desarrollo sostenible*. 1ª Ed., Brasil.
- [Bombino y Roca, 2003]  
Bombino, Eugenio; Roca, Guillermo. *Perspectivas del secado de bagazo*. Tecnología Química, vol. XXIII, No. 2, 2003.
- [Cámara de Diputados, 2003]  
Cámara de Diputados, Centro de Estudios de las Finanzas Públicas (2003). *Encadenamiento de Series Históricas del Producto Interno Bruto de México 1970-2001*.
- [Cámara de Diputados, 2008]  
Cámara de Diputados. 2008. *Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos*. Diario Oficial de la Federación, 1º de Febrero de 2008.
- [Cámara de Diputados, 2013]  
Cámara de Diputados (2013). *Proyecto de decreto que reforma, adiciona y deroga diversas disposiciones de la Ley del Impuesto al Valor Agregado, de la Ley del Impuesto Especial sobre Producción y servicios, de la Ley Federal de Derechos y se expide la Ley del Impuesto sobre la Renta, para los efectos de la fracción e) del artículo 72 constitucional*. Gaceta parlamentaria, 3897-IX, 31 de Octubre de 2013.
- [Cámara de Diputados, 2013b]  
Cámara de Diputados, 2013. *Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética*. Diario Oficial de la Federación, 7 de Junio de 2013.
- [Cámara de Senadores, 2014]  
Cámara de Senadores, 2014. *Respuesta al oficio número DGPL61-11-7-1229*. Gaceta Parlamentaria, año XVII, número 3988-I, martes 25 de marzo de 2014.
- [CFE, 2014]  
Comisión Federal de Electricidad. 2014. *Precio promedio del CTCP reportado por CFE para el mes de Diciembre de 2013, para el Nodo Veracruz*. Consulta en línea  
<http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/OTROS/costostotales/ConsultaArchivoBalance.aspx>
- [CFE, 2014b]

- Comisión Federal de Electricidad. 2014. *Tarifas para el suministro y venta de energía eléctrica (2013 - 2014)*. Consulta en línea [http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas\\_negocio.asp](http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp)
- [Chen, 1991]  
Chen, James (1991). *Cane sugar handbook: a manual for cane sugar manufacturers and their chemists*. 11<sup>a</sup> Ed.
- [CONADESUCA, 2013]  
*Sitio web del Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar*. <http://www.cndsca.gob.mx/>. 29 de septiembre de 2013, 23:00 hr.
- [CONUEE, 2009]  
Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. 2009. *Estudio sobre Cogeneración en el Sector Industrial en México*.
- [COPAR, 2011]  
Comisión Federal de Electricidad (CFE). *Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión en el sector eléctrico 2011*.
- [CRE, 2010]  
Comisión Reguladora de Energía, 2010. *Modelo de Contrato de Interconexión para Centrales de Generación Eléctrica con Energía Renovable o Cogeneración Eficiente*. Diario Oficial de la Federación, 28 de Abril de 2010.
- [CRE, 2010]  
Comisión Reguladora de Energía. *Contrato de Interconexión para Fuentes de Energía Renovable o Cogeneración Eficiente*. 28 de abril de 2010, Diario Oficial de la Federación.
- [CRE, 2010b]  
Comisión Reguladora de Energía. 2010. *Metodología para la determinación de los cargos correspondientes a los servicios de transmisión que preste el suministrador a los permisionarios con centrales de generación de energía eléctrica con fuente de energía renovable o cogeneración eficiente*. Diario Oficial de la Federación, 13 de Agosto de 2010.
- [CRE, 2012]  
Comisión Reguladora de Energía, 2012. *Resolución por la que la Comisión Reguladora de Energía expide las Reglas Generales de Interconexión al Sistema Eléctrico Nacional para generadores o permisionarios con fuentes de energías renovables o cogeneración eficiente*. Diario Oficial de la Federación, 22 de Mayo de 2012.
- [CRE, 2014]  
Comisión Reguladora de Energía. 2014. *Tabla de permisos de generación e importación de energía eléctrica al 31 de Marzo de 2014*. Consulta en línea <http://www.cre.gob.mx/articulo.aspx?id=373>
- [Dantas, 2013]  
Dantas, Guilherme. *Energy from sugarcane bagasse in Brazil: an assessment of the productivity and cost of different technological routes*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 21 (2013) 356–364.
- [IBGE, 2012]  
Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE). *Encuesta industrial anual por producto, 2012*.
- [INEGI, 2010]  
Instituto Nacional de Estadística y Geografía. *Estadísticas históricas de México 2009*. México, 2010.
- [INEGI, 2013]

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI (2013) *Sistema de Cuentas Nacionales de México*. Base de datos en línea.
- [Ingenios Morelenses, 2013]  
Información obtenida durante visitas a las plantas de los ingenios azucareros del Estado de Morelos, en diciembre de 2013.
- [Landázuri y Vázquez, 1988]  
Landázuri, G. y Vázquez, V. (1988). *Azúcar y estado (1750 – 1880)*. 1ª ed. México, Fondo de Cultura Económica.
- [Macedo, 2000]  
Macedo, I. C. *Commercial Perspectives of Bioalcohol in Brazil*. 1st. World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, España. 2000.
- [Manual Azucarero, 2013]  
Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcoholera (2013). *Manual Azucarero Mexicano 2013 (56ª Edición)*. México, Cía. Editora del Manual Azucarero, S.A. de C.V.
- [Márquez, 1995]  
Márquez, Luis. *El programa de sustitución energética en Brasil*. Agricultura: revista agropecuaria, No. 753, 1995, págs. 300 – 304.
- [Ministerio de Finanzas de Mauricio, 2013]  
Ministerio de Finanzas y Desarrollo Económico de Mauricio. *Resumen de estadísticas agrícolas 2012, Resumen de estadísticas de agua y energía 2012*.
- [Ministerio de Minas y Energía de Brasil, 2012]  
Ministerio de Minas y Energía de Brasil. *Balance Nacional de Energía 2012, Matrices históricas de energía (1970 – 2012)*.
- [NIST, 2006]  
National Institute of Standards and Technology. *Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties 7.0*. Boulder, Colorado, 2006.
- [OLADE, 2011]  
Organización Latinoamericana de la Energía (OLADE). *Observatorio de energía renovable en Latinoamérica y el Caribe, Mecanismos financieros*. Agosto de 2011.
- [PEMEX, 2012]  
Nava J. 2012. *Licitación pública nacional número P2 LN 029 001, para la adquisición de etanol anhidro para el mezclado con gasolinas en las Terminales de Almacenamiento y Reparto de PEMEX Refinación, Testimonio Social*.
- [PEMEX, 2013]  
Petróleos Mexicanos. 2013. *Precio al público de los productos petrolíferos*.
- [Pérez, 2010]  
Pérez, Ana (2010). *TLCAN/Capítulo 11: la fábrica de juicios*. Revista Fortuna, 91.
- [Remer y Nieto, 1995]  
Remer D, Nieto A. 1995. *A compendium and comparison of 25 project evaluation techniques*. International Journal of Production Economics 42 (1995) 79 – 96, 101 – 129.
- [Reyes, 2004]  
Reyes, Pedro. *Manual de secador rotatorio*. Universidad Iberoamericana, 2004.
- [SAGARPA, 2013]  
Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2013). *Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera*. Datos estadísticos en línea.

- [SASTA, 2009]  
Asociación de Técnicos Azucareros de Sudáfrica. *Manual de Laboratorio*. 2009, 5a Ed.
- [Secretaría de Economía, 2012]  
Secretaría de Economía, Dirección General de Industrias Básicas (2012). *Análisis de la situación económica, tecnológica y de política comercial del sector edulcorantes en México*. Anexo A3, p. 83.
- [Secretaría de Economía, 2014]  
Secretaría de Economía. 2014. *Tipos de cambio a la venta promedio anuales*. <http://portalweb.sgm.gob.mx/economia/es/tipos-de-cambio/449-tablas-peso-mexicano-us-dolar.html#anual>
- [SEMARNAT, 1996]  
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Pesca. *NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*. México, 1996.
- [SENER, 2012]  
Secretaría de Energía (2012). *Balance Nacional de Energía 2011*.
- [SENER, 2014]  
Secretaría de Energía. *Sistema de Información Energética (SIE)*. [www.sie.energia.gob.mx](http://www.sie.energia.gob.mx), consultado el 28 de enero de 2014.
- [SENER, 2014b]  
Secretaría de Energía. 2014. *Portal de Transparencia del Gobierno Federal*. Consulta en línea de los permisos/concesiones otorgados, información actualizada al 09 de abril de 2014. <http://portaltransparencia.gob.mx/>
- [SENER-GTZ, 2006]  
SENER-GTZ. *Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México*. México, 2006.
- [Siddharta y Rajkumar, 2001]  
Siddharta, M, Rajkumar, N. *Mapping of combined heat and power systems in cane sugar industry*. Applied Thermal Engineering 21 (2001) 1707 – 1719.
- [SRH, 1975]  
Secretaría de Recursos Hídricos, Diseños hidráulicos y tecnología ambiental (1975). *Uso del agua en la industria azucarera*. México, DF.
- [SS, 1995]  
Secretaría de Salud. *NOM-138-SSA1-1995, que establece las especificaciones sanitarias del alcohol desnaturalizado, antiséptico y germicida (utilizado como material de curación), así como para el alcohol etílico de 96°g.l., sin desnaturalizar y las especificaciones de los laboratorios o plantas envasadoras de alcohol*. México, 1995.
- [STIASRM, 2013]  
*Sitio web del Sindicato de Trabajadores de la Industria Azucarera y Similares de la República Mexicana*. <http://www.stiasrm.org.mx/>. 30 de septiembre de 2013.
- [Ulrich y Vasudevan, 2009]  
Ulrich G., Vasudevan P. 2009. *Capital costs quickly calculated*. Chemical Engineering Magazine, April 2009, 46 – 52.
- [UNC, 2013]  
Unión Nacional de Cañeros, A.C. *Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2003 – 2012*. Datos estadísticos disponibles en línea.
- [UNC, reseña histórica, 2013]

*Reseña histórica de la Unión Nacional de Cañeros*. Consultada en:  
[http://www.caneros.org.mx/resena\\_historica.html](http://www.caneros.org.mx/resena_historica.html), 30 de septiembre de 2013

[UNICA, 2013]

Unión de la Industria de la Caña de Azúcar (UNICA). *Análisis de la zafra 2012/13*.

[Unica, 2014]

Asociación de Industriales de la Caña de Azúcar de Brasil (UNICA). 2014. *La industria de la caña de azúcar en Brasil*.

[USDA, 2013]

Departamento de Agricultura de Estados Unidos (2013). *Anuario de azúcares y endulzantes*. Datos estadísticos.

[Yarnal y Puranik, 2010]

Yarnal, Geethanjali; Puranik, Vinod (2010): *Energy Management Study in Sugar Industries by Various Bagasse Drying Methods*. Strategic Planning for Energy and the Environment, 29:3, 56-78.