



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Determinación de la demanda
energética de la operación de secado
de semillas de maíz

TESINA

para obtener el título de

Especialista en Ahorro y Uso Eficiente de la
Energía

PRESENTA

Ing. Carlos Buendía Moreno

DIRECTOR DE TESINA

Dr. Rodolfo Herrera Toledo



Ciudad Universitaria, CDMX., 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Ad astra per aspera

Agradecimientos

La culminación de este trabajo profesional representa también la culminación de una etapa de mi vida de la cual me siento sumamente orgulloso, sin embargo, no fue una etapa por la cual pasé solo. Es por esto mismo, que a continuación me gustaría dedicar algunas palabras para agradecer a todos aquellos que estuvieron presentes.

Primeramente, me gustaría agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México, ya que, desde mi ingreso a la Escuela Nacional Preparatoria, hasta mis estudios de posgrado en el Programa Único de Especializaciones de Ingeniería, han contribuido a mi formación académica y humana a través de sus aulas y valores.

A Rodolfo Herrera, que me brindó su asesoría desde el primer día en que este proyecto inició hasta el último.

A todos mis compañeros de la especialidad en ahorro y uso eficiente de la energía, ya que no hubo día en el que no sintiera el apoyo de todos y cada uno de ustedes.

A mis compañeros y colegas de la Facultad de Ingeniería, Alejo, Gallardo, Carlitos Gil, Alexander, Santiago Fajer, Ruben, Karina y Joel, que, si bien ya nuestros caminos se han separado, su apoyo incondicional en los momentos difíciles ayudó a poder continuar cuando menos razones tenía para hacerlo.

Además, también debo agradecer a todos mis colegas y amigos del trabajo: Erika Caballero, Efra Reyes, Raúl Chao, Omar Serrato, Ricardo Dorronsoro, Pau Campos y al equipo de pre-acondicionamiento de la planta occidente que me abrieron las puertas y me proporcionaron el tiempo, los recursos y el apoyo moral para el desarrollo de este trabajo.

A Alexa y Andrés, por siempre sacarme una sonrisa cuando más lo necesitaba y enseñarme que nuestra amistad es incondicional-

A Neiguib, Valeria y Miguel, ya que, sin sus consejos, experiencia, conocimiento y cariño, el camino nunca habría dejado de ser sinuoso.

A mi familia, Rafael, Nora, Ofelia, Kiki, Jimena, Carmina, Elena y Antonio por apoyarme desde pequeño en la consecución de mis sueños y metas.

Finalmente, gracias infinitas a Ana y Alejandro, que, si bien el tiempo se nos agotó, sus enseñanzas perdurarán por siempre.

Contenido

Índice de gráficos	6
Introducción.....	7
Marco contextual	9
Antecedentes	9
Descripción del sistema	11
Objetivos.....	13
Objetivo general.....	13
Objetivos específicos.....	13
Planteamiento del problema y justificación	14
Marco conceptual.....	15
Consumo de energía en México.....	15
Pérdidas de maíz posteriores a la cosecha.....	18
La operación de secado como método de conservación de granos y semillas.....	20
Características generales	20
Clasificación de los sistemas de secado de granos.....	22
Secadora estática de aire natural a baja temperatura.....	23
Marco metodológico	25
Balance de masa.....	27
Balance de energía.....	29
Análisis y resultados.....	31
Análisis sobre las curvas de secado.....	31
Análisis sobre la demanda de energía térmica.....	35
Conclusiones.....	38
Anexos	41
Memoria de cálculo.....	41
Bibliografía.....	45

Índice de gráficos

Gráfico 1 Consumo total de GNC vs Producción mensual de maíz de la planta (Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por la empresa).....	13
Gráfico 2 Distribución del consumo en el sector energético (Elaboración propia a partir de datos del SIE, 2018).....	16
Gráfico 3 Distribución del consumo (Elaboración propia a partir de datos del SIE, 2018)	16
Gráfico 4 Consumo Nacional de Energía 2018- Petajules (Elaboración propia a partir de datos del SIE, 2018)	17
Gráfico 5 Consumo de energéticos en el sector agropecuario (Elaboración propia a partir de datos del SIE, 2018).....	18
Gráfico 6 Curva de secado de los granos de maíz - Marzo.....	32
Gráfico 7 Curva de secado de los granos de maíz - Abril.....	33
Gráfico 8 Curva de secado de los granos de maíz - Mayo.....	34
Gráfico 9 Tasa de secado	34
Gráfico 10 Demanda térmica durante la primera etapa.....	35
Gráfico 11 Demanda de energía térmica durante la segunda etapa	36
Gráfico 12 Demanda térmica durante la tercera etapa	36
Gráfico 13 Demanda térmica durante la cuarta etapa.....	37
Gráfico 14 Comparativa de la demanda térmica demandada real-teórica	38

Introducción

El maíz es un cultivo que pertenece a la familia de las gramíneas cuyo origen se cree que tuvo lugar en América Central, particularmente en México, donde se pudo difundir hasta Canadá y al sur de Argentina. El vestigio más antiguo de cultivo de maíz data de aproximadamente 7000 años y fue encontrado en Tehuacán, México. (FAO, 1993)

En la actualidad, la producción de maíz en México es muy diversa por la cantidad de especies que existen, sin embargo, los productos que más se producen dentro del territorio nacional son el maíz blanco y amarillo (SAGARPA, 2015). Además, dadas las condiciones agroclimáticas de México es posible tener dos temporadas de producción al año: primavera-verano y otoño-invierno. (Simá, 2009).

Como parte de la planeación nacional agrícola realizado por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2017), para el año 2030, la producción potencial del maíz blanco será de 22.86 MMT¹, mientras que la producción estimada de maíz amarillo será de 4.92 MMT.

En la producción de maíz, se pueden distinguir dos tipos de operaciones. Por un lado, están las operaciones agronómicas, mismas que aluden a toda la tecnología y conocimiento agrícola aplicados a la producción de semillas en campo, como por ejemplo: las estrategias de siembra, sistemas de riego, tipo de semilla a sembrar y fertilizantes. (SIAP, 2018).

Cuando el maíz alcanza una madurez fisiológica suficiente, la humedad de los granos oscila en el 37-38% y se recomienda la cosecha de este a partir de que este tiene un porcentaje de humedad de 20-25%. (Simá, 2009) Es en este punto, que comienzan las operaciones de poscosecha y se refieren al manejo adecuado para la conservación de la integridad física y calidad de los productos, así como la preservación de los productos por tiempos prolongados para evitar daños en su calidad nutritiva y valor comercial. (SADER, 2019)

De tal forma que, como parte de las operaciones poscosecha, el proceso de secado es de vital importancia en el manejo de productos alimenticios y de granos, ya que el contenido de humedad puede ser uno de los factores que promueva el desarrollo de

¹ MMT: Miles de Millones de toneladas

agentes de biodeterioro como bacterias, hongos y sus micotoxinas, insectos y ácaros.(C., 1994)

Por otro lado, en el *Handbook of industrial drying, tercera edición (2006)* se menciona que el proceso de secado, junto con el proceso de destilación, es uno de los procesos que mayor cantidad de energía demanda dentro de la industria. Esto debido a que la sustancia de trabajo es el aire, así como también a la cantidad de energía necesaria para evaporar el agua contenida en los productos a secar. A manera de ejemplificar lo anterior, en el capítulo uno, correspondiente a los *principios, clasificación y selección de secadoras*, Arun S. menciona que el consumo nacional de energía por concepto de operaciones de secado industrial en países como Estados Unidos, Canadá, Francia y Reino Unido oscila entre 10 y 15%, mientras que en países como Dinamarca y Alemania asciende a un rango de entre 20 y 25%.

Antonio de la Torre, en su *Estudio de la demanda energética del secado de maíz en Argentina (2010)* y por Zhong H. en su estudio *A simulation platform for accurate prediction of in-bin drying and storage of rough rice (2015)* utilizaron esta metodología para encontrar estrategias de secado para maíz y arroz, identificando los principales factores que intervenían en la operación de acuerdo a la localización de los equipos de secado.

El presente trabajo es un análisis termodinámico sobre la energía que es demandada por el proceso de secado por aire natural a baja temperatura de granos de maíz; durante la temporada de otoño-invierno 2020 en la localidad de Guadalajara, Jalisco. Para ello se utilizó un modelado por capa delgada. Este modelado propone dividir al lote de granos a secar por capas y así resolver las ecuaciones de balance de masa y energía. Las soluciones de las ecuaciones de la capa i representan las entradas para la capa $i+1$ y así sucesivamente hasta la capa n . Este tipo de modelado fue propuesto inicialmente por T.L Thompson en su publicación *Mathematical Simulation of Corn Drying (1968)*, utilizado por la Universidad de Purdue para la elaboración de la simulación numérica llamada PHAST-FDM². Este enfoque ha sido ampliamente utilizado en trabajos de simulación de operaciones de secado. Con los resultados obtenidos, se llevó a cabo una comparación con los datos de facturación de gas natural de la temporada otoño-invierno 2020, así como los datos de las toneladas de maíz que fueron procesadas en las estaciones de secado con el fin de comparar qué tan preciso es el modelo.

² PHAST: Post-Harvest Aeration Simulation Tool, desarrollado por la Universidad de Purdue

Marco contextual

Antecedentes

Para el desarrollo del presente trabajo, fue necesario llevar a cabo una revisión bibliográfica sistemática de publicaciones con información sobre la operación de secado de maíz y otros granos. Para ello se utilizó la Biblioteca digital de la UNAM, TESIUNAM y Google Scholar, donde fue posible encontrar literatura que coincidiera con las palabras clave: "Secado natural", "Secado de maíz", "Secado de granos", "Energía", "secado de baja temperatura", "Ahorro de energía". La búsqueda también se llevó a cabo en inglés, utilizando las fuentes previamente mencionadas.

- Thompson, T.L. et al. (1968): En la publicación *Mathematical Simulation of Corn Drying*, ellos proponen un modelo cuya principal característica es la de dividir a la operación de secado en múltiples sub operaciones o capas. Calculando los cambios que tienen en cada una de estas capas en pequeños intervalos de tiempo.
- Meiering A.G (1978): Mediante el uso de modelos de balance de masa y energía, simuló la operación de secadoras de flujo continuo y por lote para predecir el desempeño y el consumo neto de energía de los equipos de secado populares de Ontario. Su investigación mostró que los secadores por lotes de columna estrecha, que operan a flujo concurrente, conservan la calidad del grano al mantener un bajo sobrecalentamiento del grano. Además de que, mediante la recirculación del aire de enfriamiento de los granos, así como una parte del aire de secado, se ve una disminución en el consumo energético de estos.
- Islam M.T (2005): La operación fue simulada mediante un modelo propuesto por la MSU. Este estudio fue utilizado para evaluar el efecto de los parámetros de operación en la capacidad de secado y en el costo energético de la misma. Donde se encontró que la temperatura de bulbo húmedo fue aquella que mayor impacto tuvo. Los modelos que utilizó fueron propuestos inicialmente en el trabajo de Bakker-Arkema (1974).
- Antonio & Torre, (2010): Se llevó a cabo el análisis de sistemas de secado de alta temperatura y aire natural-baja temperatura en diferentes regiones de la Argentina con el fin de encontrar cuál era la demanda energética de estos sistemas y cuáles eran las mejores estrategias de secado de acuerdo a la región.

El análisis para los sistemas de alta temperatura se llevó a cabo con modelos termodinámicos analíticos, mientras que el sistema de aire natural-baja temperatura utilizó un modelo propuesto por la Universidad de Purdue que se basa en el modelo de 1968 de Thompson. Encontró que el sistema que mejor desempeño tuvo en las simulaciones fue el de alta temperatura, ya que con un contenido de humedad inicial de 17%, este consumió 64% menos energía que los sistemas de aire natural-baja temperatura. Sin embargo, encontró que en dos localidades el sistema de aire natural-baja temperatura fue más eficiente en un 8% con el mismo contenido de humedad inicial.

- Zhong H. (2015): Publicó un estudio cuyo objetivo era el de investigar la efectividad de usar modelos analíticos para simular el secado de arroz con aire natural a baja temperatura y proporcionar estrategias de secado que procuraran la calidad de los granos. Para el caso de la humedad de equilibrio, encontró que los modelos propuestos por Halsey y Chung-Pfost fueron los que mejor se adecuaban al comportamiento del secado. Esto fue validado a través de experimentos a condiciones de operación establecidas en su estudio.
- Lawrence J et al. (2015): Al igual que Zhong H., publicó un artículo donde utiliza el PHAST-FDM que se basa en el modelo de Thompson, T.L. (1968). En él, simuló el proceso de secado de arroz con diferentes estrategias de secado, donde el contenido inicial de humedad, el flujo volumétrico del aire de secado, el tipo de grano a secar y el diámetro del silo secador variaban. Encontró que el caudal del aire de secado de 1.1 m³/min era el valor óptimo en cuanto a los costos de secado respecto a las pérdidas de materia seca³. Del mismo modo, encontró que la fecha de cosecha tiene un impacto en el desempeño del proceso de secado, ya que la humedad inicial de las semillas varía.
- Vician. P (2016): Evaluaron los efectos de la temperatura exterior en el desempeño de una secadora de granos. Se encontró que, al existir una variación de 1°C en la temperatura externa, se puede aumentar en 3 min el tiempo de secado, además, dadas las condiciones de operación del sitio en el que desempeñaron sus estudios, la diferencia de consumo de calor a una temperatura que varía entre 1 y 15 °C, representa un ahorro de energía máximo de 4.87 GJ. Los modelos propuestos, utilizan valores promedio y no llevan a cabo un análisis por capas.

³ Contracción del grano y con ello la pérdida de nutrientes, poder germinativo o vigor.

Descripción del sistema

La empresa donde se realizó el estudio, se sitúa a las afueras del municipio de Zapopan, Guadalajara y esta cuenta con un equipo de secado de aire natural a baja temperatura de 16 celdas. La capacidad de cada celda es de 80 toneladas y en promedio se llenan a un 85% de su capacidad. Las dimensiones de las celdas de secado y su diseño, se pueden observar en la Fig.1.

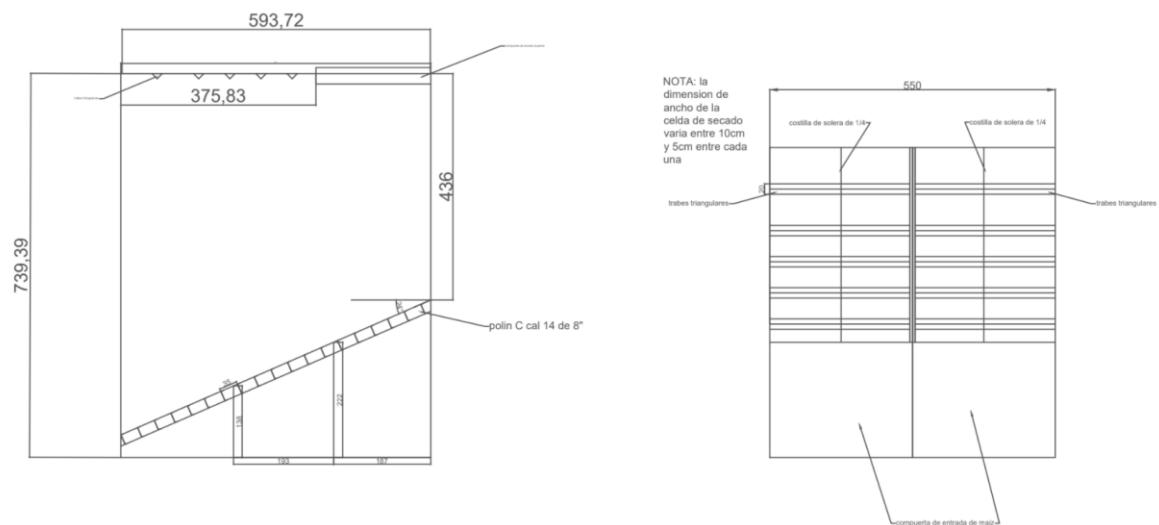


Fig. 1 Vista frontal y superior de la celda de secado (Fuente: Proporcionada por la empresa)

La operación de secado inicia con la entrada de aire a condiciones ambientales (25-27 °C) hacia una cámara de calentamiento en la que se encuentra un quemador de gas natural que opera a 10 [PSI] y tiene una capacidad de 8,000,000 [BTU/h]. Posteriormente, el aire es trasladado hasta las celdas de secado a través de un túnel o plénum que se encuentra en la parte inferior. Este tiene unas dimensiones de 3.22x4.70x44 [m].

En este punto, el aire es impulsado por dos ventiladores cuyas especificaciones son las siguientes:

Tabla 1 Datos nominales del aireador

Dato	Valor
Potencia nominal	250 [HP] (186.5 [kW])
Voltaje	440 V/60 [Hz]
Corriente	278 [A]
Eficiencia	96.2%
RPM motor	1785
RPM aireador	811

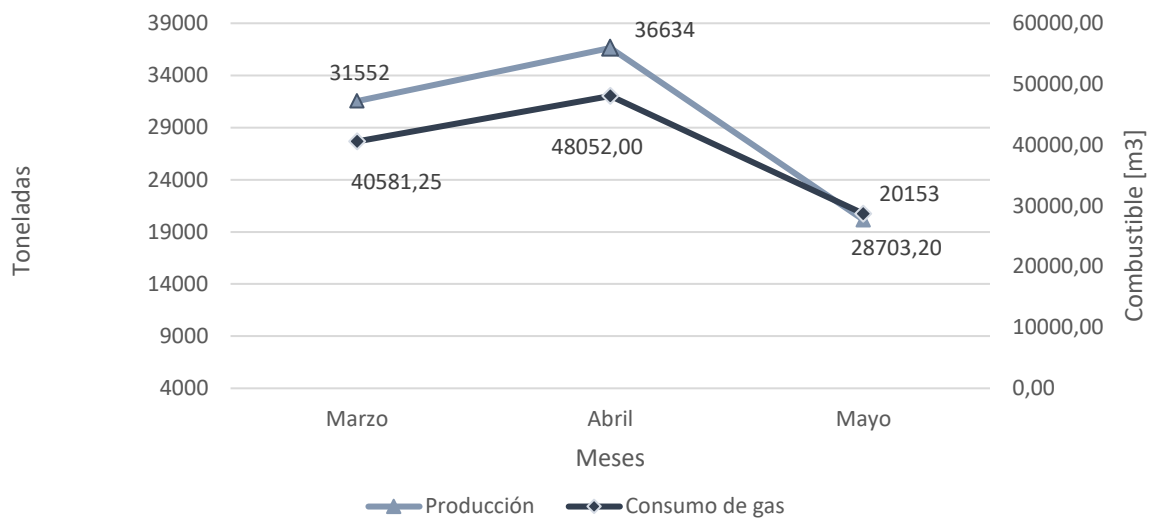
El flujo de aire entra a la celda con una temperatura de 35 [°C] y a una presión de 4.5 [inH₂O] (1.1 [kPa]). Este tiende a ascender a través del piso perforado de la celda de secado, pasando a través de las mazorcas de maíz hasta la parte superior de la celda donde se encuentra una escotilla de salida. Cuando se han retirado aproximadamente el 50% de los puntos de humedad a remover, se invierte el flujo de aire, de tal forma que el flujo cambia a ser descendente y entra a una temperatura aproximada 40 °C, a una presión de 9 [inH₂O] (2.2 [kPa]), con el fin de evitar zonas de granos excesivamente secas y sobrecalentadas.

El tiempo de secado varía según las características del maíz que se recibe y las condiciones climatológicas. Sin embargo, se tiene un tiempo de secado promedio, a carga máxima, de 72 horas. El contenido de humedad inicial de las mazorcas de maíz oscila entre el 28-33% y el contenido de humedad final de estas varía entre un 11-12.5%.

Adicionalmente, es importante mencionar que la operación de secado, correspondiente a la producción del ciclo otoño-invierno comenzó el 03 de marzo del 2020 y concluyó el 21 de mayo del 2020. Durante ese periodo, se procesó un total de 88,339 toneladas de maíz y se consumió un total de 117,336.45 m³ de GNC⁴.

⁴ Gas Natural Comprimido

Gráfico 1 Consumo total de GNC vs Producción mensual de maíz de la planta (Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por la empresa)



Objetivos

Objetivo general

Evaluar la operación de secado de maíz mediante la aplicación de modelos termodinámicos y de transferencia de masa, que incluyan las propiedades principales consideradas en los estudios e investigaciones desarrollados, a partir de los cuales sea posible determinar la demanda de energía térmica teórica del proceso, así como llevar a cabo una comparación entre los valores teóricos y aquellos registrados en las bitácoras de producción respecto al tiempo y tasa de secado.

Objetivos específicos

- Estimar el tiempo de secado teórico de la operación de secado de maíz con base en la construcción de las curvas de secado.
- Estimar la cantidad de energía promedio mensual que es demandada por el proceso mediante el modelo termodinámico propuesto por Jindal y Siebenmorgen (1994).
- Estimar la de secado de la operación (Horas/punto de humedad).
- Comparar la energía aportada por el combustible respecto a la demandada por el proceso con los datos de facturación mensual de gas.

Planteamiento del problema y justificación

Se propone llevar a cabo una evaluación teórica de la energía térmica demandada por la operación de secado de maíz, dadas las condiciones promedio registradas en las bitácoras de producción de una planta evaluada, así como tomar en cuenta condiciones climatológicas del mismo, ya que es la operación más costosa, en términos energéticos y económicos, que lleva a cabo el sitio en cuestión.

Marco conceptual

Consumo de energía en México

De acuerdo con el Balance Nacional de Energía, publicado por la Secretaría de Energía (SENER) en 2018, el consumo nacional de energía⁵, ascendió a los 9,236.86 PJ, lo que representó una disminución de 0.14% respecto al año 2017.

A partir del consumo nacional de energía, se puede llevar a cabo una primera subdivisión:

- **Consumo del sector energético:** Flujo de energía que es utilizado en la operación de los centros de transformación⁶, consumo propio del sector⁷, así como pérdidas por transporte, distribución y almacenamiento.
- **Consumo final de energía:** Flujo de energía que se destina al mercado interno o a las actividades productivas de la economía nacional.

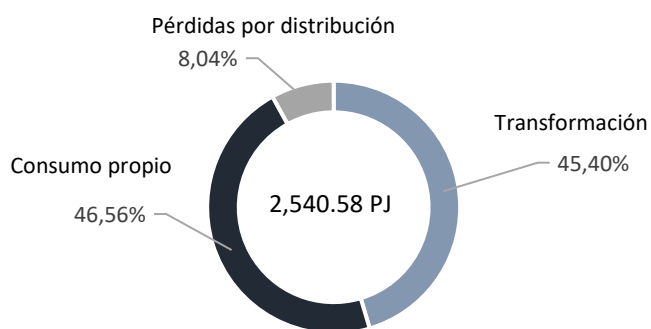
En cuanto al consumo del sector energético, se registró una cantidad consumida de 2,540.58 PJ, misma que representa un 27.5% del consumo total. De esta cantidad, 45.4% se destinó a los centros de transformación, 46.56% correspondió al consumo propio del sector, mientras que el 8.04% restante fue por concepto de pérdidas de transmisión, transporte y distribución de la energía (SENER, 2018).

⁵ Flujo de energía que se suministra a las diversas actividades y/o procesos para su utilización en el sector energético y en el consumo final total.

⁶ Centros que procesan energía primaria para obtener productos secundarios (Coquizadoras, Refinerías, Plantas de gas y centrales eléctricas).

⁷ Energía absorbida por los equipos que dan soporte y seguridad a los procesos de transformación

Gráfico 2 Distribución del consumo en el sector energético (Elaboración propia a partir de datos del SIE, 2018)



Por otro lado, el consumo final de energía registró una cantidad de 5,393.45 PJ, es decir, el 58.4% del consumo total de energía (SENER, 2018).

Dentro de esta categoría, también es posible subdividir los consumos de energía como sigue:

- **Consumo no energético:** Consumo de productos derivados del petróleo que son utilizados como insumos para la producción de bienes.
- **Consumo energético:** Energía que se utiliza en los procesos y actividades económicos, además de las necesidades energéticas de la sociedad.

De lo anterior, el consumo no energético representó únicamente el 2% del consumo total (109.74 PJ), mientras que el consumo energético el 98% (5,283.70 PJ) (SENER, 2018).

Gráfico 3 Distribución del consumo (Elaboración propia a partir de datos del SIE, 2018)

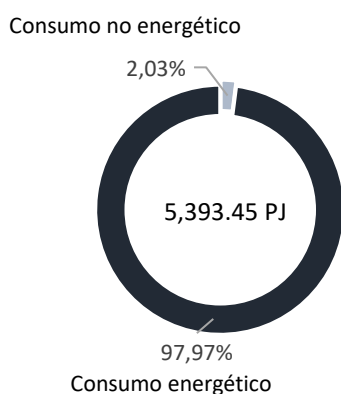
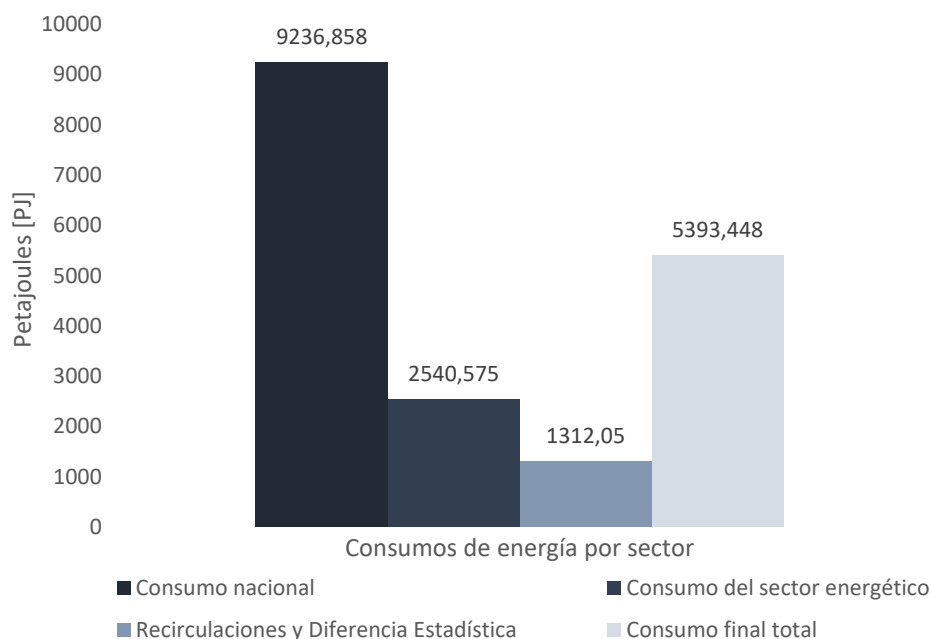


Gráfico 4 Consumo Nacional de Energía 2018- Petajoules (Elaboración propia a partir de datos del SIE, 2018)



Dentro del consumo final, el consumo energético contempla cuatro sectores principalmente: Sector transporte, industria, residencial, comercial y público y el sector agropecuario.

Como se muestra en la Tabla 2, el sector del transporte registró un consumo de energía de 2,454.70 PJ (45.5%), el sector industrial registró la cantidad de 1,680.77 PJ (31.2%), el sector residencial, comercial y público 958.97 PJ (17.8%) y, finalmente, el sector agropecuario registró 189.27 PJ (3.5%)(SENER, 2018).

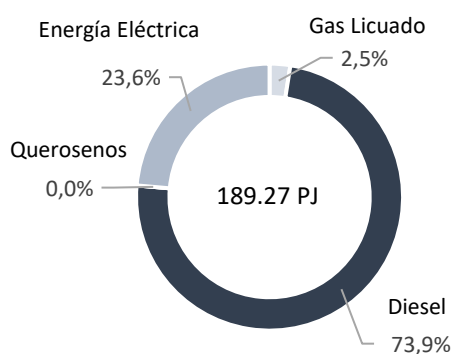
Tabla. 2 Consumo final total de Energía-Petajoules (Elaboración propia con datos del SIE, 2018)

Concepto	2017	2018	Variación [%]	Distribución [%]
Consumo final total	5,498.89	5,393.45	-0.02	100%
Consumo no energético total	136.07	109.74	-24%	2%
Petroquímica de PEMEX	70.53	56.53	-25%	1.0%
Otros sectores	65.54	53.22	-23%	1.0%
Consumo energético total	5,362.82	5,283.71	-1%	98%
Residencial, Comercial y Público	944.09	958.97	2%	17.8%
Transporte	2,360.16	2,454.70	4%	45.5%
Industrial	1,876.65	1,680.77	-12%	31.2%
Agropecuario	181.91	189.27	4%	3.5%

De lo anterior, se destaca el aumento de 4.04% del consumo energético que tuvo el sector agropecuario, pasando de 181.91 PJ a 189.27 PJ. Este apartado, contempla a toda aquella energía consumida en el desempeño de las actividades relacionadas directamente con la agricultura y la ganadería.

Para el balance, las principales fuentes de energía consideradas fueron Gas licuado 4.76 PJ (2.5%), el Diésel 139.95 PJ (73.9%), los querosenos (0%) y energía eléctrica 44.56 PJ (23.6%)(SENER, 2018).

Gráfico 5 Consumo de energéticos en el sector agropecuario (Elaboración propia a partir de datos del SIE, 2018)



Pérdidas de maíz posteriores a la cosecha

Un mal manejo del maíz durante las operaciones poscosecha puede tener ocasionar pérdidas en la producción. (Caro,1998) menciona que existen cuatro tipo de pérdidas en los granos: Aquellas que tienen que ver con la *pérdida de la cantidad*⁸ de los granos, *pérdidas de calidad*⁹, *pérdidas del valor comercial*¹⁰ y *pérdidas de valor nutritivo*¹¹.

⁸ Se define como la reducción en peso y/o en volumen en los granos (Caro, 1998).

⁹ Cambios en características físicas y químicas de los granos, producidas por animales y hongos, contaminación por productos químicos y por condiciones inadecuadas de temperatura y humedad (Caro, 1998).

¹⁰ Reducción en el precio del producto a consecuencia de las pérdidas de calidad(Caro, 1998).

¹¹ Cambios en la estructura física y química de los granos almacenados que alteran su valor nutritivo (Caro, 1998).

Del mismo modo, también menciona que los factores que promueven dichas pérdidas pueden ser clasificados en *físicos* y descuidos *humanos*. A continuación se muestra una tabla elaborada a partir de la clasificación de Caro (1998).

Tabla. 3 Factores que influyen en la pérdida de granos (Elaboración propia con base en Caro, 1998)

Físicos
Actividad metabólica de los granos ¹²
Plagas
Hongos
Roedores

Descuido humano
Humedad y temperatura ambiente elevados
Humedad del grano elevada
Malas prácticas en proceso de corte, trilla ¹³ y transporte
Almacenamiento inadecuado
Presencia de contaminantes ¹⁴

Sin embargo, si se trata de semillas, entonces las operaciones poscosecha también deberán estar enfocadas al cuidado de la germinación¹⁵ y vigor¹⁶ de las semillas, ya que si bien se no es posible mejorarlas, ni tampoco se puede evitar el deterioro de estas propiedades de la semilla, sí es posible reducir la velocidad con la que se deterioran mediante buenas condiciones de almacenamiento (FAO, 2019).

¹² La respiración del grano genera anhídrido carbónico y agua, produce incrementos en la temperatura y humedad de la masa de granos y favorece el desarrollo de insectos, hongos y bacterias (Caro, 1998).

¹³ Trilla: Consiste en separar los granos, o las vainas, de la parte de la planta que los sustenta (M. De Lucía y D. Assennato, 1993).

¹⁴ Insecticidas, plaguicidas, etc

¹⁵ Germinación: Proceso que inicia con la entrada de agua en la semilla y finaliza con el comienzo de la elongación de la radícula. (Pita, José Manuel. Pérez, Félix, 1998)

¹⁶ Vigor: El vigor de las semillas es el conjunto de propiedades que determinan la actividad y desempeño en el crecimiento favorable de lotes de semillas (SNICS, 2017)

La operación de secado como método de conservación de granos y semillas

Características generales

Posterior a la cosecha, las semillas presentan un contenido de humedad promedio superior al 25% (Zarate, 2018), factor que puede provocar la germinación prematura de semillas, la proliferación de hongos, plagas de insectos y la reducción del tiempo de almacenamiento de las semillas (Caro, 1998). Por lo que, a manera de reducir el contenido de humedad de los granos y evitar los factores antes mencionados, se emplean sistemas de secado. El secado es uno de los métodos más comunes de preservación de granos (Raghavan V.G.S y Sosle V, 2006) y este puede definirse como una operación unitaria que describe la remoción parcial o total de sustancias volátiles de la superficie y/o interior de un producto sólido (Arun S, 2006).

Cuando un sólido es sometido a un secado térmico, ocurren dos procesos de manera simultánea: *Transferencia de energía*: de los alrededores hacia el sólido que promueve la evaporación de la humedad superficial y *transferencia de masa*: del interior del grano hacia la superficie y la posterior evaporación de esta producto de la transferencia de energía (Arun S, 2006).

El proceso de remover el vapor de agua de la superficie de los granos, depende de factores externos. Como la temperatura, la humedad, la presión y el caudal del aire de entrada; así como la superficie del material que se encuentra expuesta al flujo del aire. Por otro lado, la humedad que fluye a través del sólido se ve afectada por factores como la naturaleza de la composición física del material a secar, la temperatura y su porcentaje de humedad (Urbán, 2019).

Mecanismos de la operación de secado

El mecanismo de secado de un material higroscópico¹⁷ es descrito por (Arun S, 2006 y González, 2016) en tres etapas:

- **Primera etapa:** Durante esta etapa, se vaporiza la humedad libre que se encuentra en la superficie de los granos, lo que da como resultado que la tasa de

¹⁷ Higroscopia: Sustancia capaz de absorber humedad del medio. (VadeQuímica, s.f.)

secado sea constante. Al final de este periodo, puede haber reducción en el tamaño del grano debido a que el agua contenida en la parte intermedia del grano comienza su desplazamiento hacia la superficie debido a fuerzas capilares. En esta etapa, el factor que influye más es el de la difusión¹⁸ del vapor de agua a través de la interface aire-humedad.

- **Segunda etapa:** Cuando la superficie del grano alcanza el contenido de humedad crítico promedio¹⁹, empieza la *segunda etapa* de secado, donde la capa insaturada de humedad que recubre al grano se ve reducida por efecto de evaporación y comienza la aparición de zonas secas. Esta etapa continúa así hasta que la película de humedad que recubre a los granos se ha evaporado por completo.
- **Tercera etapa:** Existe un desplazamiento de la humedad del interior del grano hacia la superficie por efecto de gradientes de concentración entre las partes más profundas y la superficie del grano. La conducción es el mecanismo de transferencia de calor de mayor relevancia.

Al verse reducida la concentración de humedad por efecto del secado, el movimiento de la humedad interna hacia la superficie disminuye, lo que provoca que la razón a la que ocurre el secado disminuya de manera también.

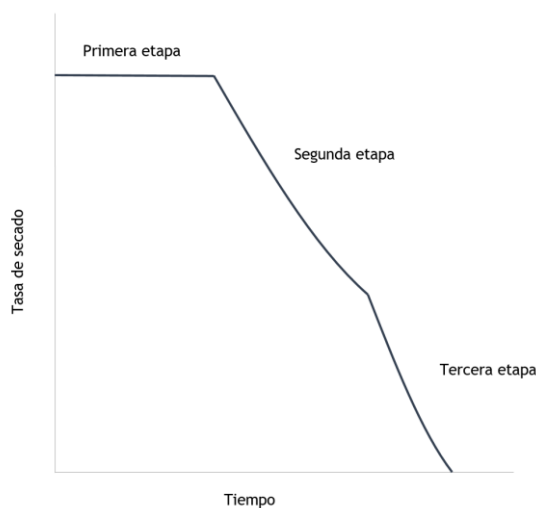


Fig. 2 Curva típica de tasa de secado a condiciones de secado constante (Fuente: Reproducción de la gráfica propuesta por Arun, 2006)

¹⁸ Difusión: Fenómeno de transporte por movimiento atómico (Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, s.f.)

¹⁹ Contenido de humedad crítico: Punto en el cual la tasa de secado comienza a disminuir, marca el inicio de la segunda etapa de secado (Bahadori, 2016)

La condición de humedad que se busca, posterior al proceso de secado, es que este se encuentre seco. Es decir, que su contenido de humedad sea menor o igual a 14%. Si los granos presentan un contenido de humedad del 15-18%, se considera que el grano aún se encuentra *húmedo* y por encima de este intervalo se considera al grano como *mojado* (González, 2016).

Clasificación de los sistemas de secado de granos

Momento de secado

El secado de granos se puede clasificar en función de diversos criterios, el primero es descrito por (Caro, 1998) como el momento en el que el secado ocurre y este, a su vez, se subdivide de la siguiente forma:

1. *Secado natural*: Se lleva a cabo sin la utilización de tecnología de por medio, donde los granos se secan a la intemperie y por ende los parámetros de secado varían según condiciones ambientales (Castro, 2018).
2. *Secado artificial*: Las semillas y granos se almacenan en silos y, mediante el uso de elementos mecánicos o manuales, se acelera el proceso de reducción del contenido de humedad (Caro, 1998).

Lo anterior, no solo puede ser visto como el momento en el que el secado ocurre, es decir, si se lleva a cabo en el mismo campo o en otro sitio, sino también como la tecnología de secado y condiciones del aire utilizados.

Temperatura del aire de secado

Otro de los criterios utilizados es por la temperatura que alcanza el aire con el que es secado el grano (Rodríguez & Bartosik, 2006).

1. ***Sistemas de baja temperatura***: Son característica principal es la de forzar aire, a temperatura ambiente o aire calentado hasta 7°C por encima de la temperatura ambiente, al interior de la secadora o silo. Además, este sistema produce una buena calidad de grano, es decir, un bajo porcentaje de granos fisurados y poca variabilidad en la humedad de estos (Bartosik, 2007).
2. ***Sistemas de media temperatura***: La temperatura del grano se mantiene por debajo de 43 °C para semillas o granos usados para molienda seca y debajo de

60°C para los demás granos. Se puede realizar en un silo o en secadoras de alta capacidad (Rodríguez & Bartosik, 2006).

3. **Sistemas de alta temperatura:** En los sistemas de alta temperatura, el aire que ingresa a la secadora lo hace con una temperatura de alrededor de 80°C, el tratamiento es más agresivo que con los sistemas anteriormente descritos. Lo que puede ocasionar daños de calidad del grano (de la Torre, 2010).

Flujo de granos

Finalmente, también es posible encontrar clasificación de los equipos de secado en función al flujo que tienen los granos. Caro (1998) menciona únicamente tres rubros que son *Secado estático, con recirculación* y de *flujo continuo* y ellos engloban muchas de las configuraciones mencionadas por (De Dios. C.A.,1996 y González, G. Y. J., 2016).

1. *Flujo estático:* Sistema en el que los granos no tienen flujo. Este tipo de equipos son los más sencillos y económicos debido a que los sistemas requeridos para el manejo de los granos son más sencillos. En este proceso no existe una homogenización de la humedad (Caro, 1998).
2. *Flujo con recirculación:* Sistema en el cual, existe un proceso de mezcla constante de los granos mientras el secado ocurre (Raghavan V.G.S y Sosle V,2006) con el fin de homogeneizar la humedad de los granos (Caro, 1998).
3. *Flujo continuo:* Son todas aquellas secadoras en las que se introduce el grano y se descarga en forma continua o intermitente (De Dios. C.A.,1996), llevando al grano mecánicamente a un lugar de almacenamiento. Este sistema es habitual encontrarlo en lugares donde es necesario procesar una gran cantidad de material (Caro, 1998).

Es importante mencionar, que la elección de un sistema de secado debe ser un proceso que considere capacidad de producción del sitio, la capacidad de almacenamiento y las condiciones climáticas del sitio en el que se localiza el equipo de secado (Raghavan V.G.S y Sosle V,2006).

Secadora estática de aire natural a baja temperatura

Este tipo de secadora, por su simplicidad, es de las menos costosas y en esencia, las partes que las componen son un contenedor con piso perforado, sistema de llenado y

descarga de semillas , un ventilador, un sistema de calentamiento del aire (Raghavan V.G.S y Sosle V,2006) y un plenum²⁰ (Caro, 1998).

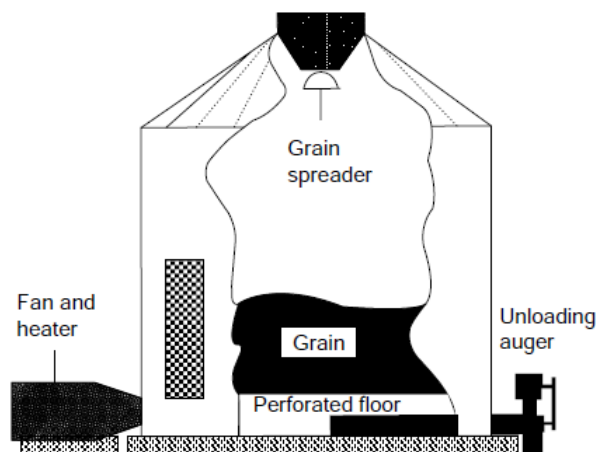


Fig. 3 Diagrama básico de una secadora de aire natural a baja temperatura (Fuente: Raghavan V.G.S y Sosle V,2006).

En este tipo de equipos, las tasas de secado dependen de factores como el tiempo de secado, la profundidad de granos y la humedad de estos, la temperatura y el flujo másico del aire de secado. Este último se recomienda que sea de 450 [m³/h] por cada metro cúbico de granos (Raghavan V.G.S y Sosle V, 2006). Mientras que el aire de secado se recomienda que se encuentre a una temperatura máxima de 43 [°C], con una humedad relativa del 60% (Hall, C.W.,1980). Los valores anteriores se proponen ya que, de aumentarse la temperatura de entrada, la tasa de secado aumenta, sin embargo, se corre el riesgo de sobresecar la capa de granos que se encuentra más próxima al suelo perforado (Raghavan V.G.S y Sosle V, 2006).

La eficiencia energética²¹ depende del diseño de la secadora, del tipo de grano, los puntos de humedad a remover y las condiciones climáticas del sitio en el que se localiza la secadora (de la Torre, 2010).

²⁰ Zona en la que se distribuye uniformemente el aire que viene del ventilador antes de pasar por el grano

²¹ Eficiencia energética: Energía requerida por kg de agua evaporada del grano durante el proceso de secado. (de la Torre, 2010)

Marco metodológico

Para la determinación de la demanda energética, se utilizó un método similar al de Zhong (2015), mismo que fue propuesto para el modelado del proceso de secado de granos de arroz en dos dimensiones. Sin embargo, también se utilizaron ecuaciones propuestas por T. L. Thompson et al (1968), Jindal y Siebenmorgen (1994), Sharaf-Eldeen et al (1980), Islam et al (2005) y Friant (2002). En esta metodología, conocida como modelo de capa delgada, se lleva a cabo una simulación de la operación de secado y su principal característica es que la masa de granos de la celda de secado es seccionada en pequeños volúmenes de control y en pequeños intervalos de tiempo. De tal forma que, para cada capa, se aplican las ecuaciones de balance de masa y energía en el intervalo de tiempo dado.

Para la primera capa, la temperatura y la humedad absoluta del aire de entrada son datos conocidos, así como la temperatura inicial de los granos y su contenido de humedad. Por lo que, al utilizar los modelos propuestos por Jindal y Siebenmorgen (1994), es posible conocer cuál será la temperatura, la humedad absoluta del aire y la temperatura final de los granos, mientras que, para el cálculo del contenido de humedad de los granos de maíz al cabo de 60 min, se utiliza la ecuación propuesta por Friant (2002). Para la segunda capa, se consideran las condiciones a las que sale el aire de la primera capa como condiciones iniciales y se realizan los balances de energía y de humedad hasta llegar a la última capa. Para el segundo paso del aire, se considera que el aire de secado ingresa nuevamente al volumen de control con las condiciones ambientales, mientras que la condición final de cada capa de granos determinada durante el primer paso del aire, ahora se considera la condición inicial de la capa de granos. Este proceso se repite de manera consecutiva hasta llegar al contenido de humedad final objetivo de los granos de maíz, valor que es considerado como un promedio del contenido de humedad final reportado por la compañía en cuestión.

Además, para poder establecer las condiciones iniciales del modelo fue necesario llevar a cabo una revisión de los valores promedio de temperatura y humedad relativa registradas por la base de datos Averageweather.com de los periodos 01-31 de Marzo, 01-30 de Abril y 01-31 de Mayo del 2020.

En cuanto a la geometría de las celdas de secado, estas cuentan con un bastidor de madera, mismo que tiene una pendiente de 24° sobre la cual descansa el maíz que se secará. A manera de normalizar las dimensiones de las capas, se propuso una geometría

rectangular equivalente. En la Fig.6, se muestra la celda de secado con dicha geometría, en donde el la geometría equivalente, la disección del volumen de control en capas y la representación de los flujos de entrada y salida de masa y energía del sistema.

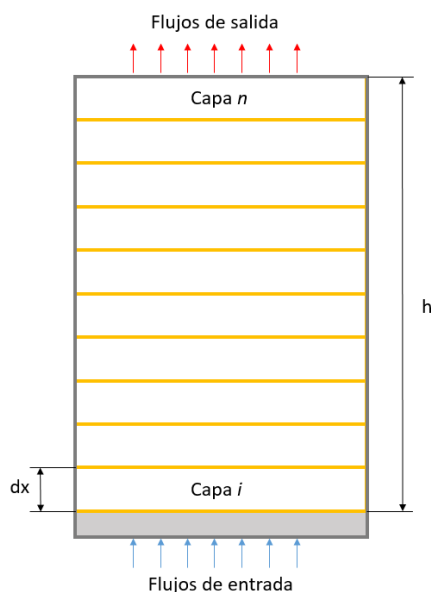


Fig. 5 División del volumen de control en capas delgadas (Fuente: Elaboración propia)

Las dimensiones del largo y ancho son las mismas mostradas en la Fig.1, mientras que la profundidad (h) propuesta para el análisis, es resultado de un promedio, por mes, de la altura registrada en la bitácora de producción de la empresa, por lo tanto, el número de capas y el espesor (dx) de estas, también varió respecto al mes del que se trató.

De tal forma que, en la Tabla 3, se muestran los datos climatológicos promedio de la localidad en la que ubica la planta, así como las condiciones del proceso de secado de la producción otoño-invierno 2021 de la compañía, que fueron considerados para el análisis.

Tabla 3 Datos promedio de la producción OI 2020

Localidad	Zapopan, Jalisco			
	03/Marzo - 21/Mayo			
Periodo de cosecha		Marzo	Abril	Mayo
Temp. Ambiente	[°C]	20.4	22.6	24.2
Humedad relativa	[%]	45	40	35
Masa de granos procesada por celda	[ton]	63.61	73.86	40.63
Altura promedio de la columna de granos	[m]	5.35	5.12	4.1
Contenido de humedad inicial promedio	[%]	26.67	24.5	16.6
Contenido de humedad final promedio	[%]	12.58	12.27	12.05
Temp. Inicial del maíz	[°C]	28.25	28.31	28.78
Flujo volumétrico de aire de secado	[m ³ /h]	78520.61	75144.96	60174.68
Tasa de secado	[h/punto humedad]	5	5.07	6.68
Tiempo total de secado	[hrs]	80.63	58.93	30.9

Balance de masa

Para el caso del balance de masa, se utilizan las expresiones propuestas por Jindal y Siebenmorgen, (1994). La primera ecuación parte del supuesto de que la cantidad de agua que se evapora de los granos es equivalente al cambio de masa de vapor contenido en el aire de secado.

$$H_f - H_o = \frac{(M_o - M_f)r}{100}$$

$$r = \frac{\rho_g d_x}{\rho_a v_a t}$$

Donde:

H_f : Humedad absoluta del aire de entrada [$\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire seco}}$]

H_o : Humedad absoluta del aire a la salida [$\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire seco}}$]

M_o : Contenido de humedad inicial del grano en base húmeda

M_f : Contenido de humedad final del grano en base húmeda

ρ_g : Densidad del grano de maíz [kg/m^3]

ρ_a : Densidad del aire [kg/m^3]

v_a : Velocidad del aire de secado [m/seg]

t : Intervalo de tiempo por simulación [seg]

El valor de la densidad de los granos de maíz utilizado es de 750 [kg/m^3], mismo que se reporta en la publicación La ingeniería en el desarrollo- Manejo y tratamiento de granos poscosecha, (1993) por M. De Lucía y D. Assennato. Por otro lado, el valor de la densidad del aire se consideró de 1.14 [kg/m^3]. Además, la velocidad del viento se estimó con base en el caudal propuesto por Raghavan V.G.S y Sosle V, 2006, que recomiendan usar 450 [m^3/h] de aire de secado por cada m^3 de granos de maíz a secar multiplicada por el área de sección transversal de las escotillas que se encuentran en las tolvas de secado. Finalmente, los intervalos de la simulación fueron de 60 [min] cada una.

Para el poder determinar cuál es el contenido de humedad final de los granos, se empleó el balance de masa propuesto por Friant (2002), mismo que también recurre al concepto de humedad de equilibrio.

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = e^{-kt^n}$$

$$k = \exp \left[A + (CT_{abs} + D)M_o + \frac{B}{T_{abs}} \right]$$

$$n = 0.99 ; A = -28.66 ; B = 7947 ; C = 0.2744 ; D = -86$$

Donde:

M : Contenido de humedad final [$\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{grano}}$]

M_o : Contenido de humedad inicial del grano [$\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{grano}}$]

M_e : Contenido de humedad de equilibrio [$\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{grano}}$]

En esencia, la humedad de equilibrio es una representación de cuál es el contenido de humedad que se puede alcanzar dadas las condiciones de la temperatura del aire de secado y su humedad relativa (Zhong, 2015). Además, la humedad de equilibrio también puede indicar si es que existe un fenómeno conocido como desorción²² si el valor calculado de M_e es menor a M_o , Por el contrario, si M_e es mayor a M_o , entonces se da el fenómeno de adsorción²³.

De tal forma que, para el cálculo de la humedad de equilibrio, se utilizó la ecuación de Sharaf-Eldeen et al (1980).

$$M_e = A \left[\frac{-\ln(1 - HR)}{T_{abs}} \right]^B$$

$$A = 5.69 ; B = 0.55$$

Donde:

A, B : Son constantes empíricas propuestas por Sharaf-Eldeen, (1980)

T : Temperatura [K]

HR : Humedad relativa del aire de secado

Para determinar la humedad relativa del aire dadas las condiciones, se utilizaron las siguientes ecuaciones (ASABE, 2014):

$$HR = \frac{P_s}{P_v}$$

²² Proceso en el cual una sustancia es liberada desde o a través de una superficie

²³ Proceso en el cual un sólido retiene las moléculas de un gas o líquido en una capa fina

$$P_v = \frac{101325H}{0.6219 + H} ; P_s = K \times \exp\left(\frac{A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4}{FT - GT^2}\right)$$

$$A = -27405.526 ; B = 97.5413 ; C = -0.146244 ; D = 0.12558 \times 10^{-3}$$

$$E = -0.48502 \times 10^{-7} ; F = 4.34903 ; G = 0.39381 \times 10^{-2} ; K = 22105649.25$$

Donde:

HR : Humedad relativa del aire [%]

P_v : Presión parcial de vapor en el aire [Pa]

P_s : Presión del aire-vapor saturado [Pa]

H : Humedad absoluta del aire [$\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire seco}}$]

T : Temperatura del aire [$^{\circ}\text{C}$]

A, B, C, D, E, F, G, K : Constantes empíricas

Balance de energía

Para poder describir cuál es la interacción que tiene el volumen de control o capa de granos de maíz con sus alrededores y poder cuantificar la energía que es consumida durante el proceso, es necesario un emplear un modelo termodinámico. Jindal y Siebenmorgen (1994) proponen un modelo que relaciona a los flujos de energía de entrada y salida de la siguiente forma:

$$C_a T_o + H_o(h_v + C_v T_o) + C_g G_o r + C_w G_o (H_f - H_o) = C_a T_f + H_f(h_v + C_v T_f) + C_g T_f r$$

Donde:

C_a : Calor específico del aire de secado [J/kgK]

C_v : Calor específico del vapor de agua [J/kgK]

C_g : Calor específico del grano de maíz [J/kgK]

C_w : Calor específico del agua [J/kgK]

h_v : Calor latente de vaporización [J/kg]

T_o : Temperatura inicial del aire de secado [K]

T_f : Temperatura final del aire de secado y granos de maíz [K]

G_o : Temperatura inicial de los granos de maíz [K]

r : Relación de masa de granos húmedos/ aire de secado [$\text{kg}_{\text{grano mojado}}/\text{kg}_{\text{aire}}$]

Del balance de energía, los términos $C_a T_o + H_o(h_v + C_v T_o)$ representan a la entalpía de la mezcla aire-vapor de agua a condiciones iniciales, $C_g G_o r$ es la entalpía contenida en los granos de maíz a condiciones iniciales y $C_w G_o (H_f - H_o)$ es el intercambio de energía que tiene lugar debido a la diferencia de humedad del sistema.

El segundo miembro de la ecuación representa a los flujos de energía de salida del volumen de control.

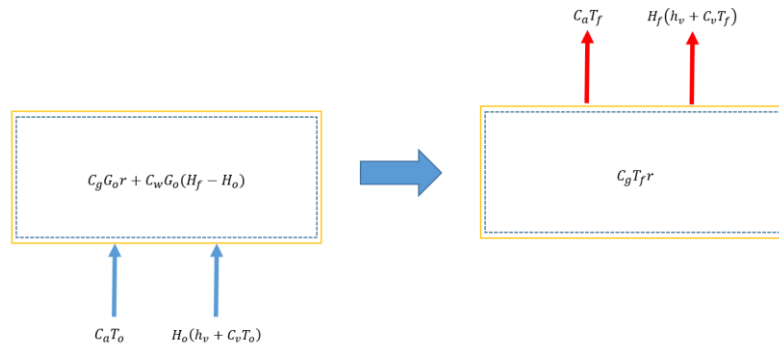


Fig. 6 Balance de energía por capa (Fuente: Elaboración propia con base en el balance propuesto por Jindal y Siebenmorgen, 1994)

El balance de energía parte de las siguientes consideraciones:

- **Proceso adiabático (Fronteras):** No existen pérdidas de calor a través de las paredes de la cámara de secado.
- **Proceso adiabático (Aire-granos de maíz):** La temperatura final del grano es igual a la temperatura de secado.
- **Estado estacionario:** En cada capa o cama de granos, la energía y la humedad del grano, así como el aire, alcanzan el equilibrio en intervalo de tiempo considerado.
- **C_g :** Este dato fue tomado de la propuesta que realizó (Roque-Maciél et al., 2016), en el que hizo un promedio de los C_p del maíz reportados por la ASABE en la publicación de 1999, *Thermal Properties of Grain and Grain Products*. De tal forma que el valor reportado es de 2.27 [kJ/kgK].
- **C_a :** El valor del calor específico del aire de secado se consideró de 1.005 [kJ/kgK].
- **C_v :** El valor del calor específico del vapor de agua se consideró de 1.556 [kJ/kgK].
- **H_v :** El valor del calor latente de vaporización se consideró de 2261 [kJ/kgK].
- **C_w :** El valor del calor específico del agua se consideró de 4.21 [kJ/kgK].

Del balance de energía, es posible determinar cuál será la temperatura final de los granos después de cada paso del aire, este dato es de utilidad para el cálculo de cuál es la energía térmica demandada por esta operación mediante el uso de la siguiente ecuación.

$$Q = m_g C_g \Delta T$$

Análisis y resultados

Análisis sobre las curvas de secado

Mediante el uso de los modelos de balance de masa, descritos anteriormente en el *Marco metodológico* del presente, así como las condiciones climáticas y de producción promedio mostradas en la Tabla 3; fue posible construir las curvas de secado de los meses de Marzo, Abril y Mayo. A continuación, se muestra la Tabla 4, misma que resume los resultados de la simulación.

Tabla 4 Resultados de la simulación (Balance de masa)

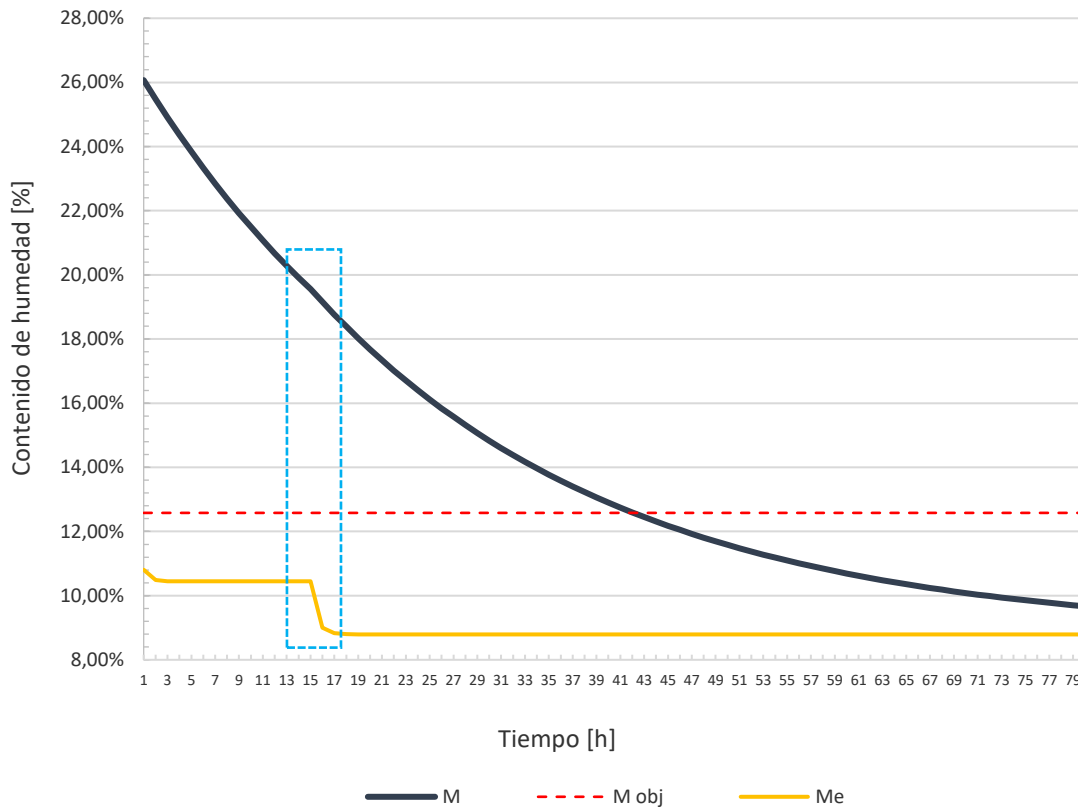
	Unidades	Marzo	Abril	Mayo
Tiempo en el que alcanza humedad objetivo	[h]	42	41	37
Cont. Humedad objetivo simulado	[%]	12.59%	12.19%	12.05%
Tasa de secado teórica	[h/punto humedad removido]	4.98	4.75	9.70
Hora de inversión del flujo	[h]	16	15	18
Humedad de granos con el tiempo real	[%]	9.70%	10%	11.30%
Horas de simulación	[h]	80	69	31

En cuanto a los resultados correspondientes al mes de marzo, se presenta la Gráfica 6, donde es posible observar el comportamiento que tiene el contenido de humedad de los granos de maíz en una celda de secado durante un ciclo de secado completo.

Para el primer escenario, es necesario retirar de los granos de maíz un total de 14.09 % de humedad, lo que puede traducirse en 8.96 toneladas de masa de agua.

La bitácora de producción muestra que el tiempo de secado promedio de cada celda es de 80.63 horas, sin embargo, el tiempo mostrado por la simulación que se requiere para que, en promedio, los granos de maíz de cada una de las 20 capas alcancen un valor de humedad aproximado al 12.59% es de 42 horas. Este tiempo representa 48% menos del tiempo de secado promedio por celda y la tasa de secado es de 4.98 horas por cada punto de humedad a remover (Gráfico 9).

Gráfico 6 Curva de secado de los granos de maíz - Marzo



Adicionalmente, el rectángulo azul muestra el impacto que tiene el cambio de la temperatura y dirección del flujo del aire de secado de manera ascendente a descendente que tiene lugar a las 16 horas después de iniciada la operación; tanto en la curva de secado como en la humedad de equilibrio. En este punto, la curva de secado pareciera no verse afectada significativamente, sin embargo, se alcanza a percibir un cambio en la curva que permite inferir que existe un cambio en la tasa de secado de la operación, además de que esta medida evita que exista un sobrecalentamiento o un secado excesivo en las capas más próximas a la entrada del aire.

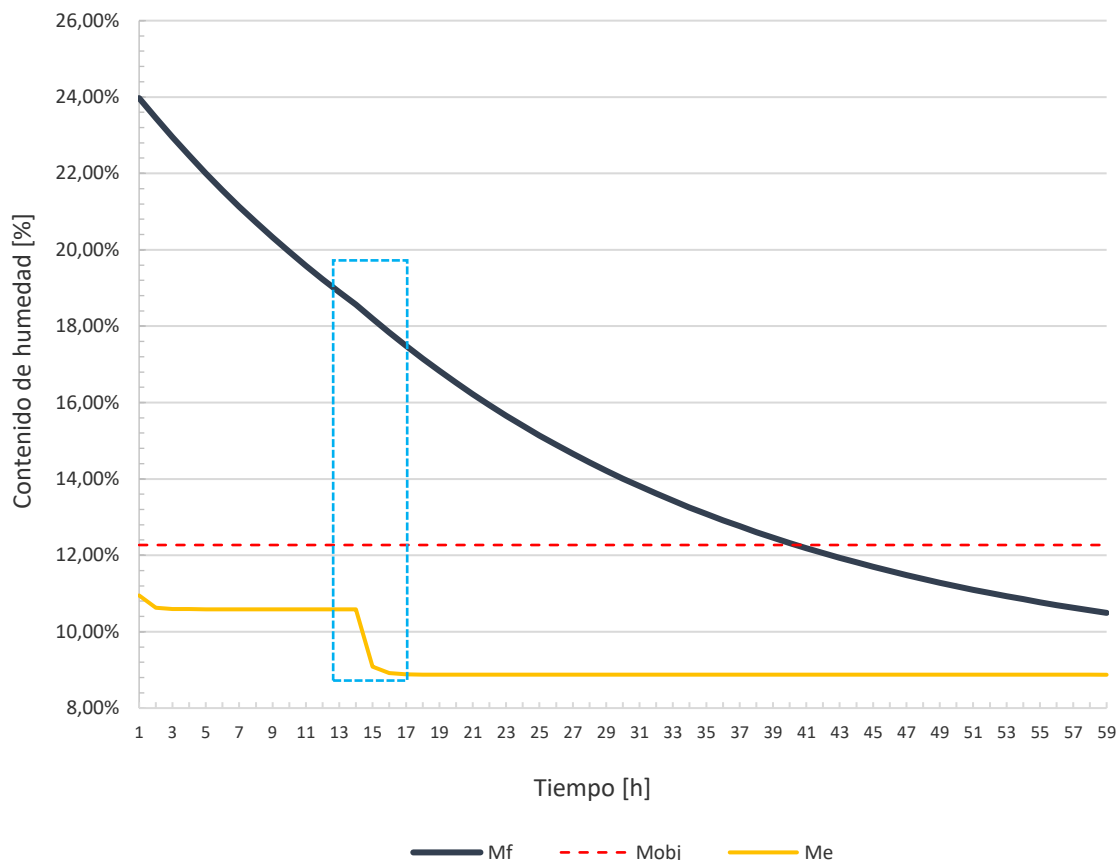
En cuanto al mes de abril, la curva de secado, mostrado por el Gráfico 7, se puede observar un comportamiento similar al anterior. En este caso, el contenido de humedad que es necesario retirar de los granos es de 12.23% u 10.7 toneladas de agua en un tiempo de 68.89 horas.

Al término de las 41 horas de secado, los granos de maíz alcanzan un contenido de humedad de 12.19%, que es el valor de la humedad objetivo. El resultado de la simulación muestra que se requiere 41% menos de tiempo para alcanzar el valor objetivo

de la humedad. Además, el impacto del cambio de la dirección del flujo y la temperatura del aire de secado también es visible a las 15 horas posteriores al inicio del secado.

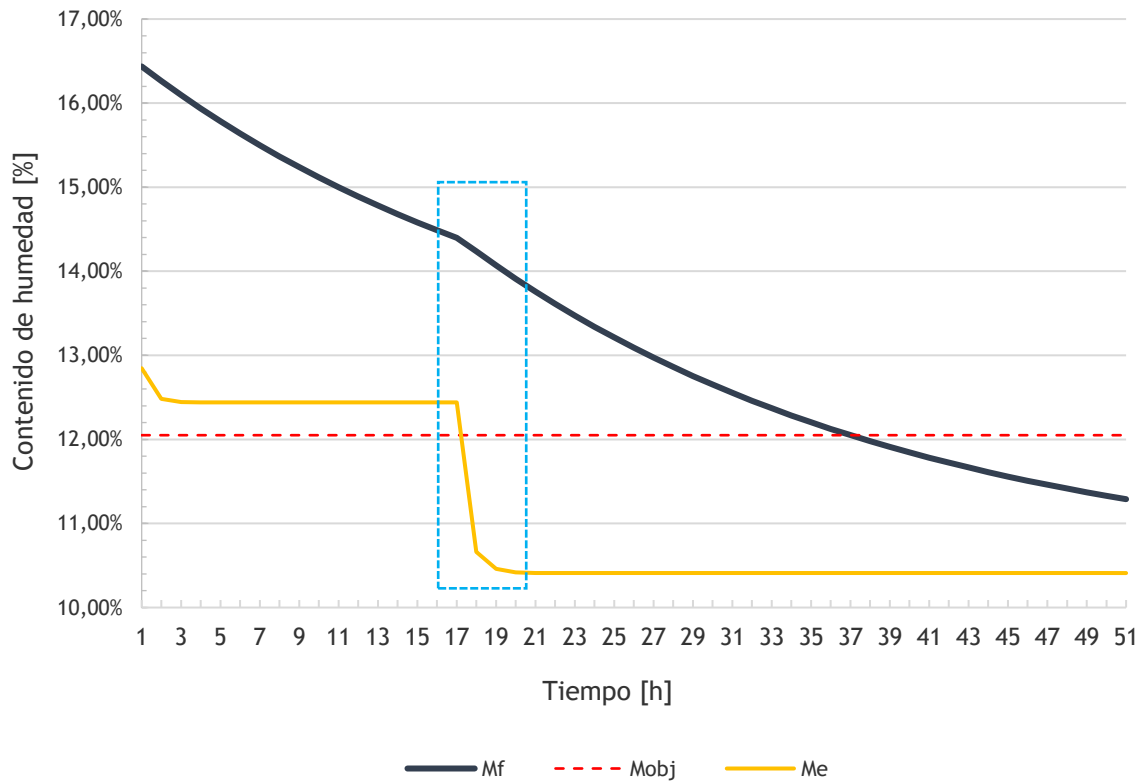
Finalmente, la tasa de secado promedio para esta simulación fue de 4.75 horas por cada punto de humedad a remover (Gráfico 9).

Gráfico 7 Curva de secado de los granos de maíz - Abril



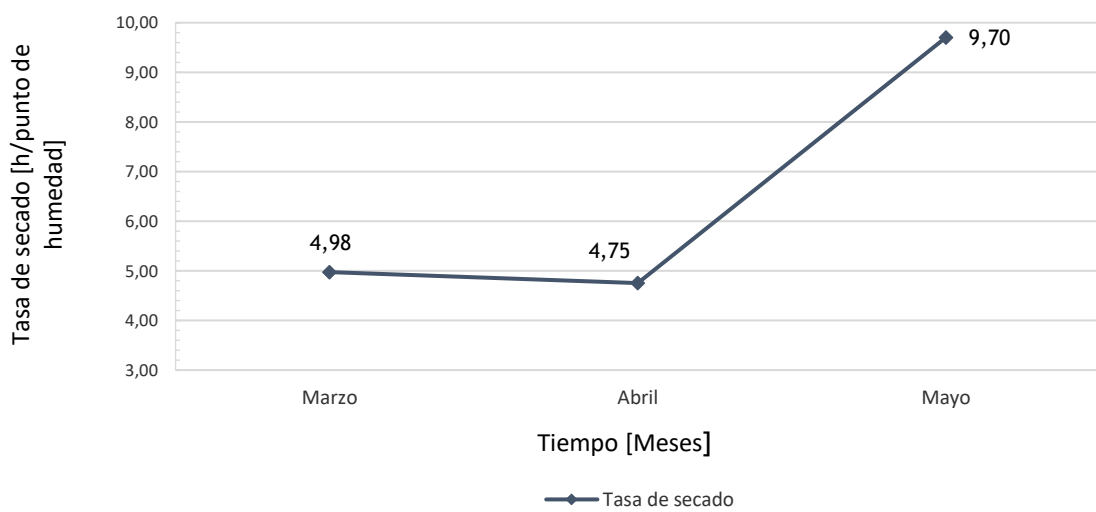
Para el mes de mayo, la bitácora de producción muestra que el tiempo de secado promedio por celda fue de 30.9 horas, además de que el contenido de humedad inicial promedio de los granos de maíz registrado fue de 16.6% (2.1 toneladas de agua contenidas en su interior), sin embargo, la simulación mostró que, dadas las condiciones iniciales de los granos de secado y las condiciones iniciales del aire, se requieren cerca de 37 horas para poder alcanzar el valor de humedad reportada por el equipo de producción.

Gráfico 8 Curva de secado de los granos de maíz - Mayo



Al considerarse que las celdas de secado se encuentran operando a un 50% de su capacidad, fue posible observar un impacto significativo a la tasa de secado, ya que se calculó un valor de 9.70 horas.

Gráfico 9 Tasa de secado

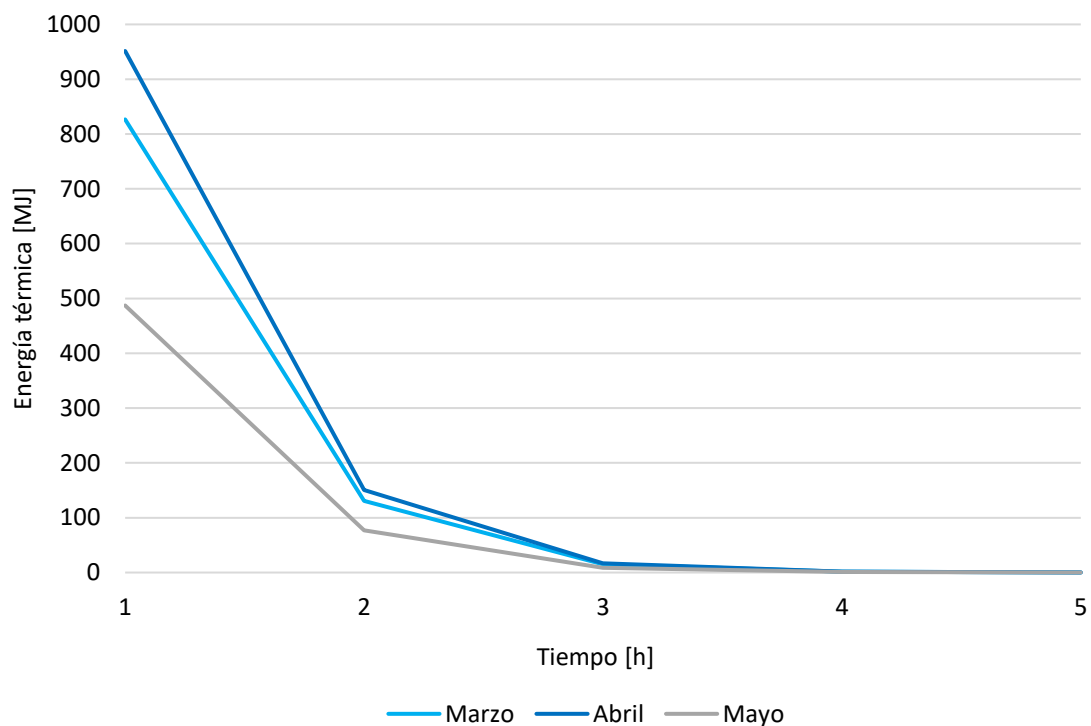


Análisis sobre la demanda de energía térmica

En cuanto a la demanda energética, se pudo observar que, para los tres meses estudiados, presenta un comportamiento variable dadas las condiciones iniciales del aire de secado y los granos de maíz, así como de la naturaleza de la operación por sí misma. Para un análisis más claro, fue necesario segmentar el análisis en cuatro etapas.

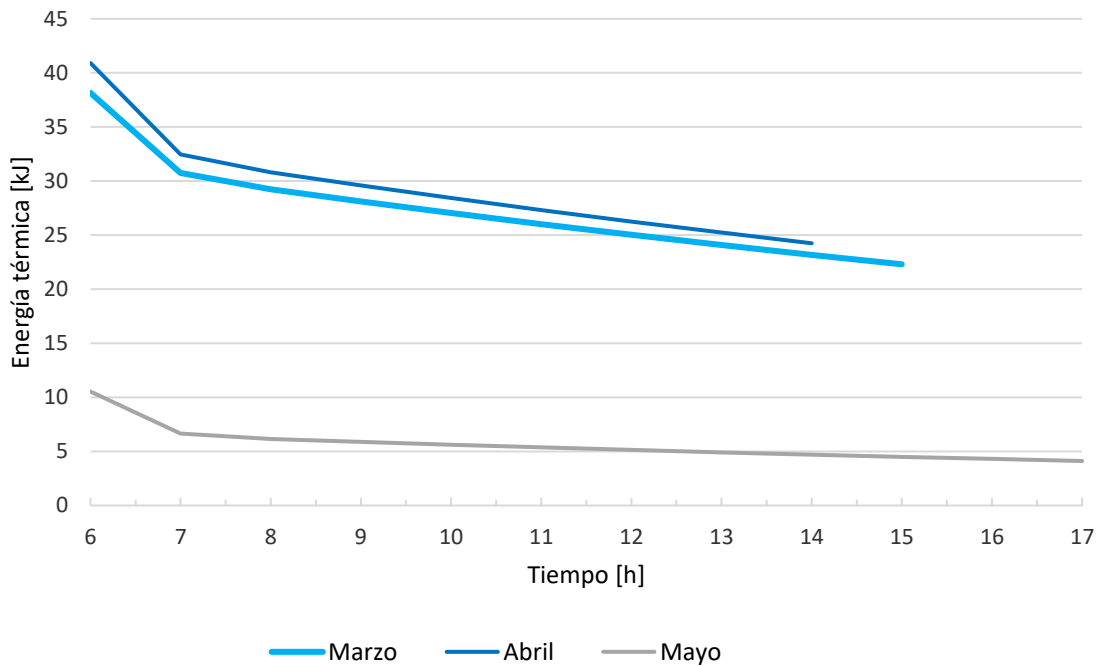
Durante la *primera etapa*, comprendida entre las 5 y 6 horas, los granos tienden a incrementar su temperatura promedio 6.7 [°C] con respecto a su temperatura inicial. Producto de esto, se estima que la energía térmica demandada en este periodo de tiempo es de 974.7, 1121.6 y 573.5 [MJ] para los meses de marzo, abril y mayo, respectivamente. Es decir, por cada hora existe una demanda promedio de 194.9, 224.2 y 114.7 [MJ].

Gráfico 10 Demanda térmica durante la primera etapa



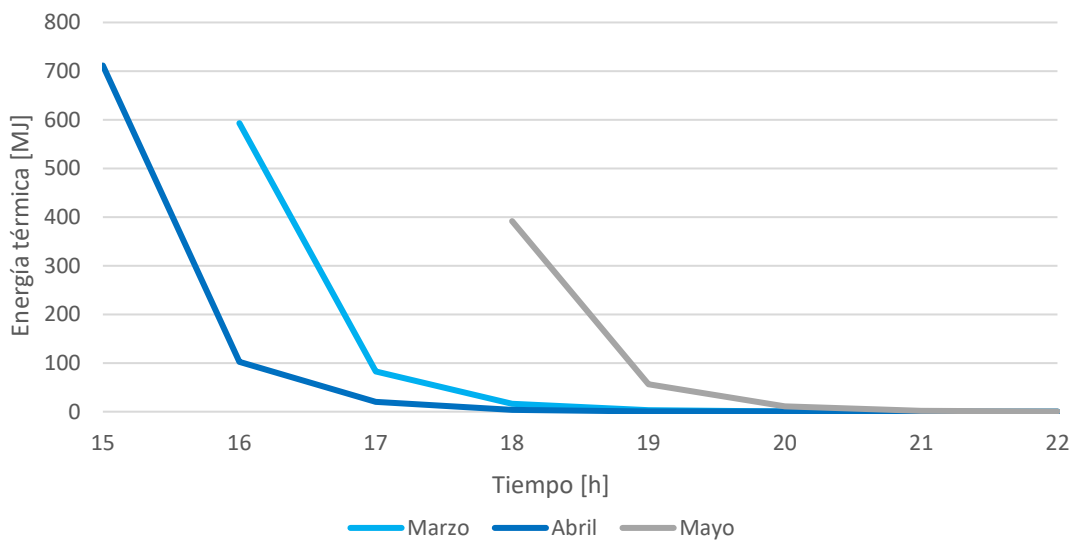
Posteriormente, entre las 6 y 17 horas, está comprendida la *segunda etapa* (Gráfico 11), donde la diferencia entre las temperaturas inicial y final de las capas de granos tienden a cero, por lo que es posible observar que el calor requerido para el secado de las semillas disminuye significativamente su orden de magnitud. De tal forma que, la demanda energética en este punto es de 273.9, 265.2 y 67.9 [kJ], a una tasa de 27.4, 29.5 y 5.7 [kJ/h].

Gráfico 11 Demanda de energía térmica durante la segunda etapa



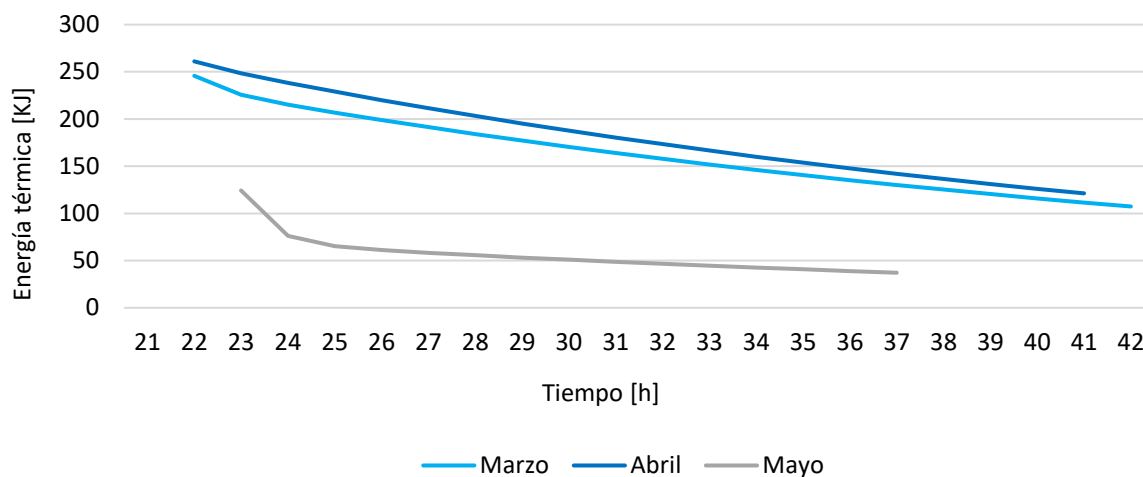
Cuando el sentido del flujo del aire de secado es cambiado, es posible observar un repunte en la demanda térmica debido a que el aire de secado ingresa a la celda de secado con 40 [°C], tal como se muestra en el Gráfico 12. De tal forma que, para este tercer periodo, se estimó una demanda térmica de 695.6, 838.2 y 461 [MJ], lo que se traduce en 139.4, 139.7 y 92.2 [MJ/h]

Gráfico 12 Demanda térmica durante la tercera etapa



Finalmente, la *cuarta etapa* del análisis tiene su inicio entre las 21 y 23 horas posteriores al inicio de la operación, continuando hasta el momento en el que se alcanza el contenido de humedad objetivo, tal como es mostrado en el Gráfico 13. La demanda térmica en este punto, para los tres meses analizados, es de 3422.7, 3633.5 y 844.51 [kJ].

Gráfico 13 Demanda térmica durante la cuarta etapa



De tal forma que, al sumar los datos antes mencionados, se calculó la demanda de una celda de secado para un ciclo completo, dando como resultado 1674.7, 1695.58 y 1036.4 [MJ]. Posteriormente se consideró la operación de las 16 celdas de secado, calculando así la demanda de energía térmica total de la planta, ascendiendo esta hasta los 827.96, 972 y 513.27 [GJ] para los meses de marzo, abril y mayo, respectivamente.

Tabla 5 Resultados de la simulación en materia de la demanda de energía térmica

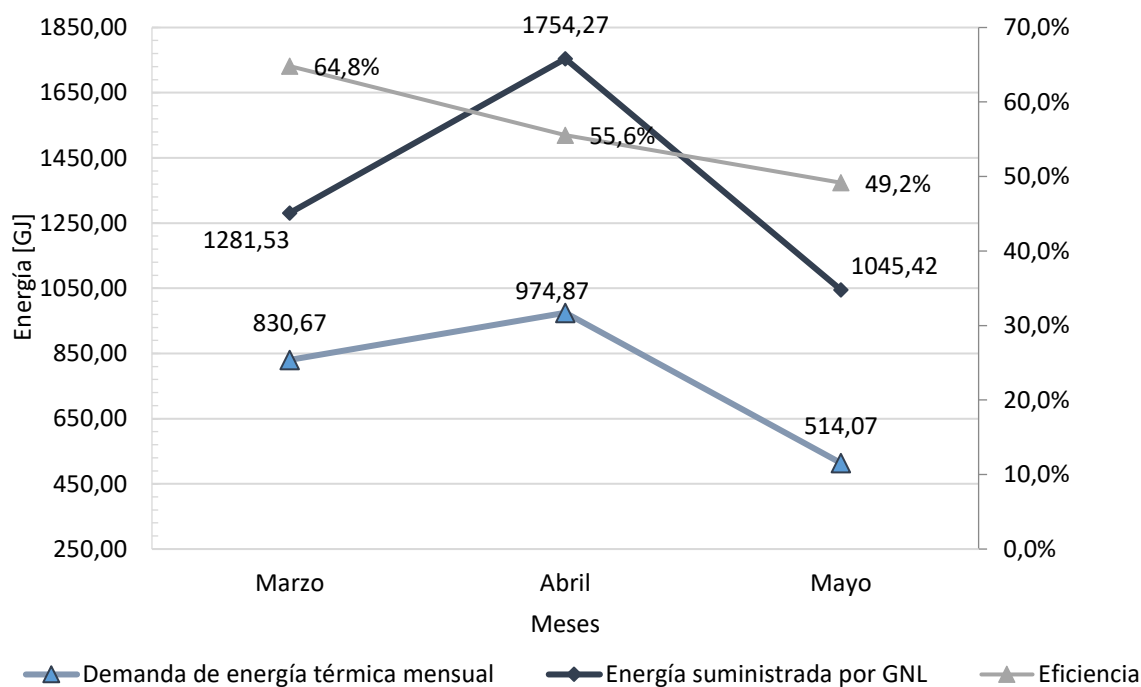
	Unidades	Marzo	Abril	Mayo
Demanda térmica por celda de secado	[MJ]	1674.74	1965.46	1036.43
Demanda térmica mensual por 16 celdas	[GJ]	830.67	974.87	514.07
Eficiencia térmica	[%]	64.8%	55.6%	49.2%
Costo del secado por celda	[\$/celda]	\$ 3,390.69	\$ 3,979.28	\$ 2,098.36
Costo total del secado	[\$/mes]	\$ 54,251.10	\$ 63,668.54	\$ 33,573.75

El costo de secado contempla un costo de 65.31, 72.83 y 76.57 [\$/GJ]

Finalmente, se llevó a cabo una comparación de los resultados obtenidos del modelo de balance de energía con aquellos reportados en la facturación por concepto de consumo de gas natural comprimido (Gráfico 14). Donde la demanda total de energía térmica que se encontró en los registros de facturación por concepto de gas natural comprimido fue de 4081.2, mientras que la demanda térmica calculada tuvo un valor total de 2,313.23 [GJ]. Además, es posible calcular la eficiencia térmica mensual de la operación de secado mediante el cociente de la energía térmica demandada respecto

a la suministrada. En este sentido, el mes más eficiente es marzo, que registró un valor de 64.8%, mientras que para el mes de abril se calculó un valor de 55.6% y para marzo 49.2%

Gráfico 14 Comparativa de la demanda térmica demandada real-teórica



Conclusiones

El principal reto del estudio fue la imposibilidad de medir los datos en sitio, ya que si bien se trabajó con los datos de la bitácora de producción para obtener valores de las toneladas procesadas por la planta de producción, el tiempo de un ciclo completo promedio de secado y la razón de tiempo que es requerida para remover un punto de humedad; también era necesario conocer cuáles eran las propiedades del ambiente en el cual se lleva a cabo la operación, las temperaturas de las paredes del recinto, así como las propiedades del aire al interior del túnel que conduce hacia las celdas de secado y a la salida de las mismas. Esta situación, hizo necesaria la búsqueda de información adicional en publicaciones científicas y bases de datos meteorológicas, así como llevar a cabo suposiciones que facilitarían el análisis.

Como resultado de lo anterior, de la utilización de los modelos de balance de masa y energía de Jindal, V. K., & Siebenmorgen, T. J. (1994), de las pérdidas de energía térmica

y de la naturaleza del secado de materiales higroscópicos, se obtuvo una variación significativa entre los resultados obtenidos por la simulación y aquellos registrados en las bitácoras de producción, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6 Comparativa de los resultados obtenidos respecto a los valores de bitácora de producción

Periodo	Tiempo de secado			Tasa de secado			Demanda energética		
	Calculado	Registrado	Variación	Calculado	Registrado	Variación	Calculado	Registrado	Variación
Marzo	42	80	48%	4.98	5.70	13%	830.67	1281.53	35%
Abril	41	69	41%	4.75	5.07	6%	974.87	1754.27	44%
Mayo	37	31	19%	9.70	6.68	45%	514.07	1045.42	51%

Si bien los resultados no pueden ser tomados como concluyentes, sí es posible utilizarlos para analizar qué parámetros y supuestos razonables tienen mayor impacto en el aumento o decremento de estos valores, tal y como se enlista a continuación:

1. **El proceso es adiabático:** Esta consideración tiene dos implicaciones: La primera tiene que ver con que no se considera la existencia del flujo de calor hacia el ambiente a través de las paredes del recinto; Mientras que la segunda tiene que ver con la temperatura de los granos. Se asume que, posterior al tiempo de cada simulación, los granos de maíz alcanzan la temperatura final del aire de secado, cuando en realidad, sería más preciso analizar al problema considerando a los mecanismos de transferencia de calor. como lo describe Bakker et al, (1974) en su artículo "Modelado de una secadora de mazorcas de maíz" (*Modeling an ear-corn dryer*). En este, se involucra un coeficiente de transferencia de calor volumétrico, describiendo así al comportamiento de la temperatura del grano de maíz con el paso del tiempo como un sistema aparte. La temperatura es uno de los parámetros más importantes que determinan cuán grande es la demanda de energía térmica del proceso.
2. **Flujo volumétrico y velocidad del aire:** Si bien la temperatura del aire y de los granos son un factor decisivo en el aumento o decremento de la demanda térmica, otro factor importante a considerar es el de la cantidad de aire que ingresa a la celda de secado y la velocidad de este. Sin embargo, la falta de información respecto al volumen de aire que ingresa a la celda de secado por hora, así como la velocidad que lleva este, hizo necesario considerar las siguientes simplificaciones. La primera, referente al flujo volumétrico, es aquella propuesta por Raghavan V.G.S y Sosle V,(2006), respecto a utilizar un flujo de aire de secado de 450 metros cúbicos por hora por cada metro cúbico de granos de

maíz. En cuanto a la velocidad del aire, se asumió que es constante para todas las celdas de secado. El problema con esta suposición es que el plenum o túnel (tanto inferior como superior) tiene una longitud de 44 metros, con columnas en el medio que obstaculizan el flujo del aire y los muros tienen estructura expuesta con bordes y perfiles abruptos. Estas condiciones representan un problema para el flujo del aire, lo que se podría traducir en pérdidas de presión por efecto de efectos de arrastre y turbulencias.

3. **Temperatura y humedad relativa del aire ambiente:** Si bien las condiciones de la temperatura y humedad relativa son variables con respecto al tiempo, fue necesario considerar un valor promedio.
4. **Propiedades del maíz:** Tanto el calor específico, como la densidad del maíz, son propiedades que se utilizan para este estudio, sin embargo, la empresa no tiene estos datos sobre sus productos, por lo que fue necesario tomar los datos anteriormente descritos de la revisión bibliográfica que se llevó a cabo.
5. **Falta de control de las condiciones del aire de secado durante la operación real:** La operación está más enfocada al monitoreo de la temperatura y humedad de los productos procesados y no tanto así de las condiciones del aire de entrada. Ellos controlan el ingreso del gas natural comprimido hacia los quemadores hasta el punto en el que el aire es calentado a una temperatura no mayor a los 40 [°C] antes de los aireadores y no al interior de los túneles. Esto, aunado a las obstaculizaciones mencionadas en el punto 2, podría propiciar que el aire ingresa a la celda lo hace con una saturación elevada o bien, con una temperatura menor a la establecida en los procedimientos internos de la empresa.
6. **Simplificación del maíz procesado:** Dentro de la cartera de productos que posee la empresa, se encuentran pequeños lotes de maíz amarillo. Estos, a pesar de no ser representativos comparados con el volumen de maíz amarillo procesado, también podrían tener propiedades diferentes que afecten de manera proporcional al resultado de la demanda energética

De los resultados obtenidos por la simulación, además de las entrevistas con el personal encargado del secado del maíz, se plantea lo siguiente:

El secado representa un cuello de botella en el proceso de acondicionamiento de semillas, ya que es el que mayor tiempo requiere para completarse. Sin embargo, sería interesante desarrollar estrategias de secado que establecieran, en función del tipo de

maíz y al programa de producción de la temporada, la capacidad de llenado de las celdas de secado y los caudales de aire específicos; además de asegurar que el caudal de aire sea conducido a las escotillas de las celdas de secado con la velocidad y volumen necesarios para que los tiempos de secado disminuyan, así como la demanda térmica de la operación.

En cuanto a medidas de uso eficiente de la energía, se encontraron dos escenarios en los que podría existir un potencial de mejora en el desempeño energético del sistema. El primero está enfocado a las pérdidas de calor que tienen lugar cuando la temperatura ambiente es menor a la del interior de la celda de secado, existiendo pérdidas por efecto de convección y radiación. Este escenario se presenta durante las noches, donde las temperaturas mínimas registradas son de 9 [°C]. Para ello, se podría plantear el proyecto de implementar aislamientos térmicos en las paredes y techos del recinto.

El segundo escenario se presenta durante el día ya que, si bien la diferencia de temperaturas del interior del recinto respecto a la del exterior disminuye, podría disminuir más si existiera algún tipo de precalentamiento del aire de secado o de las mazorcas de maíz previos a su ingreso a las celdas de secado. Si bien la implementación de sistemas de recuperación de calor de aire agotado o usado resulta de mayor utilidad en secadoras de alta temperatura, donde el diferencial de temperatura es de 40 a 60 [°C], sería interesante evaluar la viabilidad de implementar algún sistema de precalentamiento que utilizara energía termosolar que aumente la entalpía del aire ambiente previo a su ingreso a la cámara de combustión, lo que promueva la disminución del consumo de energéticos para el desarrollo de la operación.

Anexos

Memoria de cálculo

Debido a que la cantidad de datos que se obtienen de la utilización de los modelos es muy extensa, se presentan las siguientes tablas que contienen los resultados promedio del contenido de humedad inicial y final de los granos de maíz en cada paso del aire de secado. Además, también incluye el cálculo del calor total demandado por los granos de maíz por cada paso.

Tabla 7 Memoria de cálculo-Marzo

Marzo			
Tiempo	Mo prom	Mf prom	Q [kJ]
1	26.67%	26.07%	826636.58
2	26.07%	25.48%	130435.15
3	25.48%	24.91%	14863.79
4	24.91%	24.37%	1366.80
5	24.37%	23.84%	133.23
6	23.84%	23.33%	38.09
7	23.33%	22.85%	30.69
8	22.85%	22.38%	29.18
9	22.38%	21.93%	28.06
10	21.93%	21.49%	27.00
11	21.49%	21.07%	25.98
12	21.07%	20.67%	24.99
13	20.67%	20.29%	24.05
14	20.29%	19.91%	23.14
15	19.91%	19.56%	22.26
16	19.56%	19.16%	593017.16
17	19.16%	18.77%	83956.69
18	18.77%	18.39%	16531.77
19	18.39%	18.03%	3062.93
20	18.03%	17.68%	718.99
21	17.68%	17.34%	319.89
22	17.34%	17.02%	245.75
23	17.02%	16.71%	225.82
24	16.71%	16.41%	215.33
25	16.41%	16.12%	206.83
26	16.12%	15.84%	198.94
27	15.84%	15.57%	191.41
28	15.57%	15.32%	184.17
29	15.32%	15.07%	177.20
30	15.07%	14.83%	170.50
31	14.83%	14.61%	164.06
32	14.61%	14.39%	157.85
33	14.39%	14.17%	151.88
34	14.17%	13.97%	146.14
35	13.97%	13.77%	140.62
36	13.77%	13.59%	135.30
37	13.59%	13.40%	130.18
38	13.40%	13.23%	125.26
39	13.23%	13.06%	120.53
40	13.06%	12.90%	115.97
41	12.90%	12.74%	111.58
42	12.74%	12.59%	107.37
43	12.59%	12.45%	103.31
44	12.45%	12.31%	99.40
45	12.31%	12.18%	95.64
46	12.18%	12.05%	92.03
47	12.05%	11.93%	88.55
48	11.93%	11.81%	85.20
49	11.81%	11.69%	81.98
50	11.69%	11.58%	78.88
51	11.58%	11.48%	75.89
52	11.48%	11.38%	73.03
53	11.38%	11.28%	70.26
54	11.28%	11.19%	67.61
55	11.19%	11.09%	65.05
56	11.09%	11.01%	62.59
57	11.01%	10.92%	60.22
58	10.92%	10.84%	57.95
59	10.84%	10.76%	55.76
60	10.76%	10.69%	53.65
61	10.69%	10.62%	51.62
62	10.62%	10.55%	49.67
63	10.55%	10.48%	47.79
64	10.48%	10.42%	45.98
65	10.42%	10.36%	44.24
66	10.36%	10.30%	42.57
67	10.30%	10.24%	40.96
68	10.24%	10.19%	39.41
69	10.19%	10.13%	37.92
70	10.13%	10.08%	36.49
71	10.08%	10.03%	35.11
72	10.03%	9.99%	33.78
73	9.99%	9.94%	32.51
74	9.94%	9.90%	31.28
75	9.90%	9.85%	30.09
76	9.85%	9.81%	28.96
77	9.81%	9.78%	27.86
78	9.78%	9.74%	26.81
79	9.74%	9.70%	25.79
80	9.70%	9.67%	24.82

Tabla 8 Memoria de cálculo-Abril

Abril			
Tiempo	Mo promedio	Mf promedio	Qg [kJ]
1	24.50%	23.97%	951395.76
2	23.97%	23.45%	150581.23
3	23.45%	22.95%	17105.75
4	22.95%	22.47%	1568.75
5	22.47%	22.00%	149.61
6	22.00%	21.56%	40.28
7	21.56%	21.13%	31.86
8	21.13%	20.72%	30.21
9	20.72%	20.33%	29.01
10	20.33%	19.95%	27.88
11	19.95%	19.58%	26.79
12	19.58%	19.23%	25.75
13	19.23%	18.89%	24.75
14	18.89%	18.57%	23.78
15	18.57%	18.20%	711574.09
16	18.20%	17.84%	103789.72
17	17.84%	17.49%	20118.43
18	17.49%	17.15%	3747.07
19	17.15%	16.83%	870.52
20	16.83%	16.52%	376.68
21	16.52%	16.22%	285.36
22	16.22%	15.93%	261.08
23	15.93%	15.66%	248.48
24	15.66%	15.39%	238.35
25	15.39%	15.14%	228.97
26	15.14%	14.90%	220.03
27	14.90%	14.66%	211.45
28	14.66%	14.44%	203.20
29	14.44%	14.22%	195.28
30	14.22%	14.01%	187.67
31	14.01%	13.81%	180.35
32	13.81%	13.62%	173.32
33	13.62%	13.43%	166.56
34	13.43%	13.25%	160.07
35	13.25%	13.08%	153.83
36	13.08%	12.92%	147.83
37	12.92%	12.76%	142.07
38	12.76%	12.61%	136.53
39	12.61%	12.46%	131.20
40	12.46%	12.32%	126.09
41	12.32%	12.19%	121.17
42	12.19%	12.06%	116.45
43	12.06%	11.94%	111.91
44	11.94%	11.82%	107.54
45	11.82%	11.70%	103.35
46	11.70%	11.59%	99.32
47	11.59%	11.49%	95.45
48	11.49%	11.38%	91.73
49	11.38%	11.29%	88.15
50	11.29%	11.19%	84.71
51	11.19%	11.10%	81.41
52	11.10%	11.01%	78.24
53	11.01%	10.93%	75.19
54	10.93%	10.85%	72.26
55	10.85%	10.77%	69.44
56	10.77%	10.70%	66.73
57	10.70%	10.63%	64.13
58	10.63%	10.56%	61.63
59	10.56%	10.49%	59.23
60	10.49%	10.43%	56.92
61	10.43%	10.37%	54.70
62	10.37%	10.31%	52.56
63	10.31%	10.26%	50.52
64	10.26%	10.20%	48.55
65	10.20%	10.15%	46.65
66	10.15%	10.10%	44.83
67	10.10%	10.05%	43.09
68	10.05%	10.01%	41.41
69	10.01%	9.96%	39.79

Tabla 9 Memoria de cálculo-Mayo

Mayo			
Tiempo	Mo promedio	Mf promedio	Qg [kJ]
1	16.60%	16.44%	487164.84
2	16.44%	16.26%	76848.71
3	16.26%	16.10%	8692.32
4	16.10%	15.94%	784.93
5	15.94%	15.79%	65.34
6	15.79%	15.64%	10.42
7	15.64%	15.50%	6.53
8	15.50%	15.37%	6.04
9	15.37%	15.24%	5.77
10	15.24%	15.12%	5.52
11	15.12%	15.00%	5.28
12	15.00%	14.89%	5.05
13	14.89%	14.78%	4.83
14	14.78%	14.68%	4.62
15	14.68%	14.58%	4.42
16	14.58%	14.49%	4.22
17	14.49%	14.40%	4.04
18	14.40%	14.24%	391658.72
19	14.24%	14.07%	56924.02
20	14.07%	13.91%	10976.13
21	13.91%	13.76%	1995.51
22	13.76%	13.61%	404.70
23	13.61%	13.47%	124.34
24	13.47%	13.34%	76.06
25	13.34%	13.21%	65.32
26	13.21%	13.09%	61.18
27	13.09%	12.97%	58.27
28	12.97%	12.86%	55.69
29	12.86%	12.75%	53.25
30	12.75%	12.65%	50.93
31	12.65%	12.55%	48.71
32	12.55%	12.46%	46.59
33	12.46%	12.37%	44.55
34	12.37%	12.29%	42.61
35	12.29%	12.20%	40.76
36	12.20%	12.13%	38.98
37	12.13%	12.05%	37.28
38	12.05%	11.98%	35.65
39	11.98%	11.91%	34.10
40	11.91%	11.85%	32.61
41	11.85%	11.78%	31.19
42	11.78%	11.72%	29.83
43	11.72%	11.67%	28.53
44	11.67%	11.61%	27.29
45	11.61%	11.56%	26.10
46	11.56%	11.51%	24.96
47	11.51%	11.46%	23.87
48	11.46%	11.42%	22.83
49	11.42%	11.37%	21.84
50	11.37%	11.33%	20.88
51	11.33%	11.29%	19.97

Bibliografía

1. ASABE Standards. (2014). *Psychrometric Data*. Michigan, Estados Unidos. ASABE
2. Arun S, M. (2006). *Handbook of Industrial Drying*. *Drying Technology*, 6(3), 571-573. <https://doi.org/10.1080/07373938808916399>
3. Average Weather. (s.f.) Average Weather: Zapopan. [Base de datos meteorológicos] Recuperado de: <https://www.average-weather.com/es/norteam%C3%A9rica/m%C3%A9xico/jalisco/zapopan/>
4. Bartosik, R. (2007). *Secado en Silo con Aire Natural o Baja Temperatura*. ETA INTA Balarce
5. Bahadori, A. (2016). *Essentials of Oil and Gas Utilities- Process Design, Equipment and Operations*. Gulf Professional Publishing.
6. Bakker–Arkema, F. W., L. E. Lerew, S. F. DeBoer, and M. G. Roth. (1974). Grain drying simulation. Reporte de investigación 224. Michigan State University.
7. Castro Zárate, Y. (2018). *Secado de semillas para su mejor conservación y vitalidad*. (Tesis de licenciatura). Instituto Politécnico Nacional
8. Caro, Axel. (1998). *Breves normas de control de calidad en granos almacenados*. Poscosecha y Mercadeo.
9. Chen, C. y R. V. Morey. (1989). *Comparison of four EMC/ERH equations*. *Trans. ASAE* 32(3): 983-990
10. Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinámica* (Vol. 7).
11. C., R. M. M. (1994). *Secado de maíz grano: Comportamiento de un secador de cama fija de convección forzada*. Investigación y Progreso Agropecuario La Platina
12. De Dios. C.A. (1996). *Secado de Granos y Secadoras*. Chile. FAO.
13. De la Torre, Diego. (2010). *Estudio de la demanda energética del secado de maíz en argentina*. Tesis de maestría. Instituto Nacional de Tecnología.
14. SADER. (2019) *¿Qué es la poscosecha y por qué es importante?* <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/que-es-la-poscosecha-y-por-que-es-importante> [Consultado el 23 de febrero del 2021].
15. SENER. (2019). *Balance Nacional de Energía*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/528054/Balance_Nacional_de_Energia_2018.pdf [Consultado el 21 de febrero del 2021].

16. SIE. (2018). Sistema de Información Energética. <http://sie.energia.gob.mx/> [Consultado el 20 de febrero del 2021].
17. SNICS. (2017). *¿Qué es el análisis de vigor de la semilla?* <https://www.gob.mx/snics/articulos/que-es-el-analisis-de-vigor-de-la-semilla?idiom=es> [Consultado el 27 de Febrero del 2021].
18. Sharaf–Eldeen, Y. I, J. L. Blaisdell y M. Y. Hamdy. (1980). *A model for ear corn ear corn drying*. ASAE
19. M. De Lucía y D. Assennato, (1993). *La ingeniería en el desarrollo- Manejo y tratamiento de granos poscosecha*. FAO, <http://www.fao.org/3/x5041s/x5041S00.htm#Contents> .
20. FAO. (2019). *Materiales para capacitación en semillas - Módulo 6: Almacenamiento de semillas*. Roma.
21. FAO. (1993). *El maíz en la nutrición humana*. FAO: Alimentación y nutrición
22. Pita, José Manuel. Pérez, Félix. (1998). *Germinación de Semillas*. Madrid, 24-28. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/30898/NR15903.pdf?sequence=1>
23. T. L. Thompson, & R. M. Peart and G. H. Foster. (1968). *Mathematical Simulation of Corn Drying – A New Model*. *Transactions of the ASAE*, 11(4), 0582–0586. <https://doi.org/10.13031/2013.39473>
24. Urbán, S. S. (2019). *Modelamiento matemático del secado de manzana Golden Delicious por radiación infrarroja*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México.
25. McCabe, W. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. McGraw Hill. 7ma ed.
26. Rodriguez, J., & Bartosik, R. (2006). *Secado de granos*. Proyecto de Eficiencia de Cosecha y Post-Cosecha, 4. <http://www.cosechaypostcosecha.org/data/folletos/FolletoSecadoGranos.pdf> [Consultado el 10 de Marzo del 2021]
27. VadeQuímica.(s.f.). *Quimipedia*. Recuperado de: <https://www.vadequimica.com/quimipedia/h/higroscopico/#:~:text=Sustancia%20capaz%20de%20absorber%20humedad,el%20agua%20de%20otros%20compuestos.&text=El%20cloruro%20c%C3%A1lcico%2C%20cloruro%20de,son%20ejemplos%20de%20compuestos%20higrosc%C3%B3picos>. [Consultado el 26 de Marzo del 2021]
28. Vician, P., Palacka, M., Holubčík, M., & Jandačka, J. (2016). Effect of external temperature on performance of bin dryer. AIP Conference Proceedings,

- 1745(June). <https://doi.org/10.1063/1.4953758>
29. González, G. Y. J. (2016). Evaluación del riesgo de la calidad física de los granos de maíz (*Zea mays* L.) en las rectorías nacionales. Universidad Central de Venezuela.
 30. Raghavan V.G.S, Sosle V. (2006). *Handbook of Industrial Drying: Grain Drying* 571-573. <https://doi.org/10.1080/07373938808916399>
 31. Hall, C.W.(1980). *Drying and Storage of Agricultural Crops*, AVI Publishing Company, Inc., Westport, Connecticut
 32. Facultad de Ingeniería de la Univerisdad de Buenos Aires. (s.f.). Recuperado de: <http://materias.fi.uba.ar/6713/difusion-repaso.pdf>. [Consultado el 29 de Marzo del 2021]
 33. Friant, R.N. (2002). *Drying rate for individual ears of corn*. (Tesis de maestría). Michigan State University.
 34. Wark, K., & Richards, D. E. (2001). *Termodinámica* (6ta ed.). McGraw Hill.
 35. García González, F. E. (2014). *Determinación experimental de propiedades termofísicas de un material orgánico de cambio de fase y simulación computacional del proceso de carga y descarga en un dominio cilíndrico*. Univerisdad del Bío-Bío.
 36. Moran, M. J., & Shapiro, H. N.-. (2018). *Fundamentos de Termodinámica Técnica* (Vol. 4th). Editorial Reverté.
 37. Jindal, V. K., & Siebenmorgen, T. J. (1994). *Simulation of low temperature rough rice drying and rewetting in shallow beds*. Trans. ASAE, 37(3), 863-871. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.28152>.

Referencias de imágenes

1. Arun S., A. S. M. (2006). Curva típica de tasa de secado a condiciones de secado constante [Gráfico]. En *Handbook of Industrial Drying* (3.a ed.)