

Sistema para producir harina nixtamalizada con transporte de bajo cizallamiento

Jorge Ortega-Moody, Eduardo Morales-Sánchez, Miguel Ángel Hernández-Román, Maximiano Ruiz-Torres.
Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Querétaro IPN
Cerro Blanco 141, Querétaro, Qro. México 76090

Resumen

La tortilla es el alimento más consumido en México y se produce a partir de masa obtenida por el proceso tradicional de nixtamalización. Este método tiene dos inconvenientes: el primero es la cantidad de agua contaminada que genera (nejayote); el segundo, son los tiempos perdidos, ya que la producción es por lotes. Como consecuencia, se han desarrollado métodos continuos que se basan principalmente en la extrusión. Mediante la extrusión con calor, el producto se convierte en un fluido pseudoplástico debido a que el cocimiento se realiza mientras éste se somete a cizallamiento en el transporte. Esto provoca que la viscosidad de la harina se altere. Debido a este inconveniente, en esta investigación, se presenta un sistema que transporta y cuece harina cruda de maíz con ciertas cantidades de agua y cal para obtener harina nixtamalizada. Las etapas de transporte y cocimiento se realizan por separado y en condiciones de bajo cizallamiento. La etapa de transporte cuenta con un tornillo de bajo cizallamiento, el que a su vez está acoplado al cocedor rectangular mediante un convertidor de geometría. El cocedor rectangular se diseñó de acuerdo a las propiedades térmicas y reológicas de la harina de maíz. Como resultado, la geometría obtenida favorece al cocimiento y ofrece un flujo laminar para disminuir el cizallamiento durante el cocimiento.

Abstract

The tortilla is the most widely consumed food product in Mexico and is produced through the traditional process of Nixtamal. This method has two down-sides: the first is the amount of contaminated water that the process generates (Nejayote); the second is the time loss generated by a batch-based production system. As a possible solution to this various methods have been developed that are based principally in extrusion. Through heat extrusion the product is converted in a fluid pseudo-plastic due to the fact that the product is being cooked at the same time as it is being sheared and transported. This causes the viscosity of the cornmeal to be altered. In response to this problem, this investigation presents a system that transports and cooks cornmeal with specific quantities of water and calcium in order to obtain the nixtamal. The stages of transport contain a low shear screw that is connected to the rectangular oven by way of a geometric adapter. The rectangular oven was designed according to the rheological and thermal properties of the cornmeal. Consequently, the geometry obtained suits the cooking process and offers a laminate flow in order to diminish the amount of shearing during the cooking process.

Palabras clave:

Proceso de nixtamalización, bajo cizallamiento, diseño mecánico, harina de maíz nixtamalizada, simulación.

Keywords:

Nixtamal process, low shear, mechanical design, cornmeal, simulation.

Introducción

El maíz es el tercer cereal de mayor consumo a nivel mundial y el que más se consume en México, Financiera Rural, siendo la tortilla el producto de mayor consumo. El proceso para producir masa para tortillas, botanas y harinas de maíz se denomina nixtamalización, que significa cocimiento del maíz con cal (nixtli cal de cenizas y tamalli masa de maíz cocida). Este proceso tradicional es utilizado por 12,000 molinos y por 54,000 tortillerías en México. Cabe mencionar que en las grandes urbes como en la ciudad de México, la nixtamalización es un problema ambiental, pues genera grandes cantidades de efluentes contaminantes (nejayote) que se canalizan al drenaje.

Se han desarrollado métodos alternos de cocimiento para producir masa nixtamalizada que disminuyen y/o eliminan este problema. Por ejemplo, Duran de Bazúa, C. Guerra R. y Sterner H., desarrollaron un método de extrusión para producir masa en el que se aplica solamente la humedad necesaria

para convertir la harina de maíz a nixtamal; Sánchez-Sinencio F, González-Hernández J, Martínez-Montes J. L., Martínez-Bustos F, Figueroa, J. D. C., y Ruiz-Torres M., han reportado procesos y equipos para obtener masa de maíz nixtamalizada basados en extrusión y cocimiento infrarrojo; Figueroa J. D., Morales-Sánchez E, González-Hernández J. y Arambula-Villa J. (2002), Figueroa J. D., Martínez, B. F., González, H. J. y Sánchez, S. F. (1994); Figueroa J.D., Martínez B.F., González H.J., Sánchez S.F., Martínez J.L. y Ruiz M.T. (1993), han desarrollado procesos ecológicos para obtener masa de maíz nixtamalizada; Martínez Montes J, Sánchez Sinencio F, Martínez Bustos F. y Ruiz Torres M. (2001), construyó una planta de obtención de harina de maíz utilizando un método basado en reactores de vapor y otro de cocimiento empleando radio frecuencia (RF); y Vaqueiro M. C. y Reyes P., patentaron un proceso de nixtamalización basado en la separación de las partes del maíz.

La mayoría de los métodos y equipos desarrollados para producir harina nixtamalizada, que utilizan un tornillo transportador, se tomaron de la extrusión de plásticos principalmente. Una desventaja del proceso de extrusión es la cantidad de trabajo mecánico que se aplica al material mientras se está cociendo. Este trabajo mecánico produce esfuerzo de corte o cizalla en el material causado por la velocidad de corte o cizallamiento.

En el caso de la harina nixtamalizada, por ser un fluido pseudoplástico, Figura 1, la viscosidad dinámica disminuye conforme la velocidad de corte aumenta. Valores de viscosidad bajos producen una masa de mala calidad para producir tortillas. Este fenómeno ocurre cuando el material es transportado dentro del tornillo al mismo tiempo que se está cociendo, Figura 2. Estos cambios reológicos provocan que el material sea difícil de procesar (troquelar) en las máquinas tortilladoras. Por esta razón, la extrusión no ha podido sustituir al proceso tradicional en la producción de masa de maíz nixtamalizada para elaborar tortillas. Sin embargo, la extrusión tiene grandes ventajas, siendo éstas: es ecológico, porque solo utiliza el agua necesaria; es más eficiente energéticamente en comparación con el método tradicional que utiliza gas; y disminuye significativamente el tiempo de procesamiento.

Con base en lo anteriormente expuesto, se propone el desarrollo de un sistema con transporte de cizallamiento bajo (STBC) para elaborar harina nixtamalizada. El término cizallamiento bajo se refiere a no dar trabajo mecánico a la harina de maíz mientras se cuece. Esto se logra si durante el cocimiento la velocidad de corte es menor que 10 s^{-1} , ya que en este rango la viscosidad no presenta alteraciones significativas mientras que a velocidades mayores de 10 s^{-1} , la viscosidad empieza a decaer Bello-Pérez L., Osorio-Díaz P., Agama-Acevedo E., Núñez-Santiago C. y Paredes-López O. (2002).

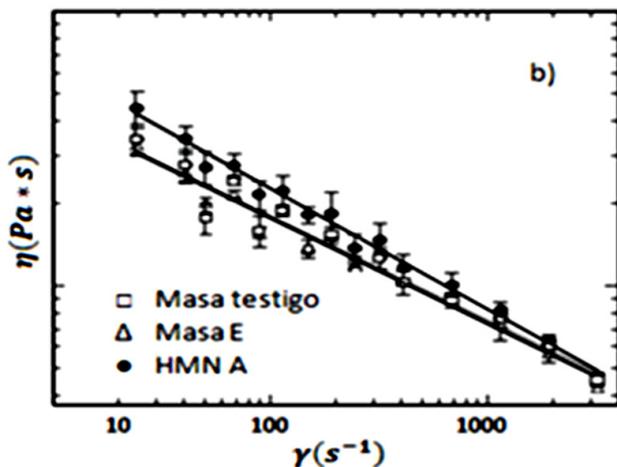


Figura 1. Comportamiento pseudoplástico de la harina de maíz nixtamalizada, Bello-Pérez L., Osorio-Díaz P., Agama-Acevedo E., Núñez-Santiago C. y Paredes-López O. (2002).

Para disminuir el cizallamiento se propone separar la etapa de cocimiento de la de transporte. En esta última, es donde el tornillo genera el corte a causa de la rotación y del flujo turbulento contenido dentro del extrusor. El transportador debe acoplarse con la geometría del cocedor y conservar la

misma área transversal para no generar cambios de presión y velocidad.

La geometría del cocedor es determinante para obtener un cizallamiento bajo. Dentro de éste debe existir un flujo laminar para disminuir la velocidad de corte y permitir un cocimiento rápido.

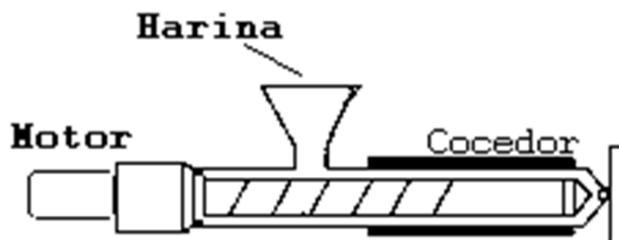


Figura 2. Proceso continuo con extrusor.

Metodología.

La metodología empleada en el diseño es la que se observa en la Figura 3. En donde se inicia con una serie de especificaciones del proceso para que posteriormente se realice el diseño conceptual del cocedor. Posteriormente se realizan simulaciones para comparar y validar los resultados obtenidos del diseño conceptual. Una vez encontrada la geometría que cumpla con las especificaciones iniciales, se procede al dibujo a detalle para su fabricación. Para finalizar, se validan los datos obtenidos tanto de la simulación, los conceptuales y los reales.

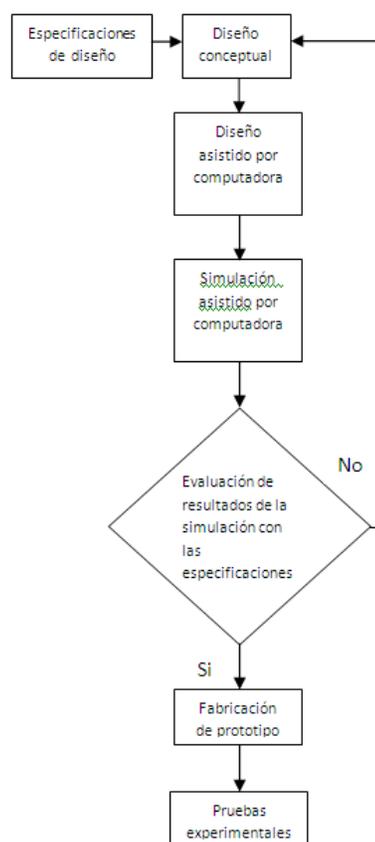


Figura 3. Metodología de diseño.

a) Diseño conceptual.

Para realizar la modelación del diseño, es necesario determinar las especificaciones de la máquina. Así mismo, es importante conocer el material a procesar para determinar el modo y rangos de operación. En la Tabla 1, se muestran las características reológicas del material a procesar, Harper Judson M. (1981) (Harina de maíz) y en la Tabla 2, se muestran las temperaturas de gelatinización de la harina de maíz. La transferencia de calor en el cocedor es regida por las constantes termodinámicas del material listadas en la Tabla 3.

Tabla 1. Constantes reológicas de alimentos para el modelo de la ley de potencia [10].

Material	Humedad %	Temp. °C	k Pa*s	n
Granos de maíz	13	177	2.8×10^4	0.45-0.55
	13	193	1.7×10^4	
	13	207	0.76×10^4	
Pasta de soya	15-30	120	3.44×10^3	0.3
Alimentos húmedos	35	95	2.2×10^2	0.78
Harina de maíz pre gelatinizada	32	88	1.72×10^4	0.34
Emulsión de salchicha	63	15	4.3×10^2	0.21
Harina de semolina	30	45	2.0×10^4	0.5
Granos de soya	22	160	6.7×10^2	0.75
	25	160	2.9×10^2	0.65
	32	100	2.88×10^4	0.19
	32	130	2.86×10^4	0.18
	32	160	1.78×10^4	0.16
Harina de trigo	43	33	4.45×10^3	0.35

Tabla 2. Rangos de gelatinización, Bello-Pérez L., Osorio-Díaz P., Agama-Acevedo E., Núñez-Santiago C. y Paredes-López O. (2002).

Muestra	Temperatura gelatinización °C	Entalpia de gelatinización J/g
Masa testigo	78.1 ± 0.7	14.7 ± 1.0
Masa: A	73.8 ± 0.2	10.0 ± 0.7
	74.3 ± 0.3	7.9 ± 0.4
	73.2 ± 0.2	6.8 ± 0.3
	75.2 ± 0.3	6.3 ± 0.4
	75.3 ± 0.4	8.3 ± 0.3
	73.1 ± 0.2	7.2 ± 0.4
	76.5 ± 0.8	5.5 ± 0.8
	76.0 ± 0.2	9.5 ± 0.7
	76.3 ± 0.5	8.8 ± 1.0
	78.0 ± 0.2	9.5 ± 0.7
HMN: A	73.6 ± 0.3	2.3 ± 0.2
	70.7 ± 0.7	3.9 ± 0.4

De acuerdo a la información anterior, se concluye que la temperatura del material a la salida del cocedor debe de estar en el rango de 70 °C a 78 °C. Además, la temperatura de las paredes del cocedor no debe sobrepasar los 100 °C, ya

que la humedad del material se puede evaporar y formar bolsas de vapor dentro del cocedor.

Tabla 3. Constantes termodinámicas de harina de maíz, Machado-Velazco K.M. y Vélez-Ruiz J.F., (2008).

Producto	k exp (W/m°C) Fco/Cong	Cp (W/m°C) Fco/Cong	α (m²/s) Fco/Cong	k calc (W/m°C) Fco/Cong
Nopal	0.48/1.59	3.91/0.85	$(1.2/0.85) \times 10^{-1}$	0.58
Masa de tortilla	0.40/1.12	2.64/0.85	$(1.4/5.0) \times 10^{-1}$	0.42
Pellizcada	0.37/0.42	2.17/0.84	$(1.7/2.0) \times 10^{-1}$	0.35
Nogada	0.49/1.02	2.72/0.86	$(1.7/4.0) \times 10^{-1}$	0.48
Tamal	0.33/0.51	2.44/0.85	$(1.3/2.0) \times 10^{-1}$	0.39
Chile poblano	0.40/1.40	3.84/0.85	$(1.1/4.0) \times 10^{-1}$	0.57
Queso Oaxaca	0.41/0.37	2.37/0.84	$(1.4/3.0) \times 10^{-1}$	0.38
Puré de mamey	0.45/0.82	2.99/0.85	$(1.4/3.0) \times 10^{-1}$	0.46
Pan de hojaldra	0.07/0.06	1.66/0.84	$(1.6/0.4) \times 10^{-1}$	0.28
Pasta de mole	0.17/0.26	0.56/0.84	$(2.5/5.0) \times 10^{-1}$	0.13

El rendimiento propuesto para el diseño del cocedor es de 1.5 kg/h. y un área transversal de 0.001 m² como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de diseño del cocedor.

Parámetro	Valor
Flujo másico	1.5 kg/h
Temperatura en la superficie interna del cocedor	80°C
Temperatura del material en el centro del cocedor	76.5°C
Temperatura del material en la entrada del cocedor	30°C

La geometría empleada para el cocedor es rectangular como se muestra en la Figura 4. Esta configuración es idónea para el proceso debido a que tanto la entrada como la salida son iguales y no existen cambios de presiones o velocidades internas. Otro beneficio de esta configuración es la obtención del material en forma de lámina, lo que reduce la cizalla.

Otra característica de esta geometría es la flexibilidad que se tiene al variar sus dimensiones conservando la misma área transversal. El beneficio de disminuir la dimensión x, es obtener una menor distancia entre la pared del cocedor y el centro del material. Esto permite que el tiempo de cocimiento y la longitud sean menores. La desventaja de reducir la dimensión x es el incremento de la velocidad de corte por lo que se buscan dimensiones que cumplan con longitud pequeña para tiempos de cocimiento rápidos pero con bajo cizallamiento.

Para poder determinar las dimensiones es necesario caracterizar al cocedor utilizando ecuaciones termodinámicas de transferencia de calor con flujo interno forzado a

temperatura superficial constante como se muestra en la Figura 5.

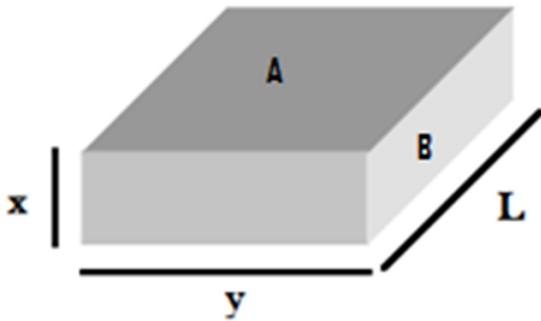


Figura 4. Dimensiones del cocedor rectangular.

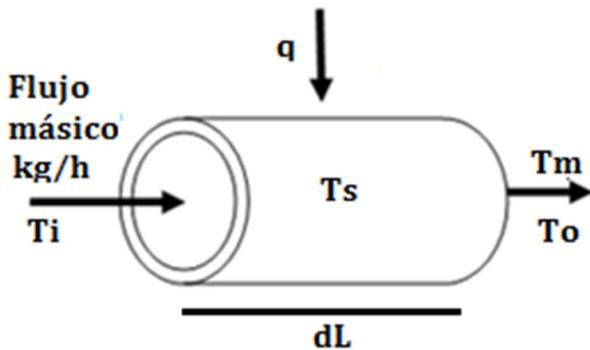


Figura 5. Transferencia de calor por convección.

Al aplicar la ley de la conservación de energía se obtiene:

$$E_{entra} = E_{Sale} \quad (1)$$

$$h(T_s - T_m)P_{er} dL = \dot{m} C_p dT_m \quad (2)$$

Donde T_m es la temperatura del material en el centro del cilindro, P_{er} es el perímetro del cilindro, L es la longitud del cilindro, \dot{m} es el flujo másico, C_p es el calor específico y h el coeficiente de transferencia de calor por convección.

Despejando (2) se obtiene:

$$\frac{dT_m}{dL} = \frac{h(T_s - T_m)P_{er}}{\dot{m}C_p} \quad (3)$$

Esta expresión permite determinar la variación axial de T_m . Si $T_s > T_m$ se transfiere calor de la superficie del ducto hacia el fluido y T_m aumenta con la distancia transcurrida L . Al definir como condición de frontera de temperatura superficial (T_s) constante, se sustituye ΔT por $T_s - T_m$, se obtiene:

$$\frac{dT_m}{dL} = \frac{-d\Delta T}{dL} = \frac{h(\Delta T P_{er})}{\dot{m}C_p} \quad (4)$$

Al separar variables e integral desde ΔT_i a ΔT_o a través de todo el ducto desde $L=i$ a $L=0$, se obtiene:

$$\int_{\Delta T_i}^{\Delta T_o} \frac{d\Delta T}{\Delta T} = -\frac{P_{er}}{\dot{m}C_p} \int_0^L h dx \quad (5)$$

$$Ln \frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = -\frac{P_{er}}{\dot{m}C_p} h L \quad (6)$$

Despejando se obtiene:

$$\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = \frac{T_s - T_{m,o}}{T_s - T_{m,i}} = \exp\left(-\frac{P_{er}}{\dot{m}C_p} h L\right) \quad (7)$$

Donde $T_{m,i}$ y $T_{m,o}$ son las temperaturas en el centro del cilindro a la entrada y salida respectivamente.

La ecuación (7) describe la transferencia de calor por convección de un fluido a través de un ducto con cierto flujo másico. Debido a que la constante de convección h varía dependiendo de la geometría del cocedor, es necesario utilizar una correlación con un número de Nusselt. Puesto que la harina nixtamalizada es un fluido pseudoplástico y se pretende tener un flujo laminar dentro de un ducto, se propone el Nusselt para fluidos no-newtonianos con viscosidad variable, Sieder E.N., Tate C.E. (1936), como se muestra a continuación:

$$N_{nd} = \frac{hD}{k} = 1.86 \left(\frac{N_{Rey} N_{Pra}}{L/D} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{1.4} \quad (8)$$

Donde D es el diámetro del cilindro, k es el coeficiente de transferencia de calor por conducción, μ es la viscosidad a la salida, μ_s es la viscosidad promedio, N_{Rey} es el número de Reynolds y N_{Pra} es el número de Prandtl.

Despejando en (7) y (8) el coeficiente de convección e igualándolas, se obtiene:

$$L = \left(\frac{Ln \left(\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} \right) \dot{m} C_p D^{2/3}}{1.86 k P_{er} (N_{Rey} N_{Pra})^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{1.4}} \right)^{3/2} \quad (9)$$

La ecuación (9) es para ductos cilíndricos. Para obtener el equivalente en rectangulares, se sustituye el diámetro D por el diámetro hidráulico de un ducto rectangular:

$$D_h = \frac{2(xy)}{x+y} \quad (10)$$

Donde x es el alto del rectángulo y y el ancho.

Sustituyendo (10) en (9), se obtiene:

$$L = \left(\frac{Ln \left(\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} \right) \dot{m} C_p \left(\frac{2(xy)}{x+y} \right)^{2/3}}{1.86 k 2y (N_{Rey} N_{Pra})^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{1/4}} \right)^{3/2} \quad (11)$$

La ecuación (11) está en función de las dimensiones del cocedor, sustituyendo las propiedades termodinámicas del material y las especificaciones de diseño, se obtiene la gráfica de la Figura 6.

La selección de las dimensiones está regida por la longitud del cocedor, la presión y la fabricación del cocedor. Mientras más pequeño sea x , mayor será y , menor la longitud y mayor la velocidad de corte. Además, la longitud y presión es afectada si se calientan dos o las cuatro superficies del cocedor. Si se calientan solamente las superficies A (Figura 4), la longitud aumenta debido a que la superficie de contacto caliente es menor y el material requiere de un mayor tiempo de residencia. Esto afecta de igual forma a la presión, ya que si existe un aumento de longitud, mayor debe de ser la presión requerida por el cocedor. Sin embargo, el calentar solamente las superficies A hacen que el diseño e implementación de las resistencias eléctricas para calentar sea factible.

Por razones mencionadas en el párrafo anterior, se graficaron estas variables y se determinó una x lo suficientemente pequeña para tener una longitud de cocedor corta pero con dimensiones con las que se pueda tener un mejor maquinado, una velocidad de corte menor y una mejor implementación.

La línea (c) en la gráfica de la Figura 6, representa la intersección entre el ancho y el alto del rectángulo, esto significa que los dos lados son iguales con dimensiones de $x = y = 0.30$ m. En esta dimensión x , la presión y la longitud llegan a su máximo y empiezan a disminuir hasta que y tiende a cero si se calentaran las cuatro superficies. Si se calientan solamente las superficies A, la velocidad de corte decae, sin embargo, la longitud y presión aumentan de forma exponen-

cial por lo que se sugiere seleccionar las dimensiones x, y a la izquierda de este punto.

La línea (a) representa varios tipos de intersecciones, se observa que a la izquierda de esta línea, la longitud no es afectada si el calentamiento se realiza en dos o en las cuatro superficies. Además, la presión decrece a la izquierda lo que favorece al sistema, sin embargo, la velocidad de corte aumenta exponencialmente por lo que se sugiere seleccionar dimensiones a la derecha de esta línea.

Por cuestión de fabricación, se seleccionó la línea (b), ya que las dimensiones de x, y y la longitud son valores cerrados de $x=0.01$ m, $y=0.1$ m y una longitud de 0.2 m. Además, en esta línea, la longitud y la presión no se ven afectadas significativamente si el calentamiento ocurre en dos o las cuatro superficies. Otro aspecto favorable en esta línea es la velocidad de corte, la cual es menor que en la línea (a). Por estas razones, el cocedor se dimensiona de acuerdo a esta selección.

De acuerdo con la gráfica anterior, las dimensiones para el diseño son:

$$\begin{aligned}x &= 0.01 \text{ m.} \\y &= 0.1 \text{ m.} \\L &= 0.2 \text{ m.}\end{aligned}$$

A modo de corroborar que el flujo sea laminar dentro del cocedor con las dimensiones obtenidas, se estima el número de Reynolds de la ecuación (12).

$$N_{Re} = \frac{DVel\rho}{\mu} \quad (12)$$

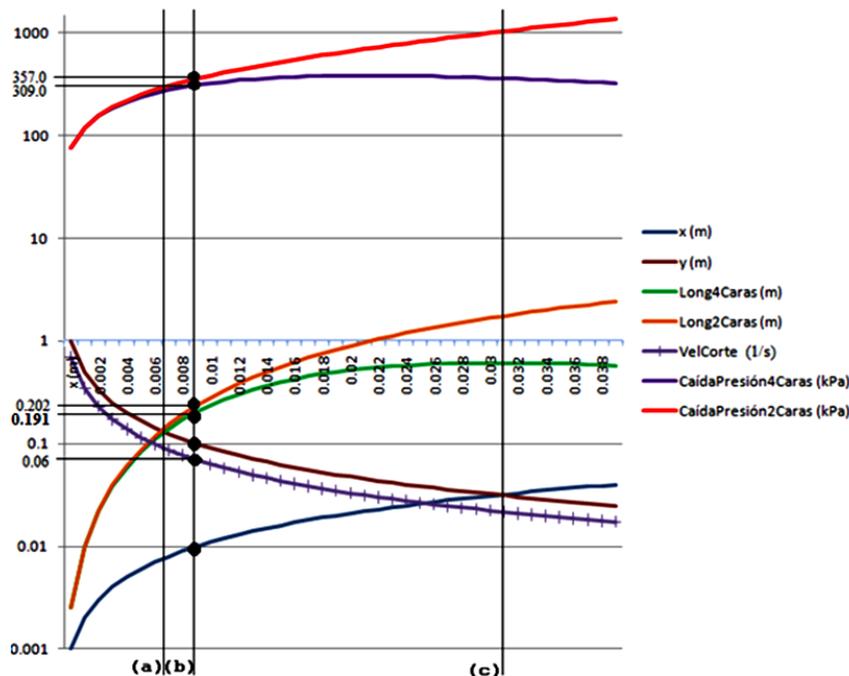


Figura 6. Gráfica de dimensiones de cocedor rectangular.

Donde D es el diametro del ducto, Vel es la velocidad del flujo, ρ es la densidad del fluido y μ es la viscosidad.

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$N_{Re} = \frac{(0.0182m) \left(\frac{3.46 \times 10^{-4} m}{seg} \right) \left(1204 \frac{Kg}{m^3} \right)}{216.18 N \cdot seg / m^2}$$

$$N_{Re} = 3.4944 \times 10^{-5}$$

El número de Reynolds es menor a 2100 en gran medida por lo que se concluye que el flujo es laminar.

En el diseño del cocedor se estima que el material tenga cierta temperatura fija a la entrada (30 centígrados), en la realidad, esta temperatura va a variar dependiendo del medio ambiente y la temperatura del agua con que se mezcle. Para estos casos es necesario variar la temperatura del cocedor en un rango y así compensar la temperatura para que a la salida siempre se obtenga material con 76.5 centígrados. Esta regulación la realiza la parte de control. A continuación se grafica (ver Figura 7) el rango de variación de temperatura del cocedor que va de desde 77.3 a 82.3 centígrados cuando se presente variación en la temperatura de entrada del material en un rango de 15 a 65 centígrados con una longitud del cocedor de 0.2 m y un rendimiento de 1.5 kg/h.

En esta gráfica se trazan las especificaciones de diseño como flujo másico a 1.5 kg/h, temperatura a la salida del material de 76.5 centígrados y se varían las temperaturas de entrada del material y del cocedor tomando en cuenta las dimensiones de $x = 0.01$ m y de $y = 0.1$ m.

Una vez obtenida las dimensiones, es necesario estimar la velocidad y esfuerzo de cizalla o corte sustituyendo los pará-

metros reológicos del material de la Tabla 1 en las ecuaciones (12) y (13) respectivamente.

$$Vel.Corte = \frac{du}{dy} \tag{12}$$

Donde u es la velocidad promedio del flujo y y es la altura del ducto.

$$Vel.Corte = \frac{3.46 \times 10^{-4} m / seg}{(0.01m / 2)}$$

$$Vel.Corte = 0.06 s^{-1}$$

$$Esfuerzo = \tau = K \left(\frac{du}{dy} \right)^n \tag{13}$$

Donde τ es el esfuerzo de corte, K y n son los índices de consistencia y flujo respectivamente.

$$\tau = \left(17200 Ns^{0.34} / m^2 \right) \left(\frac{3.46 \times 10^{-4} m / seg}{(0.01m) / 2} \right)^{0.34}$$

$$\tau = 6937.35 Pa$$

Esta velocidad de corte satisface a los requerimientos de diseño puesto que es menor a $10 s^{-1}$. Se prosigue a estimar la fuerza de corte. Esta fuerza está definida como el esfuerzo por el área superficial de contacto con el fluido como se muestra en la ecuación (14).

$$F_{corte} = \tau * (2 * (x / y) * L) \tag{14}$$

$$F_{corte} = (6937.35 Pa) * (2 * (0.01 + 0.1) * 0.20 m)$$

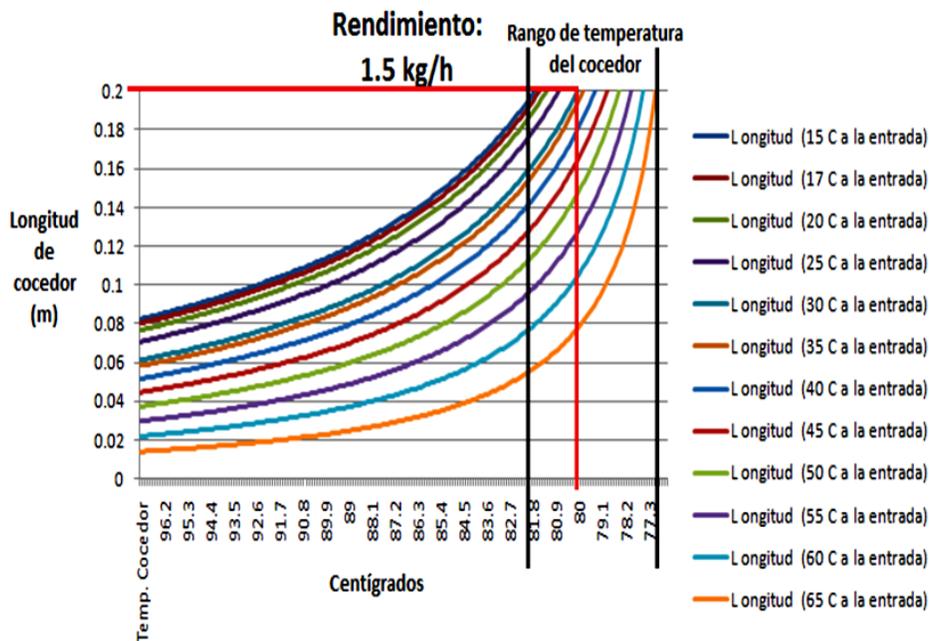


Figura 7. Rangos de temperatura de entrada.

$$F_{corte} = 305.24N.$$

Para concluir con los valores teóricos se estima, por medio de la ecuación (15), la presión que se requiere para bombear el material a través del cocedor.

$$\Delta P = \frac{4\tau_s L}{Dh} \quad (15)$$

$$\Delta P = \frac{4 * 693.35 Pa * 0.2m}{0.0182m}$$

$$\Delta P = 309.0 KPa$$

b) Diseño Asistido por Computadora.

El diseño mecánico asistido por computadora o CAD (computer-aided design) por sus siglas en ingles, se desarrolló en SolidWorks 2009 con las siguientes dimensiones.

$$x = 0.01 \text{ m.}$$

$$y = 0.1 \text{ m.}$$

$$L = 0.2 \text{ m.}$$

A continuación en la Figura 8 se muestra la vista isométrica del cocedor y en la Figura 9 el dibujo a detalle con dimensiones en milímetros.

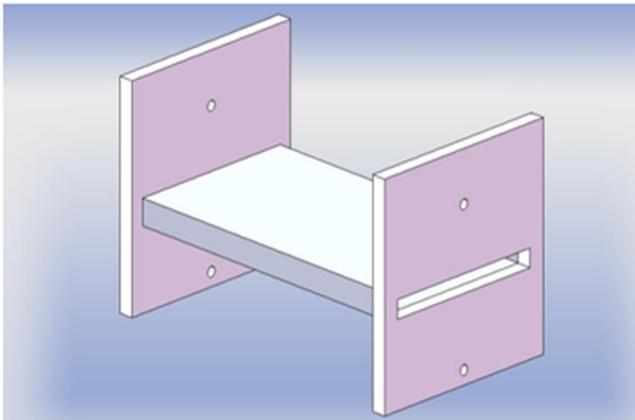


Figura 8. Vista isométrica.

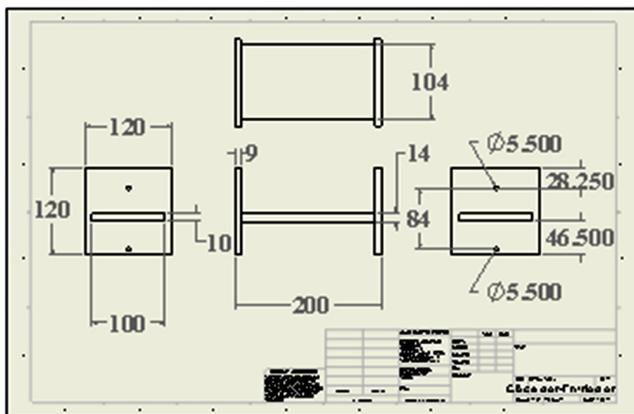


Figura 9. Dibujo a detalle del cocedor.

Una vez obtenido el modelo del cocedor, se propone el diseño de aisladores a la entrada y salida del cocedor. La principal función de los aisladores es el de impedir que el calor suministrado por las resistencias eléctricas se difunda a la etapa anterior de transporte. De esta forma se asegura que la longitud de cocimiento sea solamente en el cocedor. La segunda función del aislador es la de fijar termopares para censar la temperatura del material a la entrada y salida. Se empleó el software SolidWorks 2009 y se obtuvo el diseño en CAD (ver Figura 10).

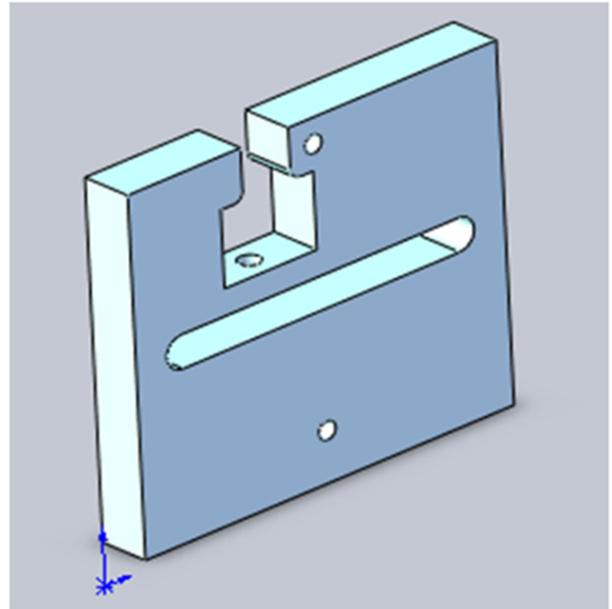


Figura 10. CAD del aislador.

El último elemento que conforma el sistema es el extrusor de bajo cizallamiento. Actualmente se cuenta con este extrusor y se localiza en el CICATA-IPN unidad Querétaro por lo que no se presenta detalles del diseño. El CAD del STBC se observa en la Figura 11.

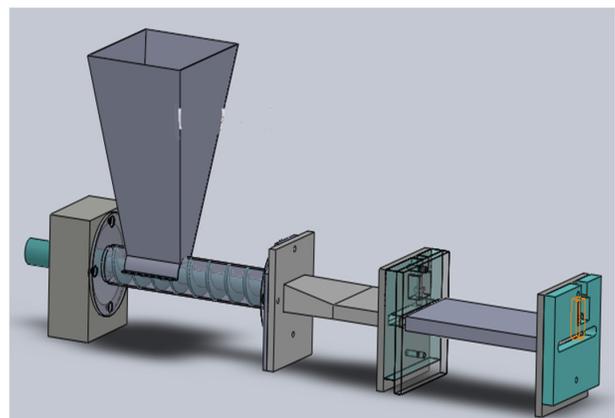


Figura 11. CAD del prototipo STBC.

c) Simulación.

Para esta simulación se utilizó la herramienta Flow Simulation del SolidWorks 2009.

Para poder simular un fluido dentro de un ducto, es necesario crear ese fluido en el software mediante las propiedades termodinámicas y reológicas que se muestran en la Tabla 5. Así mismo, es necesario asignar el tipo de material con el que está hecho el cocedor, en este caso acero inoxidable, y las condiciones de frontera para la simulación como se observan en la Tabla 6.

Tabla 5. Modelo reológico de la harina de maíz para simulación.

Propiedad	Valor
Tipo de fluido.	No-newtoniano
Densidad.	1204 kg/m ³
Calor específico.	3411 J/kg*K
Conductividad térmica.	0.51545 W/m*K
Viscosidad	Modelo de ley de la potencia
Índice de consistencia.	17200 Pa*s
Índice de flujo	0.34

Tabla 6. Condiciones de simulación.

Parámetro	Valor
Condición de frontera.	Adiabática
Presión de salida.	101 325 Pa
Temperatura de entrada en el fluido.	30 °C
Flujo másico de Entrada.	1.5 kg/h
Temperatura constante del cocedor.	80 °C
Material del cocedor.	Acero inoxidable 321

Los resultados se presentan en dos tablas. En la Tabla 7 se muestran solamente los resultados derivados de la transferencia de calor. En la Tabla 8 se muestran los resultados de fuerza de cizalla, presiones y flujos.

En la Figura 12 se muestra como se difunde el calor en el material cuando pasa a través del cocedor. La distribución de la presión se muestra en la Figura 13 en donde se observa que la máxima presión es a la entrada del cocedor y va disminuyendo conforme el material avanza. En la Figura 14 se muestran las líneas de flujo del fluido, se observa que es un flujo laminar y que en el centro del cocedor el avance es mayor que en las paredes de este debido a la pérdida de velocidad por fricción.

Tabla 7. Resultados de simulación para transferencia de calor.

Resultado	Unidad	Valor
Temperatura del fluido.	Centígrados	78.18
Flujo de calor.	W/m ²	849.1866
Transferencia de calor.	W	70.2973

Tabla 8. Resultados de simulación para esfuerzos, velocidades y flujos.

Resultado	Unidad	Valor
Caída de presión.	Pa	30001.27883
Velocidad de flujo.	m/s	0.0003468
Fuerza de corte.	N	397.7241

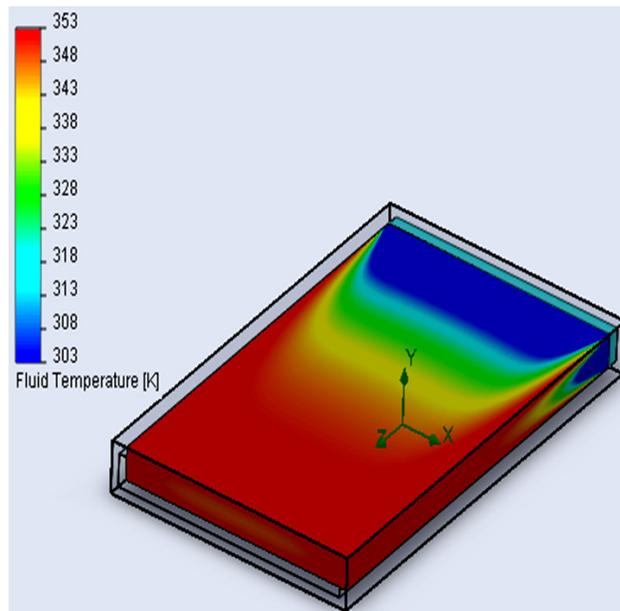


Figura 12. Distribución de temperaturas en el cocedor.

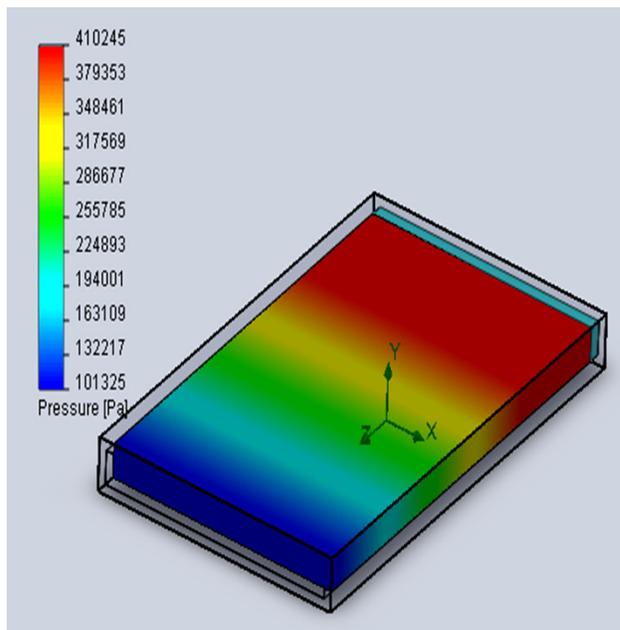


Figura 13. Distribución de la presión en el cocedor.

Según la metodología, antes de continuar con la construcción del cocedor, es necesario verificar los resultados de la simulación con los teóricos. En Tabla 9 se muestran los resultados a comparar por medio de la desviación del error. Se observa que en el cálculo de la fuerza de corte se obtiene la máxima desviación de 11.3%, mientras que en las demás especificaciones el error es muy pequeño. Debido a que la fuerza de corte en la simulación sigue cumpliendo con las especificaciones, se toma como satisfactoria.

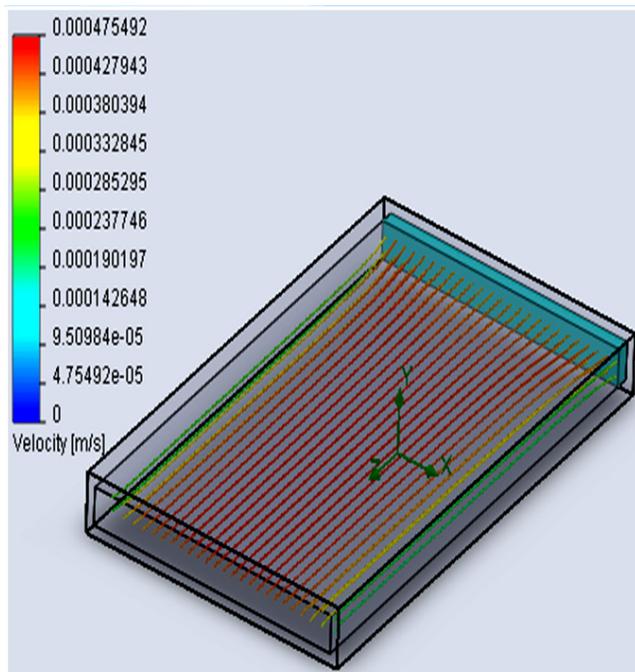


Figura 14. Líneas de flujo.

Tabla 9. Comparación de resultados de la simulación y los teóricos.

Dato	Teórico	Simulación	%error
Caída de Presión (Pa)	304900	300012	-1.6031
Fuerza de corte (N)	357.03	397.72	11.3968
Temperatura de salida (°C)	76.5	78.18	2.1960
Velocidad de flujo (m/s)	3.46×10^{-4}	3.45×10^{-4}	-0.0398

d) Fabricación del prototipo.

El material empleado para la fabricación del cocedor y extrusor es acero inoxidable por su grado alimenticio (Ver Figura 15). Los aisladores térmicos se fabricaron de teflón por su resistencia a la temperatura y su baja constante de transferencia de calor.

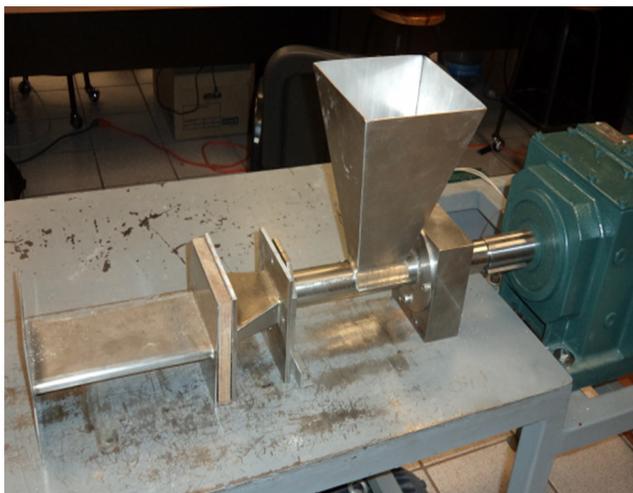


Figura 15. Ensamble del prototipo.

d) Pruebas experimentales.

La prueba se realizó en CICATA unidad Querétaro con 80 centígrados de temperatura en el cocedor y harina de maíz a 32% de humedad con una granulometría de malla 0.8. Durante la prueba, se efectuó un barrido del rendimiento de 3 a 1.5 kg/h, utilizando el variador de velocidad del motor acoplado al extrusor. Los resultados se observan en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados experimentales .

Rendimiento kg/h	Temperatura de entrada °C	Temperatura de salida °C
2.95	33.4	73
2.91	33.8	73
2.81	31.5	72.3
1.8	33.7	77.2
1.7	33.5	76.9
1.66	33.7	77.8
1.60	32.9	77.8
1.52	32.1	77.1

Para finalizar, se realiza una comparación entre los resultados experimentales, teóricos y los obtenidos de la simulación como se muestra en la Tabla 11. En esta comparación se seleccionó el rendimiento de 1.49 kg/h que es el que más se acerca al teórico y la simulación. Debido a que la temperatura de entrada tenía una variación, el error se estimó con el incremento de temperatura del material al pasar en el cocedor.

Tabla 11. Comparación entre resultados .

Parámetro.	Resultado teórico.	Resultado simulación.	Resultado Experimental.
Rendimiento	1.5	1.5	1.49
Temperatura de Entrada.	30	30	32.1
Temperatura de Salida.	76.5	78.18	77.1
Incremento de temperatura.	46.5	48.18	45
% Error.	0	3.6129	-3.2258

También se obtuvo la viscosidad de salida del material al rendimiento de 1.49 Kg/h con un valor de 243 unidades Brabender (BU).

Conclusiones.

Mediante el diseño conceptual, la simulación y las pruebas; se obtuvo un sistema para producir harina de maíz nixtamalizada. Las características de esta harina se asemejan al proceso tradicional de nixtamalización debido al bajo cizallamiento que presenta al transportarse y cocerse. Durante las pruebas se observó el flujo laminar de la harina de maíz nixtamalizada en forma de cortina, lo cual indica que el material no presenta velocidades de corte significativas durante el proceso. Esto se comprueba con el valor de viscosidad obtenido, el cual supera a lo reportado por Bedolla y Rooney Bedolla S. y Rooney L.W. (1984), quienes señalaron que la

viscosidad óptima en una masa para la preparación de tortillas es entre 200 y 240 unidades Brabender. Como resultado del diseño, se patentó la máquina con número de expediente MX/a/2010/009835.

Trabajo Futuro.

Se pretende poder procesar diferentes tipos de harinas de maíz variando rangos de humedad, temperatura, cal y granulometría. Mediante estas pruebas se determinará la reología de cada una de ellas para obtener las mejores condiciones de operación.

Agradecimientos.

Se agradece al ICYTDF y al CONACYT por el apoyo otorgado para la realización de este proyecto.

Referencias.

Financiera Rural (Marzo 2009). "Monografía del Maíz Grano". Sitio web: Gobierno de México. Consultado el 29 de Enero del 2011. URL: <http://www.financierarural.gob.mx/informacionsectorrural/Documents/Ma%C3%ADz.pdf>.

Duran de Bazúa C. , Guerra R. y Sterner H. (1979), " Extruded corn flour as an alternative to lime heated corn flour for tortilla preparation", Food Science. Vol. 44 pg. 940-941.

Sánchez-Sinencio F, González- Hernández J, Martínez-Montes J. L., Martínez-Bustos F, Figueroa, J. D. C., y Ruiz-Torres M. (1996). "Extrusion apparatus for the preparation of instant fresh corn dough or masa", Patente US 5,558,886. EE.UU.

Figueroa J. D., Morales-Sánchez E., González-Hernández J. y Arambula-Villa J. (2002), "Proceso de nixtamalización limpia y rápida para la producción de masa fresca de maíz para elaborar tortillas, harinas instantáneas y sus derivados". Patente: MX 210991. México.

Figueroa J. D., Martínez, B. F., González, H. J. y Sánchez, S. F. (1994), "Modernización tecnológica del proceso de nixtamalización", Avances y Perspectivas, Vol. 13, pp.323-329.

Figueroa J.D., Martínez B.F., González H.J., Sánchez S.F., Martínez J.L. y Ruiz M.T. (1993) "Extrusor y proceso continuo para formación de masa fresca de maíz para la elaboración de tortillas de harinas instantáneas y sus derivados", Patente SECOFI 936544. México.

Martínez Montes J., Sánchez Sinencio F, Martínez Bustos F. y Ruiz Torres M. (2001) "Selective nixtamalization process for production of fresh whole corn masa, nixtamalized corn flour and derived products", Patente US 6265013, EE.UU.

Vaqueiro M. C. y Reyes P. (1986), "Process for producing nixtamalized corn flour", Patente US 4594260, EE.UU.

Bello-Pérez L., Osorio-Díaz P., Agama-Acevedo E., Núñez-Santiago C. y Paredes-López O. (2002), "Propiedades químicas, fisicoquímicas y reológicas de masas y harinas de maíz nixtamalizado", Agrociencia, Vol. 36, Número 3, pp. 319-328.

Harper Judson M. (1981), "Extrusion of food", Editorial CRC Press, Vol 1, Florida.

Machado-Velazco K.M. y Vélez-Ruiz J.F., (2008), "Estudio de propiedades físicas de alimentos mexicanos durante la congelación y el almacenamiento congelado", Revista Mexicana de Ingeniería Química, Vol.7 Número 001, pp. 41-54.

Sieder E.N., Tate C.E. (1936), "Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes", Ind. Eng. Chem., Vol. 8, pp. 1429-1936.

Bedolla S. y Rooney L.W. (1984), "Characteristics of US and Mexican instant maize flours for tortilla and snack preparation", Cereals Food World.; Vol. 29, pp. 732-735.