

Metodología para la selección de motor en los procesos de extrusión.

Methodology of selection for extrusion process motors

Wilmer Velilla Díaz¹, Heriberto Maury Ramirez²

*1, -Magister. Profesor Asistente. Universidad Autónoma del Caribe.Grupo IMTEF.
wvelilla@uac.edu.co*

2, - Ph. D. Profesor Titular. Universidad del Norte.Grupo GIMYP

Recibido 20/05/13, Aceptado 29/06/2013

RESUMEN

El trabajo actual presenta la metodología implementada para determinar la potencia requerida en motores para el proceso de extrusión de arcilla, la fuerza requerida para mover la arcilla dentro de la extrusora se establece al solucionar las ecuaciones diferenciales parciales que describen el fenómeno de transporte del proceso, las cuales deben ser reducidas desde su forma generalizada para poder obtener una solución analítica, el criterio utilizado para reducir las ecuaciones fue de significancia, el modelo fue comparado con una extrusora real y se determinó con los valores del motor que el error porcentual fue de 10.67%.

Palabras clave: Metodología, selección de motores, fenómenos de transporte, extrusión, arcilla

ABSTRACT

This paper presents a methodology to find the required motor's power at the extrusion process, the needed force to keep moving the clay in the extruder is calculated once we have the solution of the partial differential equations that describe the transport's phenomenon of the process; these equations have to be reduced to obtain an analytical solution. The criteria used to reduce the equations were the significance. The model was compared with a real extruder's motor and we conclude that the extruder's motor has a percentage error of 10.67%.

Keywords: Methodology, Motor's selection, transport's phenomenon, extrusión, clay

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de transporte de materiales y fluidos en diferentes procesos consiste en el estudio de la cantidad de movimiento, considerando que son medios continuos [1]. El estudio de esta mecánica permite determinar las fuerzas requeridas para poder mantener en movimiento permanente los materiales, a su vez, con el conocimiento de estas fuerzas y las velocidades involucradas en el proceso se puede seleccionar el motor adecuado [2][3], con los valores de la potencia y velocidad angular a la que debe girar el tornillo extrusor. El estudio de los fenómenos de transporte se aplica también a la ingeniería de alimentos, dado que es muy común la necesidad de transportar la materia prima en este tipo de industria [4]. El proceso de extrusión tiene diferentes zonas de estudio, algunas investigaciones han estudiado los esfuerzos que se generan en la etapa de dosificación [5], sin embargo en el presente estudio abarca el fenómeno del transporte en la camisa del tornillo extrusor. En el proceso de extrusión, el tipo de material que es transportado en el interior de la camisa influye significativamente [6][7][8] y se comprobará a través del modelo matemático que se desarrolla en este estudio. Las ecuaciones generales de cantidad de movimiento se simplifican acorde al fenómeno particular de extrusión de arcilla [9] para poder obtener una solución analítica.

2. NOMENCLATURA

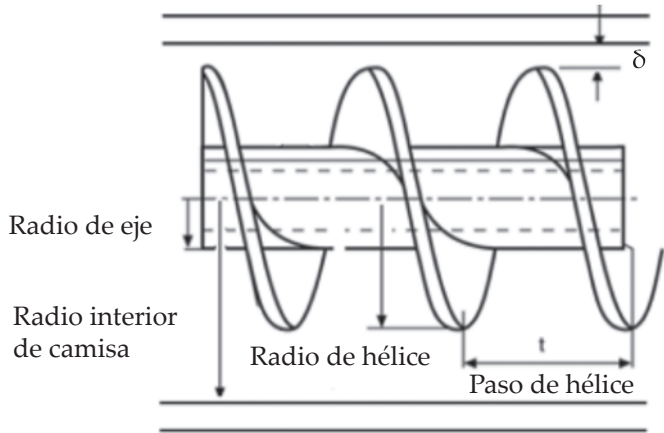
V_r	Velocidad radial (m/s)
V_θ	Velocidad tangencial (m/s)
V_z	Velocidad axial (m/s)
θ	Angulo de la hélice
r	Radio de la hélice (m)
z	Dirección de avance de la arcilla
Δ	Baja significancia
μ	Viscosidad de la arcilla (Pa/s)
ρ	Densidad de la arcilla (kg/m ³)
t	Tiempo (t)
p	Presión (Pa)
g	Gravedad (m/s ²)
k	Constante de proporción
R	Radio exterior de hélice (m)
Ω_θ	Velocidad angular de la hélice (rad/s)
C	Constante de integración
$\tau_{r\theta}$	Esfuerzo cortante (Pa)
τ_θ	Esfuerzo cortante inicial (Pa)
F	Fuerza (N)
A	Área (m ²)
s	Longitud de arco (m)
n	Número de hélice
P	Potencia (W)
I	Corriente (A)
V	Voltaje (V)
ϕ	Angulo de fase
T	Torque, (N-m)

3. MODELACION DEL FENOMENO DE TRANSPORTE EN LA EXTRUSORA

El proceso de extrusión al interior de una extrusora la arcilla va avanzando hacia el molde a través de las hélices del tornillo extrusor. Este desplazamiento es posible debido a la selección de un motor capaz de generar la potencia adecuada para vencer la oposición que presenta la arcilla a desplazarse, en este estudio se presenta un modelo matemático basado en el fenómeno de transporte de la arcilla para calcular la potencia requerida en función de los parámetros geométricos de la extrusora. La extrusora a escala real tiene un tablero que nos señala la corriente eléctrica con la que trabaja la extrusora. Por consiguiente se podrá definir en los próximos estudios el error porcentual del modelo al utilizar la potencia para calcular la corriente.

Con el propósito de obtener una mejor interpretación del proceso de extrusión y las variables estudiadas para este estudio se presenta la Figura 1.

Figura 1. Esquema de nomenclatura
Figure 1. Nomenclature's scheme



Las ecuaciones que gobiernan la cantidad de movimiento de los fluidos en coordenadas cilíndricas, en función de los gradientes de velocidad para fluidos newtonianos donde la viscosidad y la densidad se asumen como constantes durante el proceso, se presentan a continuación en la Ec (1), Ec (2) y Ec (3).

La componente radial esta expresada de la siguiente forma.

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_r + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

La componente angular esta expresada de la siguiente forma.

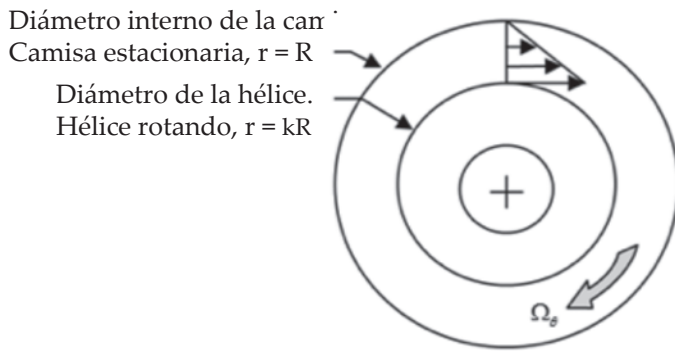
$$\rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \rho g_\theta + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_\theta) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

La componente axial esta expresada de la siguiente forma.

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] \quad (3)$$

El estudio del movimiento es tal como se presenta en la Figura 2.

Figura 2 Flujo laminar al interior de la extrusora
Figure 2. Laminar flow inside the extruder



El estudio que se desarrolla tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

Estado estable. Flujo laminar. Fluido incompresible, fluido newtoniano. Sistema continuo. Flujo desarrollado hidrodinamicamente.

Una herramienta útil para cancelar derivadas parciales es organizarlas por significancia, esto consiste en definir la significancia independiente de las variables y después relacionarlas en las derivadas parciales, como se observa en la tabla 1.

Tabla 1. Criterio de significancia.
Table 1. Significance criteria

$v_r : \Delta$	$\partial v_r : \Delta$	$\partial \theta : 1$
$v_\theta : 1$	$\partial v_\theta : 1$	$\partial r : \Delta$
$v_z \approx 1$	$\partial v_z \approx 1$	$\partial z \approx 1$

$\frac{\partial v_r}{\partial t} \rightarrow \frac{\Delta}{\Delta} \rightarrow 1$	$\frac{\partial v_\theta}{\partial r} \rightarrow \frac{1}{\Delta}$	$\frac{\partial v_z}{\partial r} \rightarrow \frac{1}{\Delta}$
$\frac{\partial v_r}{\partial \theta} \rightarrow \frac{\Delta}{1} \rightarrow \Delta$	$\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \rightarrow \frac{1}{1} \rightarrow 1$	$\frac{\partial v_z}{\partial \theta} \rightarrow \frac{1}{1} \rightarrow 1$
$\frac{\partial v_r}{\partial z} \rightarrow \frac{\Delta}{1} \rightarrow \Delta$	$\frac{\partial v_\theta}{\partial z} \rightarrow \frac{1}{1} \rightarrow 1$	$\frac{\partial v_z}{\partial z} \rightarrow \frac{1}{1} \rightarrow 1$

En la tabla 1 de magnitudes, se eliminan las variables con poca significancia, con el objetivo de poder encontrar solución analítica.

El criterio utilizado para seleccionar las derivadas parciales que van a ser tomadas en cuenta, consiste en definir su magnitud de significancia. El valor 1 es el valor alto en significancia y Δ el bajo en significancia, por lo que las derivadas parciales a tener en cuenta para el análisis son aquellas que generen un orden de significancia $1/\Delta$, tal como se presenta en la Ec (4).

$$\frac{1}{\Delta} \gg 1 \gg \Delta \quad (4)$$

Se considera que $v_\theta : 1$ debido a que la mayor cantidad de movimiento de la arcilla tiende a ser cilíndrica a través del paso por las hélices. $v_z \sim 1$, dado que esta es la velocidad de avance de la arcilla, sin embargo no es más significativa que $v_\theta \cdot v_r : \Delta$, ya que la velocidad en la dirección radial tiende a ser nula. $\partial v_r : \Delta$, dado que difícilmente existirá aceleración en esta dirección si las velocidades son mínimas. $\partial v_\theta : 1$, puesto que en esta dirección la arcilla puede acelerarse debido a la variación del paso de las hélices. $\partial z \sim 1$, como consecuencia igualmente del paso en las hélices de la extrusora.

De la Ec (1) se anulan las derivadas parciales que no van a ser tomadas en cuenta.

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_r + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] \quad (5)$$

La primera expresión se cancela por la condición de estado estable, las derivadas parciales por el criterio de significancia son canceladas y las fuerzas gravitacionales en la dirección radial es en todas direcciones y tienden a ser despreciables. Por lo cual resulta la ecuación:

$$-\rho \frac{v_{\theta}^2}{r} = -\frac{\partial p}{\partial r} \quad (6)$$

En la Ec (2) de la coordenada angular.

$$\rho \left(\frac{\partial v_{\theta}}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_{\theta}}{\partial r} + \frac{v_{\theta}}{r} \frac{\partial v_{\theta}}{\partial \theta} - \frac{v_r v_{\theta}}{r} + v_z \frac{\partial v_{\theta}}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \rho g_{\theta} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_{\theta}) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_{\theta}}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_{\theta}}{\partial z^2} \right] \quad (7)$$

El primer término se cancela debido a la condición de estado estable, el segundo y cuarto término se cancelan debido a que se considera que v_r es de magnitud despreciable, de igual manera los cambios de presión frente a los cambios en θ se consideran despreciables. No hay presencia de fuerzas gravitacionales en θ , por ello este término se cancela. Para las derivadas parciales se aplica el criterio de grados de significancia estipulados.

Por lo cual queda la siguiente expresión:

$$\mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_{\theta}) \right) = 0 \quad (8)$$

En la tercera coordenada se encuentra de la Ec (3).

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_{\theta}}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] \quad (9)$$

Utilizando los mismos criterios se cancelan las derivadas parciales, la fuerza gravitacional, v_r y el primer término.

Se obtiene como resultado la ecuación.

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) = 0 \quad (10)$$

De la ecuación resultante en la coordenada radial se puede obtener la presión en función del radio y la velocidad tangencial que se encuentra al resolver la coordenada tangencial, sin embargo esta ecuación no es necesaria desarrollarla ya que en esta investigación no se requiere la presión para cumplir los objetivos.

De la ecuación de la coordenada axial, se logra determinar la velocidad axial, con la cual se puede calcular el flujo másico de arcilla. La velocidad axial se obtiene al reemplazar los valores de la presión resultantes del desarrollo de la ecuación de la coordenada radial, sin embargo este no es el propósito de este modelo.

La expresión con la que se calcula la potencia requerida por el motor es la obtenida al desarrollar la ecuación de la coordenada angular, dado que a través de esta se calcula la velocidad tangencial, con la cual se calcula el esfuerzo cortante, del esfuerzo cortante la fuerza necesaria para hacer fluir el material, con esta fuerza se halla el torque y posteriormente la potencia.

Desarrollo de la ecuación diferencial de la componente tangencial.

$$\mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_{\theta}) \right) = 0 \quad (11)$$

Integrando dos veces la Ec (11), obtenemos el siguiente resultado.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_{\theta}) = C_1 \quad (12)$$

$$r v_{\theta} = \frac{r^2}{2} C_1 + C_2 \quad (13)$$

$$v_{\theta} = \frac{r}{2} C_1 + \frac{1}{r} C_2 \quad (14)$$

En esta etapa se implementan las condiciones de frontera del fluido.

Condición de frontera #1: cuando $r = R$, $v_{\theta} = 0$

Condición de frontera #2: cuando $r = kR$, $v_{\theta} = \Omega_{\theta} kR$

Implementación de condición de frontera #1

$$v_{\theta} = \frac{r}{2} C_1 + \frac{1}{r} C_2 \quad (15)$$

$$0 = \frac{R}{2} C_1 + \frac{1}{R} C_2 \quad (16)$$

$$C_2 = -\frac{R^2}{2} C_1 \quad (17)$$

Implementación de condición de frontera #2

$$v_{\theta} = \frac{r}{2} C_1 + \frac{1}{r} \left(-\frac{R^2}{2} C_1 \right) \quad (18)$$

$$\Omega_{\theta} kR = \frac{kR}{2} C_1 - \frac{1}{kR} \left(\frac{R^2}{2} C_1 \right) \quad (19)$$

$$C_1 = \frac{\Omega_{\theta} kR}{\left(\frac{kR}{2} - \frac{R}{2k} \right)} \quad (20)$$

Reemplazando estos valores en la Ec (14) y acomodando las variables, se deduce la Ec (22) que describe el comportamiento de la velocidad más significativa del fluido en la extrusora.

$$v_{\theta} = \frac{r}{2} \frac{\Omega_{\theta} kR}{\left(\frac{kR}{2} - \frac{R}{2k} \right)} + \frac{1}{r} \left(-\frac{R^2}{2} \frac{\Omega_{\theta} kR}{\left(\frac{kR}{2} - \frac{R}{2k} \right)} \right) \quad (21)$$

$$v_{\theta} = \Omega_{\theta} kR \left(\frac{r}{kR - \frac{R}{k}} - \frac{R^2}{rkR - \frac{Rr}{k}} \right) \quad (22)$$

Con esta velocidad se procede a determinar el esfuerzo cortante de acuerdo con la ecuación de la ley de fluidos Newtonianos y considerando un fluido tipo Bingham14 para la arcilla, aparece $\tau_{r\theta}$. [9]

$$\tau_{r\theta} = -\mu \left(r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_{\theta}}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right) + \tau_0 \quad (23)$$

El segundo término de la Ec (23) se cancela, dado que se considera despreciable la magnitud de esta derivada parcial, basado en el método de significancia.

$$\tau_{r\theta} = -\mu r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\Omega_{\theta} kR \left(\frac{r}{kR - \frac{R}{k}} - \frac{R^2}{rkR - \frac{Rr}{k}} \right)}{r} \right) + \tau_0 \quad (24)$$

$$\tau_{r\theta} = -\mu r \Omega_{\theta} kR \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{kR - \frac{R}{k}} - \frac{R^2}{r^2 kR - \frac{Rr^2}{k}} \right) + \tau_0 \quad (25)$$

El primer término de la derivada se cancela, dado que es una constante. Derivando y acomodando las variables, se obtiene la ecuación que describe el comportamiento del esfuerzo cortante.

$$\tau_{r\theta} = -\mu r \Omega_{\theta} kR \frac{3R^2}{r^3 kR - \frac{Rr^3}{k}} + \tau_0 \quad (26)$$

$$\tau_{r\theta} = -\mu \Omega_{\theta} k \frac{3R^2}{r^2 k - \frac{r^2}{k}} + \tau_0 \quad (27)$$

Ahora se procede a determinar la fuerza generada sobre el área de la hélice en la extrusora, para lograr calcular posteriormente la potencia requerida.

Figura 3. Área proyectada del tornillo extrusor.
Figure 3. Projected area of the screw extruder

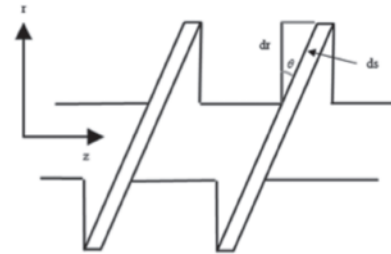
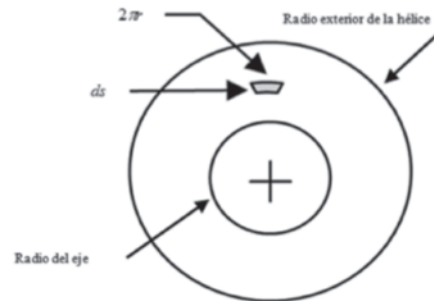


Figura 4. Elemento diferencial de área.
Figure 4. Differential element of area.



$$dF = \tau_{r\theta} dA_{Contacto} \quad (28)$$

Debido a que el área sobre la que se aplica el esfuerzo cortante comprende las hélices que conforman el tornillo, es necesario calcular el área resultante de la suma de todas las espirales, $2 \cdot n$, donde n es el número de vueltas, 2 debido a que son las dos caras de la hélice.

$$dA = 2n2\pi r ds \quad (29)$$

$$ds = \frac{dr}{\cos \theta} \quad (30)$$

$$dA = \frac{4n\pi(r - r_{eje})dr}{\cos \theta} \quad (31)$$

$$dF = \tau_{r\theta} dA_{Contacto} \quad (32)$$

$$dF = - \left(\mu\Omega_{\theta}k - \frac{3R^2}{r^2k - \frac{r^2}{k}} + \tau_0 \right) \left(\frac{4n\pi(r - r_{eje})dr}{\cos \theta} \right) \quad (33)$$

En el esfuerzo cortante se toma $r = R$, dado que en esta ubicación es donde el esfuerzo cortante es máximo.

$$dF = - \left(\frac{3\mu\Omega_{\theta}k}{k - \frac{1}{k}} + \tau_0 \right) \left(\frac{4n\pi(r - r_{eje})dr}{\cos \theta} \right) \quad (34)$$

Integrando se obtiene el modelo de la fuerza y la aplicamos al radio interno de la camisa, para obtener el valor más alto.

$$F = - \left(\frac{3\mu\Omega_{\theta}k}{k - \frac{1}{k}} + \tau_0 \right) \left(\frac{4n\pi \left(\frac{r^2}{2} - rr_{eje} \right) \Big|_{r=R}}{\cos \theta} \right) \quad (35)$$

Reemplazando el valor del radio.

$$F = - \left(\frac{3\mu\Omega_{\theta}k}{k - \frac{1}{k}} + \tau_0 \right) \left(\frac{4n\pi \left(\frac{R^2}{2} - Rr_{eje} \right)}{\cos \theta} \right) \quad (36)$$

Ahora se procede a hallar el Par del motor con el diámetro exterior de la hélice, para proceder a calcular la potencia y verificar el modelo con la extrusora real que se está trabajando actualmente.

$$T = F * r_{Hélice} = - \left(\frac{3\mu\Omega_{\theta}k}{k - \frac{1}{k}} + \tau_0 \right) \left(\frac{4n\pi \left(\frac{R^2}{2} - Rr_{eje} \right)}{\cos \theta} \right) r_{hélice} \quad (37)$$

$$P = T * \Omega_{\theta} = -\Omega_{\theta} \left(\frac{3\mu\Omega_{\theta}k}{k - \frac{1}{k}} + \tau_0 \right) \left(\frac{4n\pi \left(\frac{R^2}{2} - Rr_{eje} \right)}{\cos \theta} \right) r_{hélice} \quad (38)$$

El valor que se calcula de la ecuación 38 se convierte a unidades de corriente de la siguiente forma, debido a que el motor eléctrico es trifásico.

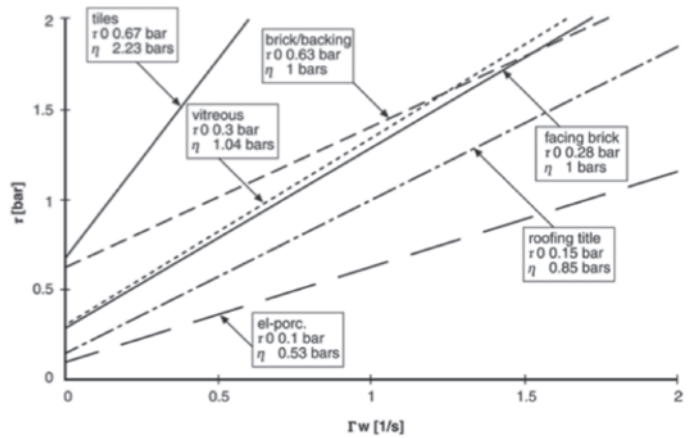
$$P = \sqrt{3}VI \cos \phi \quad (39)$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V \cos \phi} \quad (40)$$

La corriente que se calcula se comparará con la corriente utilizada por la extrusora, la cual se aprecia en un tablero eléctrico que tiene la extrusora.

Figura 5. Curvas de flujo de tiempo de compuestos de cerámicas.[9]

Figure 5. Flow times curves of composited ceramics.[9]



En la figura 9 se observan varios tipos de materiales utilizados para la construcción, como se puede apreciar hay unos en los cuales el esfuerzo cortante inicial para hacer fluir el material no es tan grande como en otros, sin embargo la pendiente indica que tan difícil es hacer fluir el material después de que se vence el esfuerzo cortante inicial, por ejemplo en las tejas, el cortante aumenta considerablemente después de vencer el esfuerzo cortante inicial. Este estudio

lo llevó a cabo Bingham. El valor seleccionado de viscosidad dependerá del tipo de aplicación que se requiera.

El valor de la corriente eléctrica con la que trabaja la extrusora real es de 140A, presentado en su tablero eléctrico. Con este dato se procede a calcular el error del modelo.

Al establecer la viscosidad de la arcilla para tipo Brick/Backing y las dimensiones reales de la extrusora en el modelo matemático, se calcula la potencia del motor y por consiguiente la corriente. $\cos\phi = 0,9$ a su máxima capacidad y el voltaje con que trabaja tiene un valor 440V.

Tabla 2. Resultados del modelo con los valores geométricos de la extrusora.

Table 2. Results of the model with the geometrics values of the extruder.

Extrusora convencional	Magnitud	Unidades
Revoluciones por segundo	0,33	1/sg
Numero de espirales	5,5	
Angulo	0,19	rad
Esfuerzo cortante inicial	63000	Pa-sg
k	0,996	
Viscosidad	100000	Pa-sg
Radio de eje	0,105	m
Radio hélice	0,225	m
Radio interior de la camisa	0,226	m
Potencia	106568,74	W
Corriente del motor	155,37	A

El error se calcula comparando la corriente eléctrica óptima con la corriente eléctrica calculada en el modelo matemático.

$$Error = \frac{Corriente\ modelo - Corriente\ es\ tan\ dar}{Corriente\ es\ tan\ dar} * 100$$

$$Error = \left(\frac{155,37 - 140}{140} \right) * 100$$

$$Error = 10,97\%$$

4. CONCLUSIONES

- El conjunto de Ec (37) y (38), constituye el modelo matemático que representa los requerimientos de par y potencia en función de los parámetros geométricos y de operación de la extrusora.

- La viscosidad del material y el radio de la hélice son directamente proporcionales a la potencia, por lo cual son los factores más significativos a la hora de seleccionar el motor.
- El material que se va a procesar en la extrusora tiene influencia en el cálculo de la potencia del motor en dos factores: la viscosidad y el esfuerzo cortante inicial que es necesario vencer para colocar el material en movimiento.
- El análisis de significancia de las derivadas parciales que describen la cantidad de movimiento del material permite encontrar una solución analítica.
- El error porcentual fue de 10.97%, es muy aceptable y se considera como consecuencia de las variables que no se consideraron significativas en el modelo, tales como: el cambio de presión en , la suposición de flujo laminar, la condición de estado estable, la superficie lisa de la hélice, ya que es probable que la extrusora convencional sobre la que se hicieron las pruebas esta superficie este desgastada.

REFERENCIAS.

- [1] Bird. R. B., Fenómenos de transporte. Reverté, S. A., Barcelon, Expaña. 1992.
- [2] Shames Irving. Mecánica de fluidos. Tercera edición . Edit Mc Graw Hill. Santa fe de Bogotá, Colombia 1995.
- [3]Norton R. Machine Design. Edit Prentice Hall, Inc. USA 1996.
- [4] Welti-Chanes J. et al. Transport phenomena in food engineering: basic concepts and advances. Journal of Food Engineering 2005.
- [5] Bouzakis. K.D. et al. Experimental and FEM-supported investigation of wet ceramic clay extrusion for the determination of stress distributions on the applied tool's surfaces. Journal of the European Ceramic Society 2008.
- [6] Tregger, N. et al. Influence of clays on the rheology of cements pastes. Cement and concrete research 2010.
- [7] Teh. E. et al. Difference in the rheology and surface chemistry of caolin clay slurries: the source of the variations. Chemical Engineering Science 2009.
- [8] Pusch R. Rheology of an artificial smectiticlay. Applied Clay Science 2010.
- [9] Frank Hândle. Extrusion in Ceramics. Springer Berlin Heidelberg, New York 2007.