

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Rediseño de la etapa de envasado de la línea de producción de aliños

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero de alimentos

Presentado por:

Michelle Elizabeth Barreto Vásquez

María Gabriela Jiménez Álvarez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

DEDICATORIA

A mis padres, por ser los principales promotores de mis sueños y haberme proporcionado la mejor educación.

A mi abuelo, por ser mi inspiración constante para cumplir mis objetivos, quien desde el cielo debe estar orgulloso al verme convertir en profesional.

A mi familia y amigos, por su apoyo en todo momento.

Michelle Barreto Vásquez

DEDICATORIA

Este pequeño logro en mi vida se lo dedico a mis padres, hermanas, abuelos y mi tía quienes han sido la pieza clave para recorrer el camino que me ha traído hasta este momento.

Gabriela Jiménez A.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme salud y sabiduría para superar todos los obstáculos a lo largo de la vida.

A mi madre, por todo su amor, paciencia y comprensión en cada decisión que he tomado y ser ejemplo de lucha y superación. A mi padre, por sus consejos y siempre anhelar lo mejor para mi vida.

A mi abuelita, por sus palabras de aliento en momentos complicados, sus oraciones diarias y su amor.

A mis amigos, en especial Gabriela mi amiga y compañera de tesis con quien he compartido largas jornadas de estudio, así como también momentos de diversión.

A mi tutor de tesis por su guía, apoyo y comprensión para sacar adelante el presente proyecto de tesis de grado.

Michelle Barreto Vásquez

AGRADECIMIENTOS


Este trabajo surgió después de un largo camino que ha implicado esfuerzo, dedicación e inspiración. Por lo tanto, siento la necesidad de agradecer. Agradecer a Dios por la vida, a mis padres por enseñarme a trabajar con esfuerzo y dedicación, por su apoyo infinito y su amor, a mi familia por apoyarme a cada paso del camino, a Michelle por ser mi compañera y amiga durante estos años de carrera, a mi tutor por su guía, apoyo y comprensión, a mis maestros por sus enseñanzas, a la empresa por su confianza y por brindarnos la oportunidad de trabajar en conjunto y a todos aquellos quienes hicieron posible alcanzar esta meta.

Gabriela Jiménez Álvarez

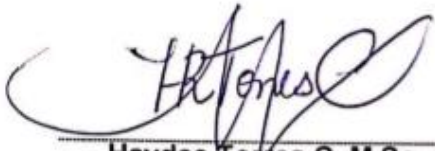
DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Barreto Vásquez Michelle Elizabeth* y *Jiménez Alvarez María Gabriela* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”


Michelle Barreto V


Gabriela Jiménez A

EVALUADORES



Haydee Torres C, M.Sc

PROFESOR DE LA MATERIA



Cesar Moreira, PhD

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Actualmente, la competencia entre las industrias de alimentos causa que estas se encuentren ajustando sus procesos en base a tendencias y proyectos de mejora continua para incrementar su productividad y satisfacer la demanda del mercado. En la producción de aliños, la etapa de envasado presenta un riesgo de contaminación debido a que la alimentación de la llenadora es realizada manualmente por un operario. Por esto, el presente proyecto tiene como objetivo el rediseño de la etapa de envasado de la línea de producción de aliños con el fin de mejorar el proceso, cumpliendo con las buenas prácticas de manufactura. Para cumplir con los objetivos planteados, se realizó la caracterización reológica del producto para determinar la mejor manera de mover el fluido y los parámetros que se deben cumplir para transportar el producto desde el tanque de almacenamiento hacia la llenadora de pistón. La viscosidad fue determinada por un viscosímetro rotacional de Brookfield y se utilizó la ley de potencia del modelo planteado por Ostwald de Waele para conocer el comportamiento del fluido. La caracterización reológica indicó que se trataba de un fluido no newtoniano, pseudoplástico con un comportamiento laminar. El requerimiento de bombeo de la adaptación a la llenadora es inferior a la presión ejercida por el pistón, por ende, no fue necesario añadir una bomba al sistema. La implementación de este rediseño representará a la empresa un ahorro anual de \$5047.92 y la inversión en tuberías y accesorios será recuperada en 11 días, 1 hora y 36 minutos de trabajo.

Palabras claves: aliño, rediseño, caracterización reológica, ley de potencia.

ABSTRACT

Currently, the competition among the food industries causes them to adjust their processes based on trends and continuous improvement projects to increase their productivity and meet market's demand. In the production of seasoning paste, the filling stage presents a risk of contamination because the feeding of the filler is done manually by an operator. For this reason, this project aims to redesign the filling stage of the seasoning paste production line in order to improve the process, complying with good manufacturing practices. To meet the objectives set, the rheological characterization of the product was performed to determine the best way to move the fluid and the parameters that must be met to transport the product from the storage tank to the piston filler. The viscosity was determined by a Brookfield rotational viscometer and the power law of the model proposed by Ostwald de Waele was used to determine the behavior of the fluid. The rheological characterization indicated that it was a non-Newtonian, pseudoplastic fluid with a laminar behavior. The pumping requirement of the filler adaptation is lower than the pressure exerted by the piston, therefore, it was not necessary to add a pump to the system. The implementation of this redesign will represent the company an annual saving of \$ 5047.92 and the investment in pipes and fittings will be recovered in 11 days, 1 hour and 36 minutes of work.

Keywords: *Seasoning paste, Redesign, Rheological characterization, Power law.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Aliño.....	3
1.4.2 Reología	3
1.4.3 Densidad.....	3
1.4.4 Viscosidad	4
1.4.5 Esfuerzo cortante.....	4
1.4.6 Tipo de fluido	4
1.4.6.1 Fluido newtoniano	4
1.4.6.2 Fluido no newtoniano	4
1.4.7 Tipos de flujo.....	5
1.4.7.1 Flujo laminar.....	5
1.4.7.2 Flujo turbulento.....	5
1.4.7.2.1 Fluido pseudoplástico	5

1.4.7.2.2	Fluido dilatante.....	6
1.4.8	Número de Reynolds	6
1.4.9	Viscosímetro rotacional de Brookfield.....	6
1.4.10	Gradiente de velocidad.....	7
CAPÍTULO 2.....		8
2.	Metodología.....	8
2.1	Reología del aliño.....	8
2.1.1	Viscosidad	8
2.1.2	Tipo de fluido	8
2.1.3	Tipo de flujo	9
2.1.4	Requerimientos para el bombeo del aliño.....	10
2.2	Prueba piloto	12
2.2.1	Implementación de la adaptación y funcionamiento	12
2.2.2	Análisis de los datos obtenidos en la prueba piloto	14
CAPÍTULO 3.....		16
3.	Resultados Y ANÁLISIS	16
3.1	Reología del aliño.....	16
3.1.1	Viscosidad	16
3.1.2	Tipo de fluido	16
3.1.3	Tipo de flujo	17
3.2	Prueba piloto	19
3.2.1	Implementación de la adaptación y funcionamiento	19
3.3	Análisis de los datos obtenidos en la prueba piloto.....	20
3.4	Estimación de costos	22
CAPÍTULO 4.....		23
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	23
4.1	Conclusiones.....	23

4.2 Recomendaciones.....	24
BIBLIOGRAFÍA.....	25
APÉNDICES.....	27

SIMBOLOGÍA

A	Área (m^2)
α'	Factor de corrección para fluidos no Newtoniano
C_{fe}	Coefficiente de pérdida de carga por expansión
C_{fe}	Coefficiente de pérdida de carga por contracción
C_{fe}	Coefficiente de pérdida de carga por conexiones en tubería
D	Diámetro de tubería
E_p	Energía suministrada por la bomba (J/kg)
f	Factor de fricción
g	Aceleración de la gravedad (m/s^2)
L	Longitud
K	Índice de consistencia (Pa.s)
m	Índice de comportamiento de flujo
Re'	Número de Reynolds generalizado
P	Presión (Pa)
ρ	Densidad
v_m	Velocidad media del fluido (m/s)
v	Velocidad del fluido (m/s)
∇	Causal volumétrico (m^3/s)
ΔP	Caída de presión (Pa)

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Gráfico factor de fricción número de Reynolds generalizado para fluidos no newtonianos.	11
Figura 2. 2. Sistema de llenado de botellas actual	13
Figura 2. 3. Esquema de la adaptación para el sistema de llenado	13
Figura 3. 1. Curva de viscosidad aparente vs velocidad de deformación	17
Figura 3. 2. Sistema de llenado con la nueva adaptación	20
Figura 3. 3. Gráfica de residuos para el número de botellas	20
Figura 3. 4. Resultados prueba Minitab	21
Figura 3. 5. Gráfica de efectos principales para el número de botellas	21

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Tipo de fluido según el índice de flujo.....	9
Tabla 2. 2. Tipo de flujo según el número de Reynolds.....	10
Tabla 2. 3. Datos del diseño factorial	14
Tabla 2. 4. Condiciones para el valor p	15
Tabla 3.1. Resultados obtenidos de la prueba de viscosidad.....	16
Tabla 3. 2. Datos utilizados para determinar el tipo de flujo	18
Tabla 3. 3. Datos utilizados para calcular requerimiento de bombeo	19
Tabla 3. 4. Datos de la experimentación	19
Tabla 3. 5. Tabla comparativo operativo vs inversión	22

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Hace casi cuatro décadas nace una empresa familiar en la ciudad de Guayaquil, cuya principal actividad se basaba en la comercialización de condimentos y especias. Sin embargo, con el pasar de los años, la empresa incursionó en la elaboración de productos listos para utilizar como aliños, achiote en pasta, pasta de ajo, entre otros. Poco después, se incluyeron las líneas de repostería, granos y finalmente salsas. El incremento en la cartera de productos trajo consigo la necesidad de aumentar la capacidad de producción y a su vez requerir instalaciones más grandes para cubrir la demanda del mercado nacional e internacional. Con respecto a lo anteriormente mencionado, crecer implica cambios. Cambios que deben ser llevados de manera responsable para que así estos no afecten ni la inocuidad del alimento, ni representen un incremento en los costos de producción.

El presente proyecto se enfoca en el rediseño de la etapa de envasado de la línea de producción de aliños bajo la idea de evaluar una alternativa que permita eliminar la alimentación de la tolva conectada al equipo de envasado, proceso que actualmente se realiza manualmente, de forma que la inocuidad del producto no se vea comprometida, así como también asegurar el cumplimiento de las buenas prácticas de manufactura.

Previo a la evaluación de esta alternativa, es necesario realizar una caracterización física del producto a envasar para conocer sus características reológicas y así determinar la mejor manera de mover este fluido a través de las tuberías asociadas al proceso.

1.1 Descripción del problema

La industria alimenticia debe adaptarse a los lineamientos y tendencias del mercado para poder tener éxito, los productos elaborados para asistir en la preparación de alimentos (específicamente aliños) no son la excepción (Del Greco, 2010). Sin embargo, los cambios que se ejecutan en los productos muchas veces requieren

también adaptaciones a operaciones que no están vinculados con el procesamiento del alimento; cómo por ejemplo llenado y envasado.

Es de nuestro interés el hecho de que durante un análisis de la línea de producción de aliños se observó que existen variables que afectan el proceso de envasado, entre ellos: desperdicios de masa, pérdidas de tiempo en horas/hombre, reprocesos del producto final, contaminación del producto en proceso, exceso de manipulación de masas. Estos problemas pueden ser mejorados y en algunos casos eliminados con el rediseño de la etapa de envasado de esta línea de proceso con reducción de costos y tiempos de proceso, aseguramiento de la calidad e incremento de la productividad.

Sin embargo, para la implementación de una solución para la operación de envasado de aliños es importante considerar ciertos aspectos físicos, específicamente, las características reológicas del producto, ya que de esta manera se podrá determinar los parámetros de importancia durante la operación de llenado/envasado del producto.

1.2 Justificación del problema

Este proyecto busca rediseñar la etapa de envasado de la línea de producción de aliños considerando las características reológicas del producto. La finalidad es mejorar esta operación, implementando en lo posible las buenas prácticas de manufactura, que permitirán cumplir estándares de calidad y de esta manera asegurar la inocuidad del alimento; el presente proyecto contribuye a la reducción de tiempos y costos de producción. Además, esta mejora puede servir de referencia para operaciones similares en otras industrias alimenticias. Además,

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Rediseñar la etapa de envasado de una línea de producción de aliños considerando las características reológicas del producto para cumplir estándares de calidad que permitan asegurar las buenas prácticas de manufactura.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Determinar las características reológicas del producto mediante el uso de equipos y cálculos propios de la ingeniería en alimentos.
2. Aplicar los fundamentos de movimiento de fluidos para determinar equipos y/o accesorios necesarios para el proceso de llenado.
3. Realizar una prueba a nivel piloto para determinar parámetros de control en el proceso.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Aliño

El aliño es un producto pastoso, logrado a partir de la mezcla de vegetales como cebolla, especias y otros aditivos alimenticios, usado como condimento.

1.4.2 Reología

La reología es una de las ramas de la física que se encarga de estudiar la deformación de la materia y el flujo de fluidos (Felipe, Tobón, & Mejía, 2005). Es la ciencia que estudia la deformación de un fluido al ser sometido a esfuerzos externos (Rao, 2014). Es el estudio de como los fluidos responden a la deformación o esfuerzo (Ramírez, 2006).

1.4.3 Densidad

La densidad es un indicador de cómo la materia está organizada o distribuida en un cuerpo, mientras más compacta sea la estructura molecular, mayor será la densidad. La magnitud de la densidad está influenciada por el factor de temperatura (Singh & Heldman, 2009).

1.4.4 Viscosidad

La viscosidad es una propiedad definida como la resistencia ejercida a un líquido a fluir libremente. A mayores fuerzas intermoleculares mayor será la viscosidad. Algunos factores que influyen son la forma de la molécula y temperatura. Las moléculas con muchas ramificaciones son más difíciles de deslizar entre sí que las moléculas redondas y pequeñas. Con respecto a la temperatura, la energía cinética aumentará a medida que se incremente la temperatura y como resultado se incrementará la velocidad de movimiento de las moléculas (Singh & Heldman, 2009).

1.4.5 Esfuerzo cortante

El esfuerzo cortante es una magnitud vectorial que representa a la fuerza por unidad de área aplicada paralelamente al desplazamiento. Se conoce también como esfuerzo de cizalla o esfuerzo tangencial (Singh & Heldman, 2009).

1.4.6 Tipo de fluido

1.4.6.1 Fluido newtoniano

Un fluido Newtoniano es aquel que presenta una relación directamente proporcional entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación, mientras que la viscosidad del fluido permanece constante mientras el gradiente de velocidad cambia (Singh & Heldman, 2009). Esto quiere decir que a una temperatura determinada la viscosidad de un fluido newtoniano permanece constante, independientemente del modelo, husillo o velocidad del viscosímetro que sea utilizado (Brookfield AMETEK, 2017).

1.4.6.2 Fluido no newtoniano

Un fluido no newtoniano es aquel cuya relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación no es constante. Cuando la velocidad de deformación varía, el esfuerzo cortante no varía en la misma proporción ni en la misma

dirección necesariamente. Por lo tanto, la viscosidad de estos fluidos cambiará a medida que varíe la velocidad de deformación (Singh & Heldman, 2009).

Es por lo que los parámetros experimentales del modelo, el husillo y la velocidad del viscosímetro tienen un efecto sobre la viscosidad medida de un fluido no newtoniano. Esta viscosidad medida se llama “viscosidad aparente” del fluido y es precisa solo cuando se proporcionan y se cumplen parámetros experimentales explícitos (Singh & Heldman, 2009).

1.4.7 Tipos de flujo

1.4.7.1 Flujo laminar

Un fluido laminar es aquel cuyo movimiento de las partículas van en un solo sentido y la dirección del movimiento del fluido (Singh & Heldman, 2009).

1.4.7.2 Flujo turbulento

Un fluido turbulento es aquel cuyas partículas tienen desplazamiento en sentidos diferentes al movimiento principal del fluido, es decir, las partículas tienen movimientos erráticos y como consecuencia de esto ocurren cambios en la cantidad de movimiento lo que genera pérdidas de energía (Singh & Heldman, 2009).

1.4.7.2.1 Fluido pseudoplástico

Este tipo de fluido se da cuando la viscosidad decrece a medida que el gradiente de velocidad aumenta. A este tipo de comportamiento se le llama “adelgazamiento por cizallamiento” (Brookfield AMETEK, 2017). Al momento de girar el huso en el fluido, la estructura de las moléculas de la muestra cambiará temporalmente y la formación de molécula estará orientada más paralela a la superficie del huso. Por lo tanto, la obstaculización de la rotación del huso disminuirá. Cuanto más rápida sea la rotación, más se destruirá la estructura y menos se deslizará la estructura de las moléculas, entonces menor será la viscosidad.

1.4.7.2.2 Fluido dilatante

Lo que caracteriza a un fluido Dilatante es el aumento de la viscosidad a medida que aumenta la velocidad de deformación. Este comportamiento de flujo también se conoce como engrosamiento de corte (Brookfield AMETEK, 2017).

1.4.8 Número de Reynolds

Es un número adimensional definido como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas. Este número resulta de mucha utilidad para la descripción cuantitativa de las características de flujo de un fluido e identificar cómo se comportará dicho fluido bajo condiciones de flujo determinadas (Singh & Heldman, 2009).

1.4.9 Viscosímetro rotacional de Brookfield

El viscosímetro de Brookfield es de tipo rotacional, mide el torque requerido para rotar un husillo sumergido en un fluido. Este husillo es accionado por un motor por medio de un resorte previamente calibrado; la desviación del resorte es indicado por un puntero y un dial. Al usar una transmisión de múltiples velocidades y husillos intercambiables es posible medir distintos rangos de viscosidad, lo que hace al instrumento muy versátil (Brookfield AMETEK, 2017).

Para una viscosidad determinada, la resistencia a fluir es proporcional a la velocidad de rotación del husillo y está relacionado con el tamaño y forma del husillo. A medida que aumente el tamaño del husillo o la velocidad de rotación, la resistencia aumentará. Para cualquier tipo de viscosímetro se obtiene el rango mínimo con el husillo más grande a la velocidad mayor y el máximo con el husillo más pequeño a la velocidad más lenta. Las mediciones con el mismo husillo a diferentes velocidades sirven para determinar las propiedades reológicas de un fluido.

1.4.10 Gradiente de velocidad

El gradiente de velocidad es una medida del cambio de la velocidad por la cual las capas intermedias se mueven una con respecto a la otra. Describe el cizallamiento que experimenta el líquido y es por esto por lo que se conoce como “velocidad de cizallamiento”. Su unidad de medida es s^{-1} (American Society of Testing Material, 2014) .

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Las propiedades reológicas del aliño son muy importantes durante la manipulación y el transporte de este producto. La viscosidad, es uno de los parámetros reológicos que mayor impacto tiene al momento de diseñar la línea de producción de un alimento.

Este capítulo presenta la caracterización reológica de este producto, así como también el análisis de la viscosidad utilizando la Ley de Potencia o Ley de Ostwald de Waele para describir el comportamiento del fluido. Además, se expone como se lleva a cabo la implementación de un sistema de succión para eliminar el abastecimiento manual de la tolva conectada a la llenadora que actualmente se utiliza en el proceso de envasado de la línea de aliños.

2.1 Reología del aliño

2.1.1 Viscosidad

Para determinar la viscosidad de las muestras de aliño se mantuvo la muestra a una temperatura constante de 24°C, la misma que es utilizada en el proceso de envasado y fue dada por la empresa. Se utilizó un viscosímetro rotacional Brookfield y un sistema de control de temperatura (Juszczak, Oczadly, & Galkowska, 2013). Las mediciones se realizaron con velocidades de deformación de 10, 20, 50 y 100 rpm para lo cual se utilizó 600 gramos de aliño y se realizaron tres repeticiones para cada uno de los gradientes de deformación previamente mencionados. Este proceso fue realizado siguiendo las instrucciones expresadas por ASTM D2196-10 (American Society of Testing Material, 2014).

2.1.2 Tipo de fluido

Para determinar el tipo de fluido se elaboró una curva de flujo con los datos obtenidos del viscosímetro rotacional a una temperatura de 24°C. Utilizando el modelo de Ostwald de Waele (Ley de la Potencia) para realizar una gráfica

logarítmica de viscosidad vs velocidad de deformación utilizando el programa EXCEL.

A partir de esta gráfica, se obtuvo la ecuación de la línea de tendencia (2.1) de la cual se obtuvo los datos de índice de consistencia “k” e índice de comportamiento de flujo “m” (Singh & Heldman, 2009). Debido a que la viscosidad no es constante y cambia en función del gradiente de velocidad, este parámetro es referido como viscosidad aparente (Ciro, 2006).

$$\mu_{aparente} = k(\dot{\gamma})^{m-1} \quad (2.1)$$

A partir de la información proporcionada por la ecuación de la gráfica, se determinó si el fluido era newtoniano o no newtoniano. En el segundo caso cuando el índice de consistencia es menor a uno, el fluido tiene un comportamiento pseudoplástico (Stover & Engineering, 2004). Sin embargo, si este es mayor a uno entonces se trata de un fluido dilatante, esta información se encuentra detallada en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Tipo de fluido según el índice de flujo [Singh & Heldman, 2009]

m	Tipo de fluido
>1	Dilatante
=1	Newtoniano
<1	Pseudoplástico

2.1.3 Tipo de flujo

Es necesario determinar la viscosidad efectiva (ecuación 2.2) para la determinación del tipo de flujo, ya que esta describe el efecto real de la viscosidad de un fluido en la bomba y sistemas de bombeo (Ciro, 2006).

$$u_{ef} = \frac{\tau_p}{8u/D} = k \left(\frac{3m+1}{4m} \right)^m \times \left(\frac{8v}{D} \right)^{m-1} \quad (2.2)$$

Una vez que se obtuvo la viscosidad efectiva, junto con la densidad, valor proporcionado por la empresa (1095,67 kg/m³), velocidad y diámetro de las tuberías que serán usadas para la prueba piloto, se utilizó la ecuación (2.3) para determinar el número de Reynolds generalizado. Este valor indicará si el fluido es

laminar, en transición o turbulento (Rao, 2014)(Ramírez, 2006)(Singh & Heldman, 2009)(Stover & Engineering, 2004). Estos datos y los rangos para la determinación del tipo de flujo pueden revisarse en la

Tabla 2. 2.

$$Re' = \frac{\rho D^m (v_m)^{2-m}}{k(8)^{m-1}} \left(\frac{4m}{3m+1} \right)^m \quad (2.3)$$

Tabla 2. 2. Tipo de flujo según el número de Reynolds [Singh & Heldman, 2009]

Re	Tipo de flujo
< 2100	Laminar
2100 – 4000	En transición
> 4000	Turbulento

2.1.4 Requerimientos para el bombeo del aliño

El requerimiento de bombeo para fluidos no newtonianos se encuentra en función de la ecuación (2.4) Cuando es flujo laminar y líquidos con adelgazamiento por cizalladura el valor α' se obtiene a partir de la ecuación (2.5) mientras que para un flujo turbulento α' es igual a 1.

$$E_p = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{1}{2\alpha'} (\bar{u}_2 - \bar{u}_1) + g(z_2 - z_1) + \frac{2f\bar{u}^2 L}{D} + C_{fe} \frac{\bar{u}^2}{2} + C_{fc} \frac{\bar{u}^2}{2} + C_{ff} \frac{\bar{u}^2}{2} \quad (2.4)$$

$$\alpha' = \frac{(2m+1)(5m+3)}{2(3m+1)^2} \quad (2.5)$$

Para el cálculo del primer término de la ecuación (2.4), la diferencia de presiones entre los extremos de una tubería con diámetro interno (0,047 m) y longitud (1,90 m) determinadas, se utilizó la ecuación (2.7).

$$\Delta P = \frac{V(128) u_{ef} L}{\pi D^4} \quad (2.6)$$

Sin embargo, para el cálculo de la diferencia de presiones se requiere conocer el caudal volumétrico utilizando la ecuación (2.7).

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (2.7)$$

Para conocer las pérdidas de presión por fricción se debe determinar el factor de fricción. Si el flujo es laminar se obtiene utilizando la ecuación (2.8). Por otro lado, si es flujo turbulento se utiliza la Figura 2.1 (Rao, 2014)(Singh & Heldman, 2009)(Ciro, 2006).

$$f = \frac{16}{Re'} \quad (2.8)$$

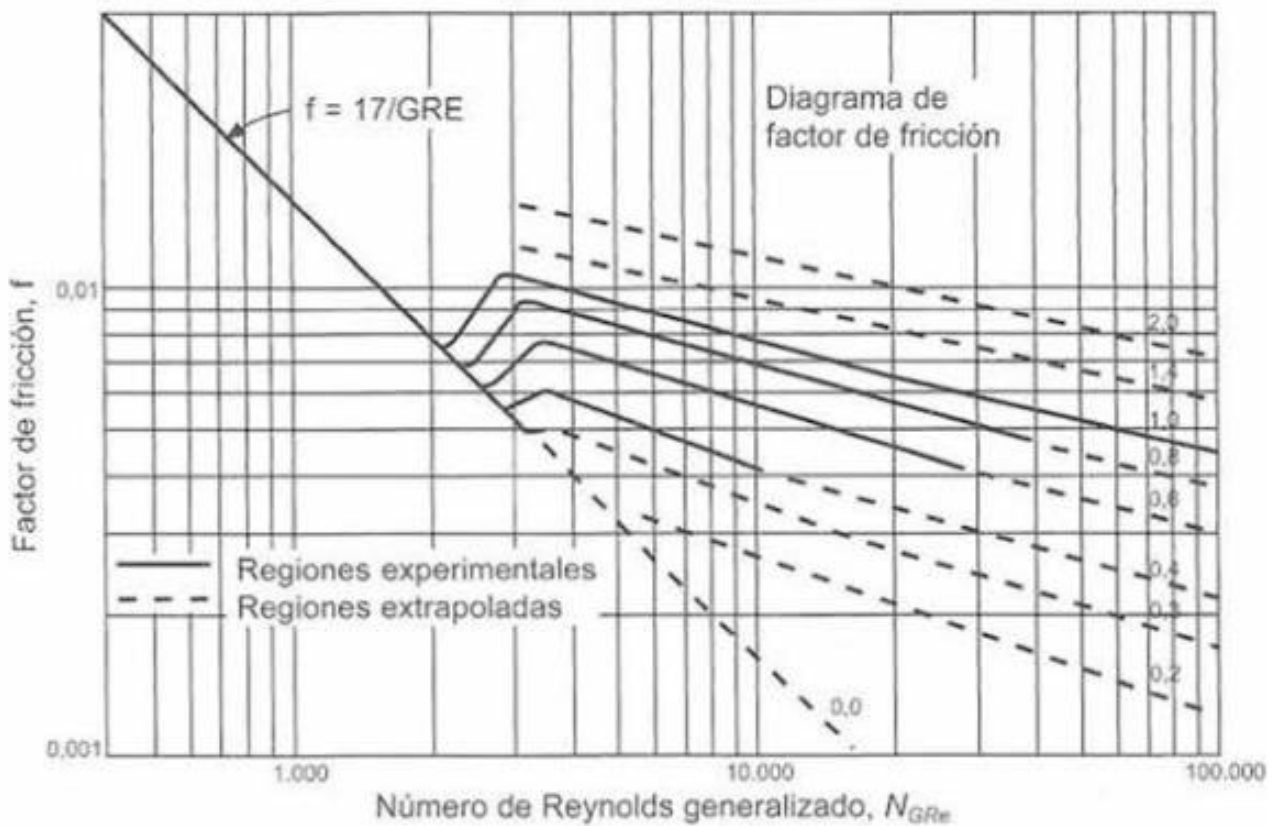


Figura 2.1. Gráfico factor de fricción número de Reynolds generalizado para fluidos no newtonianos [Singh & Heldman, 2009]

Para determinar los coeficientes C_{fe} , C_{fc} y C_{ff} para fluidos no newtonianos, se debe considerar:

1. Si el número de Reynolds generalizado > 500 , se usan los valores de fluidos Newtonianos en flujo turbulento. Donde las pérdidas energéticas por

contracción brusca C_{fc} se calcula con las ecuaciones (2.9). Las pérdidas energéticas por expansión brusca se calcularon con la ecuación (2.10) y las pérdidas energéticas por conexiones de tubería se obtuvieron de la Tabla de Pérdidas por fracción para uniones estándar en el **Apéndice A**.

$$C_{fc} = 0.4 \left[1.25 - \frac{A_2}{A_1} \right] \text{ donde } \frac{A_2}{A_1} < 0.715$$

$$C_{fc} = 0.75 \left[1 - \frac{A_2}{A_1} \right] \text{ donde } \frac{A_2}{A_1} > 0.715 \quad (2.9)$$

$$C_{fe} = \left[1 - \frac{A_1}{A_2} \right]^2 \quad (2.10)$$

- Si $20 < \text{número de Reynolds generalizado} < 500$ se determinan primero los coeficientes C_{fe} , C_{fc} y C_{ff} como en el paso 1 y luego se utilizan las ecuaciones (2.11).

$$C'_{fe} = \frac{500 \times C_{fe}}{Re'}$$

$$C'_{fc} = \frac{500 \times C_{fc}}{Re'} \quad (2.11)$$

$$C'_{ff} = \frac{500 \times C_{ff}}{Re'}$$

2.2 Prueba piloto

2.2.1 Implementación de la adaptación y funcionamiento

Actualmente la empresa cuenta con un sistema de llenado que utiliza una llenadora de pistón semiautomática, cuya alimentación es realizada manualmente en una tolva que se encuentra en la parte superior del equipo, como se observa en la **Figura 2.2**.



Figura 2. 2. Sistema de llenado de botellas actual [Elaboración propia]

Para el desarrollo de la prueba piloto se utilizó 1,90 metros de tubería que corresponden a 2 tubos de 0,99 y 0,57 m conectados con 2 codos de 90° de 0,17 cm cada uno. También se utilizaron 4 empaques y 4 agarraderas y un soporte. Tanto las tuberías, como los accesorios son lisos y de acero inoxidable, estos se encuentran en la **Figura 2. 3**. Estas tubería y accesorios fueron adaptadas al equipo de llenado.

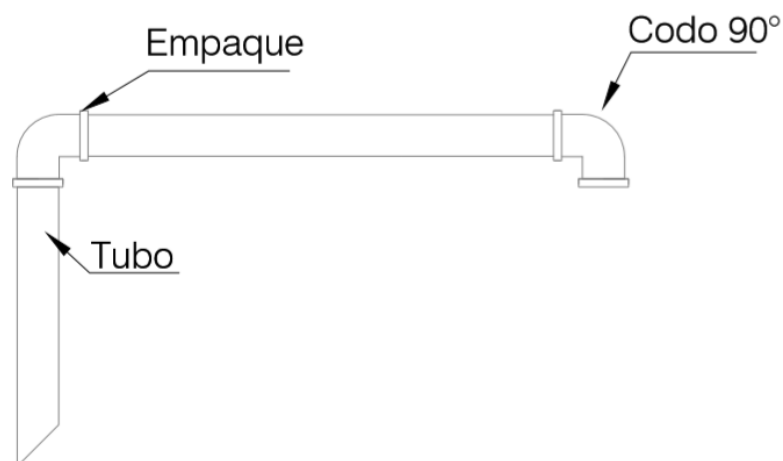


Figura 2. 3. Esquema de la adaptación para el sistema de llenado [Elaboración propia]

El uso de este sistema permitirá eliminar la alimentación manual de la tolva ya que por succión el aliño sería llevado directamente desde el tanque de almacenamiento a la llenadora si se comprueba que la presión ejercida por el pistón es suficiente para transportar el aliño desde el tanque donde se encuentra almacenado hasta la boquilla llenadora.

Es importante mencionar que el tanque inicialmente tiene 180 kg de producto y que este no es abastecido hasta que el mismo se acaba. Por esto, se realizó la prueba a tres diferentes niveles del fluido (80, 40 y 20 cm) con una presión de 3,1 psi con diferentes presentaciones (400 y 500 g) para determinar si esto tiene o no un efecto en la succión del producto.

La tubería se colocó a 7 cm del fondo del tanque y la temperatura del aliño es de 24°C, como ya se mencionó en secciones anteriores esta es la temperatura establecida para el proceso.

2.2.2 Análisis de los datos obtenidos en la prueba piloto

Para el análisis de los datos obtenidos a partir de la prueba piloto se realizó un diseño factorial completo general (Mitra, 2008)(Montgomery, 2004). Donde los factores son peso promedio de las botellas y altura del fluido, los niveles son 0,450, 0,500 kg y 80, 40, 20 cm respectivamente, la variable de respuesta es el número de botellas por minuto, como se encuentra detallado en la **Tabla 2.3**. Además, es importante mencionar que cada experimentación se realizó con tres repeticiones.

Tabla 2. 3. Datos del diseño factorial [Elaboración propia]

Peso promedio de las botellas (kg)	Altura del fluido (cm)		
	80	40	20
0,450	Número de botellas (unidades/minuto)		
0,500			

Para realizar este diseño factorial se utilizó la herramienta Minitab, de donde se obtuvo el valor p para determinar si los factores y su interacción tienen o no un efecto significativo en la variable de respuesta, esto se realizó utilizando la **Tabla 2. 4** como referencia (Montgomery, 2004).

Tabla 2. 4. Condiciones para el valor p [Elaboración propia]

Condición	Resultado
$p < 0,05$	Hay un efecto significativo
$p > 0,05$	No hay efecto significativo

Para este análisis se consideró la Hipótesis nula (H_0) como “Los factores no tienen un efecto significativo en la variable de respuesta” y la Hipótesis alterna (H_1) como “Los factores si tienen un efecto significativo en la variable de respuesta”.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Reología del aliño

3.1.1 Viscosidad

Los resultados de viscosidad obtenidos por el viscosímetro de Brookfield se encuentran en la **Tabla 3.1**. Según estos datos, se puede decir que la viscosidad presenta un comportamiento decreciente mientras el gradiente de velocidad incrementa. De manera que la viscosidad no es constante, lo que permite suponer que el fluido es no newtoniano y por esto se utilizó la viscosidad aparente para el análisis de este fluido (Felipe et al., 2005)(Rao, 2014)(Ciro, 2006)(Benmouffok-benbelkacem, Caton, Baravian, & Skali-Lami, 2010). Sin embargo, esto se comprobará en la siguiente sección de este capítulo. Cabe destacar que los datos proporcionados por el viscosímetro fueron obtenidos con la muestra de aliño a una temperatura de 24°C, temperatura de llenado establecida por la empresa.

Tabla 3.1. Resultados obtenidos de la prueba de viscosidad [Elaboración propia]

Gradiente de velocidad (1/s)	Viscosidad (Pa.s)		
	0.166	9.215	9.360
0.333	6.568	6.520	6.592
0.833	4.100	4.007	3.917
1.666	2.900	2.910	2.962

3.1.2 Tipo de fluido

A partir de los datos de viscosidad presentados en la **Tabla 3.1** se procedió a realizar tres curvas curva de viscosidad vs velocidad de deformación la misma que se puede observar en la **Figura 3.1**. Observando la gráfica, se puede señalar que el fluido presenta un comportamiento pseudoplástico, lo que al mismo tiempo indica que el fluido es no newtoniano como se mencionó en la sección anterior (Ciro, 2006; Juszczak et al., 2013; Rao, 2014; Singh & Heldman, 2009; Slatter, 1997). Sin embargo, para verificar esta información se generó la línea de tendencia para posteriormente obtener la ecuación de esta.

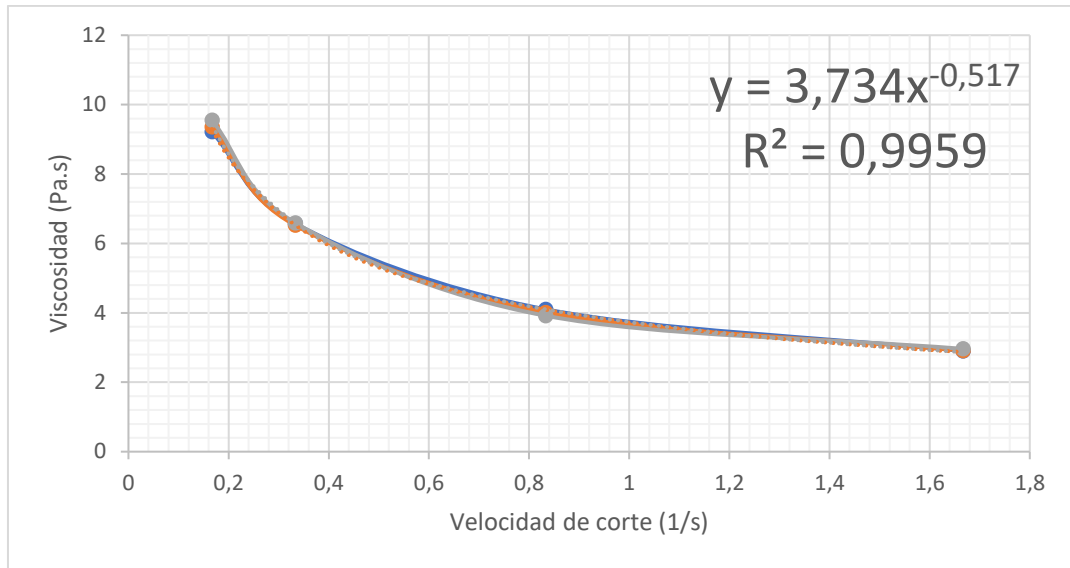


Figura 3. 1. Curva de viscosidad aparente vs velocidad de deformación [Elaboración propia]

A partir de la **Figura 3.1**, se obtuvo la ecuación (3.1), la misma que tiene la forma de la ecuación (2.1) propuesta por Ostwald de Waele para explicar el tipo de fluido.

$$y = 3,734x^{-0,517} \quad (3. 1)$$

Utilizando la ecuación (3.1) se determinó que los valores del índice del comportamiento de flujo y el índice de consistencia son 0,483 y 3,734 Pa.s respectivamente. Por lo tanto, en contraste con la información presentada en la Tabla 2.1, que señala que, si el valor de m es menor a 1, entonces el fluido es pseudoplástico. Por esto, se determinó que a 24°C la muestra de aliño es un fluido no newtoniano con el comportamiento de un fluido pseudoplástico.

Las gráficas para cada una de las pruebas realizadas pueden observarse en el **Apendice B**.

3.1.3 Tipo de flujo

A partir de la información obtenida en la sección anterior, se corroboró que la viscosidad del fluido disminuye a medida que la velocidad de deformación

aumenta. En otras palabras, a medida que se incrementa la velocidad de corte, el aliño se vuelve más fluido.

Para determinar el tipo de flujo que presenta el producto se calculó la viscosidad efectiva con los datos de los índice de consistencia y de comportamiento de flujo junto con el diámetro de la tubería que se utilizará en la prueba piloto y la velocidad media del fluido mostrados en la **Tabla 3. 2**. Se determinó que el valor de la viscosidad efectiva del aliño es de 5,489 Pa.s.

Tabla 3. 2. Datos utilizados para determinar el tipo de flujo [Elaboración propia]

Índice de consistencia	3,743 Pa.s
Índice de comportamiento de flujo	0,483
Caudal másico	0,25 kg/s
Velocidad media	0,151 m/s
Diámetro de la tubería	0,047 m

Además, utilizando la ecuación ((2.7) utilizando un caudal másico, el mismo que fue proporcionado por la empresa se determinó el número de Reynolds generalizado, el mismo que es 8,067 y según la literatura cuando el número de Reynolds es menor a 2100 el fluido tiene un comportamiento laminar (Singh & Heldman, 2009)(Ciro, 2006)(Slatter, 1997).

Debido a que el fluido presenta un comportamiento laminar, se utilizó la ecuación (2.8) para encontrar el factor de fricción, el mismo que resultó ser 1,983. Así mismo se calculó la diferencia de presiones utilizando la ecuación (2.6) para determinar la diferencia de presiones, se obtuvo que esta es 19872,526 Pa.

Como el fluido es laminar, se requiere determinar el coeficiente de adelgazamiento por cizalladura con la ecuación (2.5), el mismo cuyo cálculo indicó que es de 0,887. Este valor se utilizó para realizar el cálculo del requerimiento de bombeo en la ecuación (2.4).

Para esto se calcularon las pérdidas de energía por presión, energía cinética, energía potencial y las pérdidas por fricción a causa de los accesorios utilizados, los datos obtenidos se encuentran en la tabla.

Tabla 3. 3. Datos utilizados para calcular requerimiento de bombeo [Elaboración propia]

Energía de presión		18,137 Pa	
Energía cinética		0,111 Pa	
Energía potencial		826,200 Pa	
Pérdidas por fricción	Ef mayor	21,088 Pa	
	Ef menor	Por contracción	30,898 Pa
		Por conexiones de tubería	0,214 Pa

3.2 Prueba piloto

3.2.1 Implementación de la adaptación y funcionamiento

Una vez conectada la tubería como se puede observar en la **Figura 3. 2**. El sistema funcionó casi de inmediato. Sin embargo, se debe mencionar que requiere de un tiempo de ajuste ya que es necesario purgar el aire que se encuentra en el sistema. Luego de este ajuste, se llevaron a cabo las tres corridas experimentales de donde se obtuvo los datos expresados en la **Tabla 3.4**.

Tabla 3. 4. Datos de la experimentación [Elaboración propia]

Nivel de fluido (m)	Número de botellas			Peso promedio (kg)
0,8	29	29	29	0,450
0,4	29	29	29	
0,2	29	28	29	
0,8	24	24	25	0,500
0,4	24	24	24	
0,2	25	24	24	



Figura 3. 2. Sistema de llenado con la nueva adaptación [Elaboración propia]

3.3 Análisis de los datos obtenidos en la prueba piloto

Con los datos de la **Tabla 3.4**, se realizó el diseño factorial en la herramienta Minitab y se obtuvo la **Figura 3. 3** y **Figura 3. 4**.

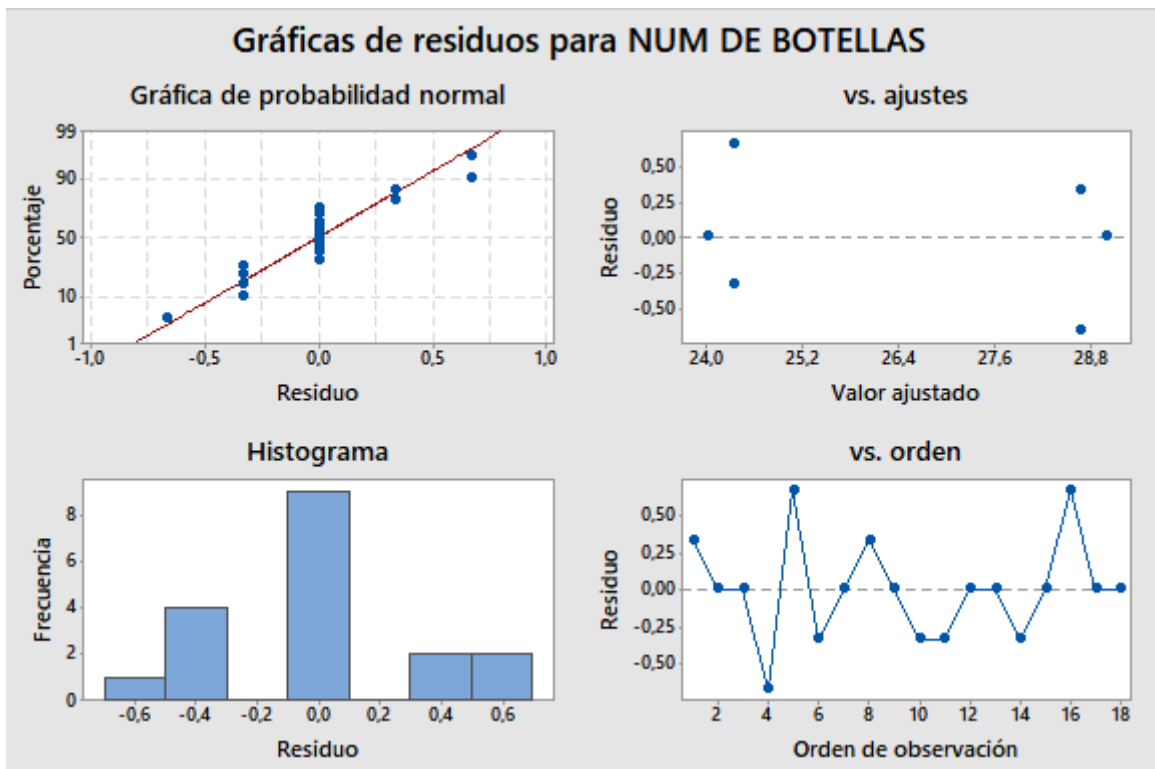


Figura 3. 3. Gráfica de residuos para el número de botellas [Elaboración propia]

A partir de la **Figura 3. 3** se puede determinar que se cumplen los supuestos de normalidad, aleatoriedad e independencia. Con la información proporcionada por **Figura 3. 4**, se comparó el valor p para cada uno de los factores, así como sus interacciones y se determinó que el factor peso si tiene efecto significativo en la variable de respuesta ($p < 0,05$). Sin embargo, el nivel del fluido y la interacción entre los dos factores no ($p > 0,05$) como señala la **Tabla 2. 4**.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	98,444	19,6889	118,13	0,000
Lineal	3	98,111	32,7037	196,22	0,000
PESO	1	98,000	98,0000	588,00	0,000
NIVEL DEL FLUIDO	2	0,111	0,0556	0,33	0,723
Interacciones de 2 términos	2	0,333	0,1667	1,00	0,397
PESO*NIVEL DEL FLUIDO	2	0,333	0,1667	1,00	0,397
Error	12	2,000	0,1667		
Total	17	100,444			

Figura 3. 4. Resultados prueba Minitab [Elaboración propia]

Por lo tanto, se rechaza la Hipótesis nula para el factor peso, ya que su valor p es de 0,000 señalando que si tiene un efecto significativo en el número de unidades envasadas por minuto. Esto se puede comprobar con la **Figura 3. 5** donde se observa que el nivel de fluido no tiene mayor influencia en el número de botellas, mientras que el peso promedio de las botellas si afecta directamente en el número de unidades envasadas por minuto.

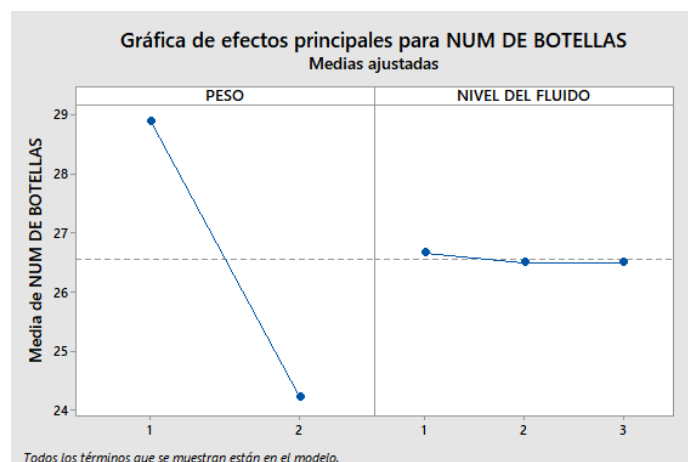


Figura 3. 5. Gráfica de efectos principales para el número de botellas [Elaboración propia]

3.4 Estimación de costos

Como se mencionó en el capítulo dos para la implementación de la adaptación del sistema de llenado fue necesario utilizar dos codos de 90° y dos tubos de acero inoxidable de 0,99 y 0,56 metros. La compra de estos materiales tiene un costo de \$150. Además, para el corte de la tubería se requirió del servicio de un tornero mecánico cuyo costo fue de \$50. La instalación de la tubería tuvo un tiempo estimado de 15 minutos y se realizó una capacitación al personal encargado de la operación para demostrar cómo debe ser armada y desarmada la adaptación para su uso y limpieza. Estas acciones tuvieron un costo de \$5,15. Por lo tanto, la inversión total para la construcción e instalación de esta tubería tuvo un costo de \$205,15.

Actualmente la etapa de llenado del proceso cuenta con siete personas de las cuales, una se dedica al abastecimiento de la tolva conectada a la llenadora. Esta persona tiene una remuneración mensual de \$420,66 trabajando 8 horas diarias durante 5 días a la semana. De manera que, el costo hora/hombre es de \$2,29.

Asumiendo que, una vez implementado el proyecto, se retira a la persona encargada de abastecer la tolva manualmente, es necesario que la línea esté en funcionamiento durante 11 días, 1 hora y 36 minutos para recuperar la inversión realizada al comprar, instalar y capacitar al personal encargado. Además, la empresa tendría un ahorro anual de \$5047,92 al año.

Tabla 3. 5. Tabla comparativo operario vs inversión [Elaboración propia]

OPERARIO		INVERSIÓN	
Días LABORABLES/MES:	23 días	Tiempo de instalación/capacitación:	0.75 horas
HORAS LABORABLES/días:	8 horas	Materiales:	\$150
Valor por hora laborable:	\$2.29	Tornero:	\$50
		Instalación y capacitación	\$5,15
Sueldo mensual:	\$420.66	Total inversión:	\$205.15

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- La caracterización reológica del producto permitió concluir que el aliño a una temperatura de 24°C es un fluido no newtoniano, pseudoplástico y que bajo las condiciones actuales de envasado presenta el comportamiento de un flujo laminar.
- El conocimiento de las características reológicas del producto permitió realizar los cálculos necesarios para determinar que las tuberías y accesorios previstos para el desarrollo de la prueba piloto eran los adecuados para este tipo de producto.
- Actualmente el equipo opera a una presión de 2,137 kPa y los datos obtenidos en el presente trabajo señalan que para el bombeo de este fluido es necesario tener una presión mínima de 0,865 kPa. Por esto, se puede concluir que el equipo en las condiciones actuales puede bombear el fluido desde el tanque de almacenamiento hasta la boquilla llenadora sin la necesidad de implementar una bomba en el proceso.
- El diseño factorial permitió determinar que el parámetro que afecta al número de botellas por minuto es el peso promedio de llenado. Gracias a esto, se puede concluir que entre mayor sea el peso promedio de llenado, menor es la cantidad de botellas llenas.
- La implementación de esta adaptación elimina la necesidad de realizar el abastecimiento manual de la tolva, lo que a su vez disminuye el riesgo de lesiones en el operario encargado de esta actividad, así como también del riesgo de contaminación cruzada cumpliendo de esta manera con las buenas prácticas de manufactura.

- La implementación de esta adaptación supone la eliminación de un operario de la línea lo que representaría un ahorro anual de \$5047,92 para la empresa. O en otro caso, este operario podría ser asignado a otra actividad que incremente el rendimiento de la línea.
- De realizarse la implementación de este sistema, el tiempo estimado de recuperación de la inversión es de 11 días, 1 hora y 36 minutos comparando los datos con los costos generados por tener a un operario realizando la alimentación manual de la tolva.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar un análisis de la viscosidad y de cómo esta varía en función de la temperatura en caso de que se desee cambiar la temperatura de llenado en el futuro.
- Se recomienda la implementación de una tapa que cubra la parte superior del tanque de almacenamiento para proteger al producto. Debido a que al estar abierto este se encuentra expuesto a la contaminación.
- Debido a la alta concentración de sodio en el producto se recomienda tener las consideraciones necesarias para realizar la correcta limpieza de las tuberías y accesorios para de esta manera evitar la formación de películas en la tubería lo que podría causar incrustaciones que podrían afectar el movimiento del fluido.
- Se recomienda realizar una purga al inicio del proceso para eliminar el aire que se encuentra en la tubería y que el pistón pueda realizar su función correctamente.

BIBLIOGRAFÍA

- American Society of Testing Material. (2014). Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer. *ASTM*, 43(557), 1–5. <https://doi.org/10.1520/D2196-10.2>
- Benmouffok-benbelkacem, G., Caton, F., Baravian, S., & Skali-Lami, C. (2010). Non-linear viscoelasticity and temporal behavior of typical yield stress fluids : Carbopol , Xanthan and Ketchup. *Rheologica Acta*, 49(3), 305–314.
- Brookfield AMETEK. (2017). *More solutions to sticky problems*.
- Ciro, H. (2006). *REOLOGÍA DE FLUIDOS Y SU APLICACION EN EL AREA DE LOS ALIMENTOS*.
- Del Greco, N. I. (2010). Estudio sobre tendencias de consumo de alimentos, 1.
- Felipe, J., Tobón, O., & Mejía, L. G. (2005). CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA Y TEXTURAL DEL QUESO EDAM RHEOLOGICAL AND TEXTURAL CHARACTERIZATION OF THE EDAM CHEESE. *Universidad Nacional de Colombia*, 147, 33–45.
- Juszczak, L., Oczadly, Z., & Galkowska, D. (2013). Effect of Modified Starches on Rheological Properties of Ketchup. *Food and Bioprocess Technology*, 6(5), 1251–1260.
- Mitra, A. (2008). *Introduction to quality control and improvement*.
- Montgomery, D. (2004). *DISEÑO Y ANALISIS DE EXPERIMENTOS*.
- Ramírez, J. (2006). *Fundamentos de Reología de Alimentos*.
- Rao, M. A. (2014). *Rheology of Fluid, Semisolid and Solid Foods*.
- Singh, P., & Heldman, D. (2009). Introducción a la ingeniería de los alimentos.
- Slatter, P. T. (1997). THE RHEOLOGICAL CHARACTERIZATION OF SLUDGES. *Water Science and Technology*, 36(11), 9–18. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00663-X](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00663-X)
- Stover, C., & Engineering, C. (2004). Effect of Corn Stover Concentration on Rheological

Characteristics, 113.

APÉNDICES

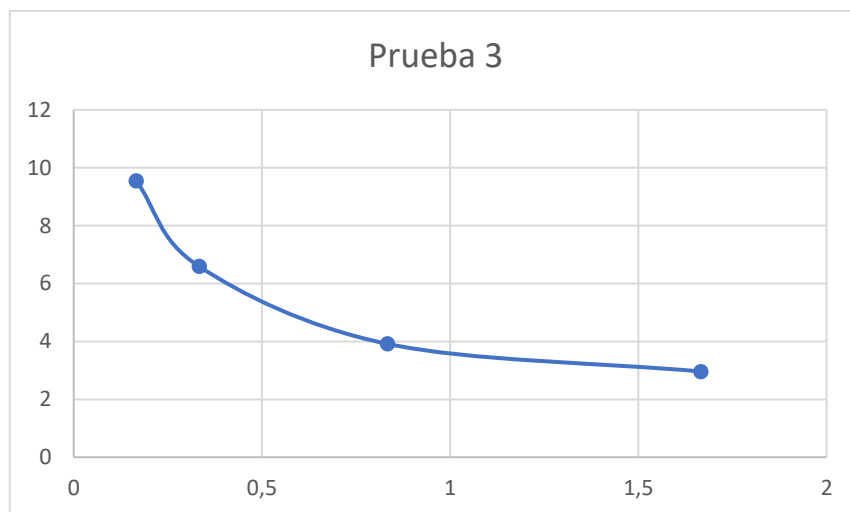
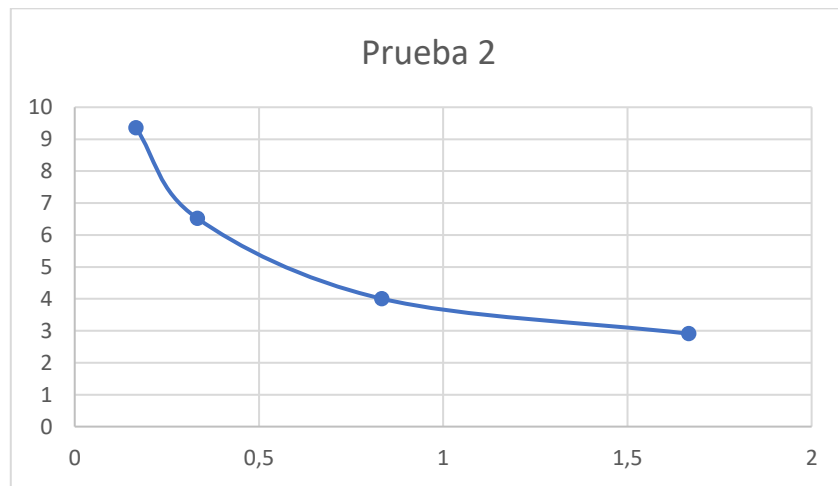
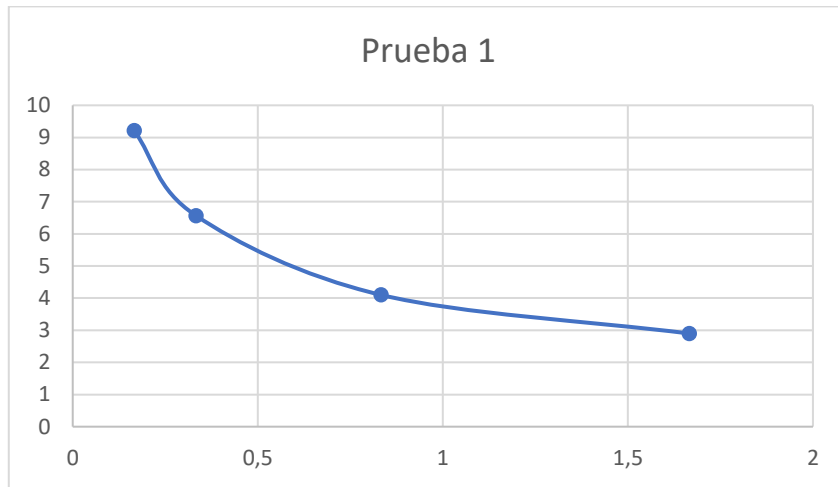
Apéndice A

TABLA 2.2 Pérdidas por fricción para uniones estándar.

Tipo de unión	C_{ff}
Codos gran curvatura	
De 45°, fileteado	0,2
De 90°, con brida	0,7
De 90°, fileteado	0,2
De curvatura normal 45°, fileteado	0,4
De curvatura normal 90°, con brida	0,3
De curvatura normal 90°, fileteado	1,5
De retorno 180°	
De retorno 180°, con brida	0,2
De retorno 180°, fileteado	1,5
Tes	
Flujo en te, con brida	1,0
Flujo de te, fileteado	2,0
Flujo en línea, con brida	0,2
Flujo en línea, fileteada	0,9
Unión, fileteado	0,8
Válvulas	
En ángulo completamente abierto	2
De bola cerrada, 1/3	5,5
De bola cerrada, 2/3	210
De bola completamente abierta	0,05
De diafragma, abierta	2,3
De diafragma, 1/4 cerrada	2,6
De diafragma, 1/2 cerrada	4,3
De compuerta, 3/4 cerrada	17
De compuerta, 1/4 cerrada	0,26
De compuerta, 1/2	2,1
De compuerta, completamente abierta	0,15
De globo, completamente abierta	10
De doble sentido, flujo en sentido inverso	∞
De doble sentido, flujo en sentido directo	2

[Singh & Heldman, 2009]

Apéndice B



[Elaboración propia]

Apéndice C

Índice de consistencia:

$$m - 1 = -0,517$$

$$m = 1 - 0,517$$

$$m = 0,483 < 1$$

Velocidad media

$$v_m = \frac{0,25 \text{ kg/s}}{1095,66 \text{ kg/m}^3 \pi \left(\frac{0,047 \text{ m}}{2} \right)^2}$$

$$v_m = 0,1315 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Número de Reynolds

$$Re' = \frac{1095,66 \text{ kg/m}^3 (0,1315 \text{ m/s})^{2-0,483} 0,047^{0,483}}{3,734(8)^{(0,483-1)}} \times \left(\frac{4(0,483)}{3(0,483) + 1} \right)^{(0,483)}$$

$$Re' = 8,067$$

Factor de fricción/número de Fanning

$$f = \frac{16}{8,067}$$

$$f = 1,983$$

Viscosidad efectiva

$$u_{ef} = 3,7343 \text{ Pa.s} \left(\frac{3(0,517) + 1}{4(0,517)} \right)^{0,517} \times \left(\frac{4(0,517)}{3(0,517) + 1} \right)^{0,517-1}$$

$$u_{ef} = 5,489 \text{ Pa.s}$$

Diferencia de presiones

$$\Delta P = \frac{\forall(128) u_{ef} L}{\pi D^4}$$

$$\Delta P = \frac{0,000228 \text{ m}^3 / 2 (128) (0,0062 \text{ Pa.s}) (1,9 \text{ m})}{\pi (0,047 \text{ m})^4}$$

$$\Delta P = 19872,526 \text{ Pa}$$

Coefficiente de adelgazamiento por cizalladura

$$\alpha' = \frac{(2(0,483) + 1)(5(0,483) + 3)}{2(3(0,483) + 1)^2}$$

$$\alpha' = 0,887$$

Requerimiento de bombeo

$$E_p = \frac{19872,526 \text{ Pa.s}}{1095,66 \text{ kg/m}^3} + \frac{1}{2(0,887)} (0,1315 \text{ m/s} - 0) + 9,18 \text{ m/s}^2 (90 - 0)$$

$$+ \frac{2(1,983)(0,1315 \text{ m/s}) (1,90 \text{ m})}{0,047 \text{ m}} + 0 + 0,214 \text{ Pa} + 0,214 \text{ Pa}$$

$$E_p = 865,860 \text{ Pa}$$

[Singh & Heldman, 2009]