



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE UN SERPENTÍN HELICOIDAL SOBRE LA RELACIÓN  
ESPUMA-CERVEZA (TIPO LAGER) Y SOBRE EL FLUJO DE CERVEZA EN UN  
DISPENSADOR DE CERVEZA DE BARRIL**

**Miguel Ángel Mendoza Barrientos**  
Asesorado por Ing. Federico Salazar

Guatemala, agosto de 2011



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE UN SERPENTÍN HELICOIDAL SOBRE LA RELACIÓN  
ESPUMA-CERVEZA (TIPO LAGER) Y SOBRE EL FLUJO DE CERVEZA EN UN  
DISPENSADOR DE CERVEZA DE BARRIL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MIGUEL ÁNGEL MENDOZA BARRIENTOS**  
ASESORADO POR EL ING. FEDERICO SALAZAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2011



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma de Martini
EXAMINADOR	Ing. Williams Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **EVALUACIÓN DEL EFECTO DE UN SERPENTÍN HELICOIDAL SOBRE LA RELACIÓN ESPUMA-CERVEZA (TIPO LAGER) Y SOBRE EL FLUJO DE CERVEZA EN UN DISPENSADOR DE CERVEZA DE BARRIL**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería en Química, con fecha 12 de mayo de 2009.

Miguel Ángel Mendoza Barrientos





## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Porque a él me debo y todo cuanto tengo.
- Mis padres** Maclovia y Felipe, por su apoyo incondicional durante mi carrera, durante la realización de este trabajo, pero principalmente por su amor, dedicación y esfuerzo durante toda mi existencia.
- Mis hermanos** Julia y Luis, por su constante ayuda e impulso para seguir adelante. Que reciban más bendiciones junto con sus respectivas familias.
- Mis sobrinos** José Miguel, Mónica, Isabel y Gabriel para que se superen cada día y desarrollen su vida para el beneficio propio, de la familia y de Guatemala.
- Mis abuelos, tíos, tías y demás familia** Por su ayuda moral y emocional, por sus consejos. En general este logro lo dedico a todos los míos.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Mis centros de estudio**

A la Escuela Nacional Central de Agricultura, mi otra Alma Mater, por formarme académica y moralmente y en donde aprendí a ser independiente. Al Instituto Leonidas Mencos Ávila por su excelente formación académica. A la Facultad de Ingeniería por haberme dado las herramientas necesarias para mi desempeño profesional.

**Vicepresidencia de bebidas**

Por haber permitido el desarrollo de este estudio y por haber suministrado los recursos físicos y técnicos.

**Amigos y compañeros de trabajo**

Por su apoyo a lo largo de todos estos años y por brindarme su amistad cada día.

**Ing. Federico Salazar**

Por su valiosa ayuda para llevar a cabo este trabajo de graduación.

**Guatemala**

Porque toda mi educación se la debo al pueblo de Guatemala, espero retribuir su aporte a lo largo de mi vida.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Formación de espuma.....	1
1.2 La espuma de la cerveza.....	5
1.3 Sirviendo cerveza.....	6
1.3.1 Formación de la burbuja.....	8
1.3.2 Cremosidad.....	9
1.3.3 Drenado.....	11
1.3.4 Desproporción: maduración de Ostwald.....	12
1.4 La química de la espuma de la cerveza.....	14
1.5 Fenómenos de flujo de fluidos.....	16
1.6 Flujo de fluidos a través de un serpentín helicoidal.....	18
1.6.1 Desempeño hidráulico en tubos helicoidales.....	22
1.6.2 Patrones de flujo.....	25
1.6.3 Pérdida de presión en un serpentín helicoidal.....	29
1.7 Equipo para dispensar cerveza de barril.....	30
1.7.1 Cilindro para gas carbónico.....	30
1.7.2 Regulador de presión.....	31

1.7.3	Mangueras.....	32
1.7.4	Barril o keg.....	33
1.7.5	Cabezal.....	34
1.7.6	Equipo enfriador-dispensador.....	34
1.7.7	Torre y grifos.....	36
1.8	Funcionamiento del sistema de servido.....	37
1.9	Teoría sobre el servido de la cerveza.....	38
1.9.1	Transferencia de calor entre el ambiente y el serpentín helicoidal.....	40
2.	<b>DISEÑO METODOLÓGICO</b>	
2.1	Variables.....	41
2.1.1	Dimensiones del serpentín.....	41
2.1.2	Presión en el sistema de servido.....	41
2.1.3	Temperatura.....	41
2.1.4	Flujo.....	42
2.1.5	Volumen de espuma.....	43
2.2	Delimitación del campo de estudio.....	43
2.3	Recursos humanos disponibles.....	44
2.4	Recursos materiales disponibles.....	44
2.4.1	Instrumentos.....	44
2.4.2	Equipo de medición.....	45
2.4.3	Insumos.....	45
2.4.4	Recursos físicos.....	45
2.5	Técnica cualitativa cuantitativa.....	46
2.6	Recolección y ordenamiento de la información.....	46
2.6.1	Sin serpentín.....	46
2.6.2	Con serpentín.....	47
2.7	Tabulación, ordenamiento y proceso de la información....	49

2.8	Análisis estadístico.....	53
3.	RESULTADOS.....	57
4.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	61
	CONCLUSIONES.....	69
	RECOMENDACIONES.....	71
	REFERENCIAS.....	73
	BIBLIOGRAFÍA.....	77
	APÉNDICES.....	79
	ANEXOS.....	97





## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Mecanismos de estabilización de proteínas y surfactantes.....	5
2. Método de servido de la cerveza.....	7
3. Esquema de un tubo enrollado helicoidalmente y del flujo secundario en una vista de la sección transversal .....	19
4. Definición del sistema de coordenadas toroidal con ilustración de las líneas de corriente de flujo transversal.....	20
5. Modelo imaginario del flujo secundario en la sección de un tubo helicoidal.....	23
6. Flujo secundario para Números de Dean altos y bajos.....	24
7. Bosquejo indicando las regiones de flujo en la sección transversal de un serpentín.....	28
8. Tanque para gas carbónico.....	31
9. Regulador de presión.....	32
10. Manguera para uso en cerveza de barril.....	33
11. Barril o Keg.....	33
12. Cabezal.....	34
13. Componentes de un equipo enfriador (marca Celli).....	35
14. Torre y grifos.....	36
15. Sistema de dispensamiento para cerveza de barril.....	37
16. Procedimiento experimental.....	48
17. Procedimiento para el análisis de datos.....	53

18.	Relación entre la longitud del serpentín vrs. el flujo volumétrico de cerveza-espuma para un diámetro interno de 8 mm y diámetro de espira de 20, 15, 12 y 8 cm. ....	79
19.	Relación entre la longitud del serpentín vrs. el flujo volumétrico de cerveza-espuma para un diámetro interno de 6 mm y diámetro de espira de 20, 15, 12 y 8 cm.....	78
20.	Relación entre la longitud del serpentín vrs. el flujo volumétrico de cerveza-espuma para un diámetro interno de 4 mm y diámetro de espira de 20, 15, 12 y 8 cm. ....	80
21.	Relación entre la longitud del serpentín vrs. el porcentaje de espuma para un diámetro interno de 8 mm y diámetro de espira de 20, 15, 12 y 8 cm. ....	81
22.	Relación entre la longitud del serpentín vrs. el porcentaje de espuma para un diámetro interno de 6 mm y diámetro de espira de 20, 15, 12 y 8 cm.....	82
23.	Relación entre la longitud del serpentín vrs. el porcentaje de espuma para un diámetro interno de 4 mm y diámetro de espira de 20, 15, 12 y 8 cm. ....	83
24.	Número de Reynolds (Re) y Número de Reynolds crítico (Recrit) para diferentes longitudes de serpentín y diferentes diámetros de espira, para un diámetro interno de tubo de 8 mm.....	84
25.	Número de Reynolds (Re) y Número de Reynolds crítico (Recrit) para diferentes longitudes de serpentín y diferentes diámetros de espira, para un diámetro interno de tubo de 6 mm.....	85
26.	Número de Reynolds (Re) y Número de Reynolds crítico (Recrit) para diferentes longitudes de serpentín y diferentes diámetros de espira, para un diámetro interno de tubo de 4 mm .....	86
27.	Flujo de cerveza en función de diferentes longitudes y diámetros de espira de un serpentín con 8 mm diámetro interno de tubo .....	87

28.	Flujo de cerveza en función de diferentes longitudes y diámetros de espira de un serpentín con 6 mm diámetro interno de tubo .....	88
29.	Flujo de cerveza en función de diferentes longitudes y diámetros de espira de un serpentín con 4 mm diámetro interno de tubo.....	89
30.	Número de Dean (De) en función de diferentes longitudes y diámetros de espira con 8 mm diámetro interno de tubo.....	90
31.	Número de Dean (De) en función de diferentes longitudes y diámetros de espira con 6 mm diámetro interno de tubo.....	91
32.	Número de Dean (De) en función de diferentes longitudes y diámetros de espira con 4 mm diámetro interno de tubo.....	92
33.	Comparación visual entre el flujo de salida para un grifo sin serpentín y uno con serpentín para un mismo barril de cerveza .....	94
34.	Comparación visual para el porcentaje de espuma obtenido. Sin serpentín y con serpentín para un mismo barril de cerveza .....	94
35.	Uno de los modelos de serpentín probados.....	95

## TABLAS

I. Diámetros, longitudes de tubo y diámetros de espira utilizados para cada modelo de serpentín y los resultados obtenidos en cada corrida (flujo total, temperatura, porcentaje de espuma), así como el caudal, el Número de Reynolds y Número de Reynolds crítico y Número de Dean.....	51
II. Resumen de las mejores configuraciones de acuerdo al desempeño para la disminución de espuma.....	54
III. Resumen de las mejores configuraciones de serpentín de acuerdo con el criterio del desempeño en la disminución de espuma y el desempeño en el flujo de cerveza-espuma.....	55
IV. Resumen de las ecuaciones que relacionan el porcentaje de espuma con la longitud del tubo del serpentín para cada diámetro de espira y cada diámetro de tubo interno.....	58
V. Resumen de las ecuaciones que relacionan el flujo total de cerveza-espuma con la longitud del tubo del serpentín para cada diámetro de espira y cada diámetro de tubo interno.....	59

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<b>g</b>	Aceleración debida a la gravedad ( $m/s^2$ )
<b><math>a_n^o</math></b>	Actividad inicial en el sitio de nucleación
<b><math>\theta</math></b>	Ángulo toroidal
<b>A</b>	Área de la sección transversal del tubo ( $m^2$ )
<b>Z</b>	Coefficiente de difusión del gas ( $m^2/s$ )
<b>R</b>	Constante de los gases ( $8.314 J K^{-1}mol^{-1}$ )
<b>C</b>	Contenido de dióxido de carbono (vol de $CO_2$ /vol de cerveza)
<b><math>\rho</math></b>	Densidad ( $kg/m^3$ )
<b>D</b>	Diámetro de la espira del serpentín (cm)
<b>d</b>	Diámetro interno tubo del serpentín (mm)
<b><math>\delta</math></b>	Espesor de la película (m)
<b><math>\Phi</math></b>	Espesor de la película entre burbujas. Ángulo poloidal en la sección transversal del tubo

<b>k</b>	Factor de corrección para un serpentín para el factor de fricción (adimensional)
<b>f</b>	Factor de fricción en tubo recto (adimensional)
<b>fc</b>	Factor de fricción para tubos curvos (adimensional)
<b>Q</b>	Flujo de cerveza ( $m^3/s$ , L/min)
<b>F'</b>	Flujo sin espuma ( $m^3/s$ , L/min)
<b>F</b>	Flujo total (espuma+cerveza, $m^3/s$ , L/min)
<b>q</b>	Longitud de la frontera de Plateau (m)
<b>L</b>	Longitud del serpentín o tubo (m)
<b>De</b>	Número de Dean (adimensional)
<b>Re</b>	Número de Reynolds (adimensional)
<b>Re<sub>crit</sub></b>	Número de Reynolds crítico (adimensional)
<b>%E</b>	Porcentaje de espuma
<b>P</b>	Presión (Pa, bar)
<b>R<sub>b</sub></b>	Radio de la burbuja (m)
<b>r<sub>0</sub></b>	Radio de la burbuja al inicio (m)

<b>r</b>	Radio de la burbuja, distancia radial desde el centro del tubo (m)
<b>r<sub>t</sub></b>	Radio de la burbuja en el tiempo t (m)
<b>R<sub>c</sub></b>	Radio de la curvatura de la espira (m)
<b>R<sub>m</sub></b>	Radio del sitio de nucleación (m)
<b>a</b>	Radio del tubo (cm)
<b>S</b>	Solubilidad del gas (mol m <sup>-3</sup> Pa <sup>-1</sup> )
<b>T</b>	Temperatura (°C, K)
<b>γ</b>	Tensión superficial (mN/m)
<b>t</b>	Tiempo (s)
<b>v</b>	Velocidad (m/s)
<b>v<sub>a</sub></b>	Velocidad de ascenso (m/s)
<b>μ</b>	Viscosidad (dinámica, Pa·s)





## GLOSARIO

<b>Cerveza</b>	Bebida alcohólica, no destilada, hecha con grano de cebada malteada u otros cereales cuyo almidón, una vez modificado, es fermentado en agua y aromatizado por lúpulo.
<b>Cerveza Lager</b>	Tipo de cerveza con sabor acentuado que se sirve fría, caracterizada por fermentar en condiciones más lentas empleando levaduras de fermentación baja, y que en las últimas partes del proceso son almacenadas durante un período en condiciones de baja temperatura.
<b>Cerveza de barril</b>	Cerveza contenida dentro de un recipiente normalmente de acero inoxidable, que protege a la bebida carbonatada y permitir su almacenamiento, transporte y servido en grandes volúmenes.
<b>Efecto Dean</b>	Fenómeno que ocurre cuando pasa un flujo principal a través de de tubos curvos o serpentines manifestándose una circulación secundaria perpendicular a la dirección del flujo.
<b>Equipo dispensador de cerveza de barril</b>	Equipo cuyo objetivo es servir la cerveza de barril para su apropiada degustación. El caso común consiste en un tanque de gas carbónico que se conecta a través de un regulador de presión al barril. La cerveza es impulsada

desde el barril para luego pasar dentro de una tubería enfriada externamente con agua o hielo. El sistema de refrigeración suele ser a través de compresión de vapor. Finalmente la cerveza sale a través de uno o varios grifos a la temperatura y carbonatación deseados y recibida en los recipientes adecuados.

**Espira**

Cada una de las secciones curvas o vueltas que forman la espiral o hélice del serpentín.

**Espuma**

Capa de líquido globular enclaustrando vapor o gas. Capas de adsorción rodean la fase dispersa en ambos sistemas. Son sistemas coloidales por la delgadez de las capas que rodean las burbujas de gas, éstas son de dimensiones coloidales o las capas tienen propiedades coloidales.

**Número de Reynolds**

El flujo depende de cuatro variables: el diámetro del tubo, la viscosidad, la densidad y la velocidad lineal media del líquido. Estos cuatro factores pueden combinarse formando un grupo, el cambio del tipo de flujo ocurre para un valor definido del mismo.

**Número de Reynolds crítico**

Número de Reynolds modificado que se aplica en tubos curvos o serpentines para describir el patrón de flujo interno.

**Serpentín**

Tubo enrollado normalmente en forma de espiral o en forma helicoidal.

## RESUMEN

El presente estudio evalúa el efecto del uso de un serpentín helicoidal sobre la relación espuma-cerveza y también sobre el flujo de cerveza al instalar dicho serpentín en un equipo dispensador de cerveza de barril comparando al mismo tiempo los resultados contra la forma tradicional de servido. Se evaluaron diferentes diseños de serpentín con el objetivo de encontrar el mejor que minimizara la relación espuma-cerveza sin que afectara el desempeño práctico del flujo. Se utilizó cerveza de aquellos barriles particularmente difíciles de servir cuya generación de espuma fuera mayor al 95%. El serpentín fue instalado antes de salida del grifo del equipo dispensador.

Los conceptos sobre el flujo de fluidos en serpentines helicoidales, el Número de Dean y el Número de Reynolds crítico son útiles para analizar y encontrar el mejor diseño explicando al mismo tiempo lo que ocurre dentro del serpentín. Durante las pruebas se tomaron en cuenta los factores que tradicionalmente son los recomendados para servir cerveza de barril y que sin embargo no son suficientes cuando se tiene problema con exceso de espuma. Se variaron las dimensiones del serpentín en diámetro de espira, diámetro de tubo, longitud del serpentín, midiendo al mismo tiempo el caudal de cerveza y el porcentaje de espuma-cerveza generado. Los resultados demuestran que efectivamente un diseño adecuado de serpentín puede optimizar el contenido de espuma en la cerveza sin afectar el flujo de servido.



# OBJETIVOS

## General

Evaluar el efecto de la introducción de cerveza en un serpentín helicoidal sobre la relación espuma-cerveza así como su efecto sobre el flujo al fabricar diferentes modelos de serpentín e instalarlos en un enfriador-dispensador de cerveza de barril utilizando como cerveza de prueba la de aquellos barriles que generen más del 95% de espuma.

## Específicos

1. Establecer el diseño óptimo a través de la determinación de las dimensiones características (diámetro de espira, longitud y diámetro interno del tubo) del serpentín y su efecto sobre la relación espuma-cerveza así como su efecto sobre el flujo de cerveza en el dispensador de cerveza de barril.
2. Encontrar una relación matemática entre las dimensiones del serpentín y su efecto en la relación espuma-cerveza así como sobre el flujo de cerveza en el dispensador de cerveza de barril.
3. Determinar el efecto sobre la temperatura de salida de la cerveza al utilizar el serpentín.



## HIPÓTESIS

Es posible obtener diferencias en la relación porcentual espuma-cerveza de barril, para flujos óptimos de cerveza, al utilizar diferentes diseños de serpentín conectados a un dispensador de cerveza de barril, comparado con el procedimiento tradicional de servido.

### Hipótesis Estadística

Es posible medir estadísticamente la variación en la relación porcentual espuma-cerveza de barril para determinar condiciones óptimas de flujo y diseño del dispensador modificado.

**Hi:** es posible obtener diferencias en la relación porcentual espuma-cerveza de barril, para flujos óptimos de cerveza, al utilizar diferentes diseños de serpentín conectados a un dispensador de cerveza de barril, comparado con el procedimiento tradicional de servido.

**Ho:** no es posible obtener diferencias en la relación porcentual espuma-cerveza de barril, para flujos óptimos de cerveza, al utilizar diferentes diseños de serpentín conectados dispensador, comparado con el procedimiento tradicional de servido.





## INTRODUCCIÓN

Al momento de servir cerveza de barril utilizando un equipo dispensador-enfriador entran en juego muchas variables técnicas que deben ser controladas para tener una cerveza con una temperatura adecuada, un grado de carbonatación correcto, una cantidad de espuma controlada así como una velocidad aceptable de servido. Existen muchas recomendaciones para lograr lo descrito, sin embargo en la práctica se trata más bien de arte el servir fácil y adecuadamente la bebida. Podrán tenerse ciertas variables bajo control tales como la presión del gas carbónico, la limpieza del equipo, la temperatura del medio de equipo, el flujo de cerveza, no obstante la cantidad de espuma generada dependerá tanto del barril y su manejo así como de la forma en la cual se dispense. Por lo tanto el servir cerveza de barril en algunos casos puede ser un verdadero problema.

Aprovechando el fenómeno de flujo de fluidos que se desarrolla dentro de un serpentín, puede derivarse una solución para controlar el exceso de espuma. Dentro del equipo dispensador en la tubería se genera turbulencia que afecta la estabilidad del gas carbónico disuelto en la cerveza. Un serpentín prolonga el flujo laminar al mismo caudal de cerveza comparado con el desempeño que daría un tubo recto, esto es debido al efecto Dean desarrollado internamente. Tomando esto como base se procedió a evaluar diferentes serpentines para determinar la estabilidad de la mezcla gas-cerveza, esto implicó variar las dimensiones del serpentín adecuadamente de tal forma que se minimizara la cantidad de espuma sin que afectara el flujo práctico de cerveza.



# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Formación de espuma

Los factores que contribuyen a la formación de espuma pueden ser por causas físicas y químicas. Las causas físicas pueden ser: agitación, caída del líquido desde cierta altura, borboteo de aire u otro gas en el seno de líquido. Las causas físico-químicas pueden ser: agitación de agua dulce con un jabón, en agua dura no se presenta espuma sino precipitación de sales de calcio y magnesio, presencia de impurezas orgánicas así como su concentración, producción de gases como metano, ácido sulfhídrico, dióxido de carbono, después de una reacción química o bioquímica. Ejemplo de esto son las espumas presentes en cervezas y refrescos que se forman por la liberación del gas disuelto.

Cabe mencionar que en el fondo de los envases de estas bebidas las burbujas son pequeñas y al subir se hacen más grandes debido a que la difusión del gas comienza de las burbujas pequeñas hacia las más grandes, de manera que éstas persisten en la superficie formando espuma.

Cuando las burbujas se elevan a la superficie de un líquido y persisten en ella durante cierto tiempo; sin coalescencia de una con la otra, sin ruptura en el espacio de vapor; se produce espuma. Así pues la formación de espuma consiste simplemente en la formación, elevación y la agregación de burbujas en un líquido en que la espuma pueda existir.

Un líquido puro no produce espuma, ya que no presenta variación de tensión superficial. Por el contrario, sí la concentración de soluto es relativamente grande, las capas superficiales están compuestas casi exclusivamente de moléculas de sustancia activa y no hay tampoco formación considerable de espuma. Debe haber una diferencia de tensión superficial entre la solución y la capa superficial; mientras más grande sea esta diferencia más consistencia y estabilidad tendrá la espuma.

El efecto Marangoni (algunas veces llamado también efecto Gibbs-Marangoni) es la transferencia de masa sobre o en la capa de un líquido debido a las diferencias en la tensión superficial. Por ejemplo, el efecto Marangoni estabiliza las películas de jabón.

Debido a que un líquido con una tensión superficial alta empuja más fuerte en los alrededores del líquido que aquel con una tensión superficial baja, la presencia de un gradiente en la tensión superficial causará naturalmente que el líquido fluya hacia regiones de baja tensión superficial. Los puntos de unión de las burbujas están formados por tres películas que forman ángulos de  $120^\circ$ . El punto de unión se conoce como el borde de Plateau o triángulo de Gibbs.

Según el mecanismo de formación de la espuma, las burbujas individuales forman una estructura esférica hermética. Por causa de determinados procesos osmóticos entre las burbujas, se produce un efecto de drenaje que causa la eliminación del agua del espacio entre las superficies de contacto de las burbujas. Esta agua se concentra en el espacio vacío entre las burbujas. Debido a este efecto, la estructura esférica se transforma en una forma geométrica octaédrica estrechando las distancias entre las dobles capas. Esta espuma, denominada espuma poliédrica, consiste en una estructura hermética hexagonal formada por aire.

Dos efectos permiten la estabilización de la espuma. El efecto Marangoni que tiene la tendencia a generar las condiciones energéticas más favorables. En el caso de falta de humectantes en una parte de la superficie líquida o de las burbujas, la tensión superficial se altera en esta zona y por lo tanto es diferente del resto. Mediante el denominado efecto de autocorrección, el sistema tiende a restaurar la tensión anterior, mediante la migración de moléculas humectantes.

El segundo efecto es la repulsión electrostática de moléculas con la misma carga, perteneciente a dos monocapas diferentes. A causa de la aproximación de las dos capas se produce el efecto de drenaje, las capas deberían colapsar y así romperse las burbujas. Sin embargo esta aproximación se previene mediante fuerzas electrostáticas de las zonas cargadas de las moléculas tensoactivas, que mantienen las monocapas a una distancia de equilibrio de equilibrio evitando así su ruptura. Entonces los factores que contribuyen a la estabilidad de la espuma son:

- Constitución de la doble capa de Gibbs. La repulsión eléctrica de las superficies cargadas por los grupos ionizados del agente espumante impide el adelgazamiento de la película.
- Los enlaces hidrógeno que el agua forma con diferentes sustancias y que ligan todas las moléculas del líquido entre ellas.
- La viscosidad del medio líquido.
- La plasticidad de la película líquida así como su elasticidad disminuye la ruptura de la burbuja.

Todas estas fuerzas que se oponen al rompimiento de las espumas dependen de propiedades características de las capas superficiales y de las soluciones de los agentes de superficie que se sitúan en las dos superficies de contacto de las láminas líquidas y del gas que ellas aprisionan.

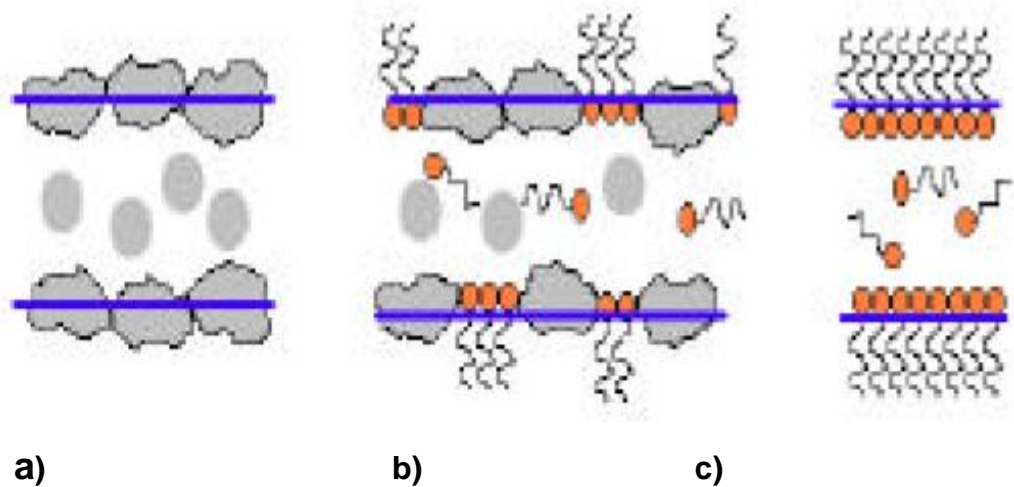
Para productos como la cerveza cuya proteína está estabilizada, una reducción en la elasticidad interfacial ocurre cuando se agregan lípidos. El grado del efecto negativo sobre la espuma se incrementa con la concentración y la longitud de la cadena de los ácidos grasos.

El mecanismo de estabilización demuestra que las proteínas forman una red viscoelástica fuerte en la interfase conforme las moléculas grandes se reacondicionan, se desdoblan e interactúan.

Los surfactantes, siendo moléculas pequeñas altamente móviles, arrastran líquido entre las burbujas o gotas de acuerdo al efecto Gibbs Marangoni el cual actúa como una capa lubricante. Cada mecanismo individualmente evita el colapso de la burbuja y la inestabilidad de la emulsión. Sin embargo cuando ambos juegos de moléculas existen en un sistema, el mecanismo de estabilidad se interrumpe conforme las grandes moléculas de proteína pueden restringir la movilidad de las moléculas surfactantes así que no hay una lubricación total.

En otros casos las pequeñas moléculas de surfactante pueden alcanzar la interfase más rápido que las proteínas así que evitan la construcción de una red alrededor de las burbujas o gota.

Figura 1. **Mecanismos de estabilización de proteínas y surfactantes** a) **Proteínas: interacciones fuertes, red viscoelástica** b) **Proteína-surfactante mezclada: Interacciones débiles, movilidad reducida** c) **Surfactante: Movilidad alta, mecanismo Gibbs Marangoni**



Fuente: Carole Moules. Interfacial Elasticity and the Destabilization of Beer Foams. s.n.

## 1.2. La espuma de la cerveza

La viscosidad, el contenido de gas, la densidad y la tensión superficial son cuatro parámetros que muestran mayor importancia en la formación de espuma. La propiedad más importante es el grado de carbonatación. Técnicamente, la carbonatación implica que el inductor de burbujas es el dióxido de carbono.

El sonido familiar asociado con la apertura de una botella es debido a la igualdad de la presión entre el interior y el exterior de la botella. Antes de la apertura de la botella, la presión parcial del dióxido de carbono en el líquido y el aire en la botella son la misma; sin embargo, una vez que el sello es roto, se

crea un diferencial de presión interno y externo. La relación entre las concentraciones gaseosas y acuosas de CO<sub>2</sub> es ahora muy diferente y la presión parcial dentro del líquido es mucho más alta que la concentración en el aire. El efecto de esto es una igualación de las presiones parciales del CO<sub>2</sub> acuoso y gaseoso. A fin de que esto ocurra, el CO<sub>2</sub> debe salir de la solución, y sucede la familiar explosión de burbujas. Sin embargo, para que estas burbujas se inicien debe existir un lugar para que se formen.

### **1.3. Sirviendo cerveza**

Una servida perfecta de cerveza se caracteriza por una cantidad correcta de una corona de espuma bien construida. Mientras que las preferencias varían de lugar a lugar (algunos prefieren una corona pequeña y más cerveza, otros países prefieren la cerveza en el vaso apropiado con la cantidad apropiada de espuma para cada cerveza). Cada servida consiste en dos clases de acción; aquellas que reducen la formación de espuma y aquellas que la promueven. Dependiendo del tipo de cerveza, se requieren diferentes técnicas para servir. El método más común se ilustra aquí:

- Inicialmente, el vaso se inclina a un ángulo de 45° y se comienza a verter. Se dirige la corriente de cerveza a 2/3 de la altura del vaso. La razón de esta inclinación es incrementar el área superficial del líquido en el vaso, permitiendo que el CO<sub>2</sub> escape más rápido de lo que lo haría si la cerveza fuera vertida directamente dentro del vaso. Como el líquido se mueve hacia abajo y a los lados del vaso, se dispersará y se moverá más despacio. Esto reduce la cantidad de espuma porque eso causa menos desorden y turbulencia en la cerveza cuando ésta ya está contenida en el vaso (4).



Figura 2. **El método de servido con los apropiados 45° produce una espuma suave y excelente**



Fuente: R.J.H. Emrich. The Perfect Pour: Beer Foam Physics and the Art of Dispensing Beer. p. 2-4.

- Una vez que la cerveza alcanza los dos tercios del volumen del vaso, éste puede ser inclinando lentamente hacia una posición vertical. El acto de verter directo sobre el vaso forzará burbujas de aire dentro de la cerveza. Estas burbujas actúan como sitios de nucleación, permitiendo que más dióxido de carbono salga de la solución. Los eventos principales envueltos en la formación y retención de espuma son los siguientes (4):
  - Formación de la burbuja.
  - Cremosidad (ascenso de la burbuja)
  - Desproporción
  - Drenado

### 1.3.1. Formación de la burbuja

Aunque algunas cervezas son soluciones supersaturadas de dióxido de carbono, las burbujas no se forman espontáneamente, deberá estar presente un sitio de nucleación, el cual puede ser una partícula, una grieta en el vidrio o una microburbuja preformada.

Los factores que gobiernan el tamaño de la burbuja que se genera están dados por la ecuación (4):

$$R_b = \left( \frac{3R_m\gamma}{2\rho g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$R_b$ =radio de la burbuja (m)

$R_m$ =radio del sitio de nucleación (m)

$\gamma$ =tensión superficial (mN/m)

$\rho$ =densidad relativa de la cerveza ( $\text{kg/m}^3$ )

$g$ =aceleración debida a la gravedad ( $\text{m/s}^2$ )

La tensión superficial contribuye muy poco comparada con el diámetro del sitio de nucleación. La densidad tiene aún menos impacto en el tamaño de las burbujas comparado con el radio del sitio de nucleación (4).

### 1.3.2. Cremosidad

Es importante como un espectáculo que se presenta en la cerveza, pero también alimenta la espuma si ésta dura en el vaso del cliente. Cuando se ve dentro de un vaso ya servido, se observarán columnas de burbujas ascendiendo de ciertos puntos en el vaso, ya sea en las paredes, en el fondo y algunas veces en el centro del líquido. El contribuyente más grande de esta acción es el contenido de gas en la cerveza, conforme más gas esté contenido en la cerveza, más intentará éste de liberarse de la solución.

La siguiente ecuación fue generada sobre la base de mediciones hechas con un rango de cervezas y un solo sitio definido de nucleación (4).

$$a_n^o = 3,11C + 0,0962\gamma - 218\rho + 216 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

$a_n^o$  = Actividad inicial en el sitio de nucleación

C=Contenido de dióxido de carbono (vol de CO<sub>2</sub>/vol de cerveza)

Es evidente que el contenido de CO<sub>2</sub> tiene por sí solo el efecto más importante sobre la nucleación y la cremosidad en situaciones donde el sitio de nucleación está definido. Conforme las burbujas suben a través de la cerveza, capturan algunas moléculas de proteína y las sacan de la solución (aquellas moléculas con una gran afinidad por el CO<sub>2</sub> será más probable que se acoplen a estas burbujas). Estas moléculas adsorbidas fortalecen la burbuja formando un escudo en su superficie. Cuando se mueven a través de un líquido, estas

esferas rígidas provocan más fricción de lo que lo hacen las burbujas con una superficie flexible, así que una burbuja más rígida viajará más lento (4).

Para el observador general, hay muy poco que pensar en el decaimiento de la espuma y se considera como un fenómeno sencillo que consiste simplemente en una disminución de la espuma. Aunque esto puede ser cierto, esto no quita la física al hacer esta presunción. La velocidad del decaimiento de la corona de la cerveza es gobernada por una ecuación de decaimiento exponencial.

La velocidad de decaimiento puede ser característica del tipo y marca de cerveza. Puede ser influenciada por la temperatura y la edad (dependiendo del estilo, una segunda fermentación puede seguramente ocurrir en la botella, cambiando la gravedad específica y la tensión superficial de la cerveza conforme envejece) (4).

La velocidad a la cual las burbujas ascienden está dada por la ecuación de Stokes:

$$v_a = \frac{2g\rho r^2}{9\eta} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

$v_a$ =velocidad de ascenso (m/s)

$r$ =radio de la burbuja (m)

Claramente el rango en el cual varía la gravedad específica y la viscosidad de la cerveza en los lotes de producción en una cerveza o entre cervezas no tendrá probablemente un efecto significativo en la velocidad de ascenso, la cual tiende a ser del orden de 0,1 a 0,5 m/s (4).

### 1.3.3. Drenado

Tan pronto como la espuma se forma, el líquido comienza inmediatamente a drenar de ella. En un líquido simple, como el agua pura, el fenómeno es muy sencillo, sin embargo la cerveza contiene proteínas disueltas, aminoácidos e innumerables moléculas juntas en una solución homogénea. Conforme el líquido drena, varía la forma de la viscosidad localizada debido a las variaciones homogéneas internas de las proteínas de la superficie de la burbuja. Una vez que la espuma ha alcanzado la estabilidad, el drenado aparece junto con el decaimiento (4).

El fenómeno no es sencillo en un medio como la cerveza, por ejemplo las interacciones ocurren entre surfactantes como películas que se adelgazan y así parámetros sobresalientes como la viscosidad local cambian con respecto al tiempo.

La siguiente ecuación muestra en forma sencilla el drenaje del líquido desde la espuma (velocidad de remoción del líquido desde la espuma). La viscosidad es el factor más importante para el drenado (4).

$$Q = \frac{2\rho g q \delta}{3\mu} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

$Q$ =caudal ( $m^3/s$ )

$\mu$ =viscosidad de la película del líquido (Pa·s)

$q$ =longitud de la frontera de Plateau (m)

$\delta$ =espesor de la película (m)

#### **1.3.4. Desproporción: maduración de Ostwald**

Más conocido considerablemente en el campo de la reología, la maduración de Ostwald es el crecimiento de cristales más grandes a partir de aquellos de tamaño menor que tienen una solubilidad más alta que aquellos más grandes. También conocido como desproporción, esto también se aplica directamente a las burbujas; las burbujas más pequeñas formarán burbujas más grandes para alcanzar espontáneamente una estabilidad energética más grande.

Las burbujas pequeñas nuclean mucho más fácil que las grandes, y así son más favorecidas cinéticamente. Las burbujas grandes, sin embargo, son termodinámicamente favorecidas porque tienen un volumen más grande respecto a la relación de área superficial de lo que lo tienen las burbujas pequeñas (4).

Estos dos tipos de burbuja coexisten sencillamente porque para la reducción de la saturación del gas causado por la menor formación de burbujas pequeñas, el gas está disponible para continuar el crecimiento de burbujas más grandes. La coalescencia (fusión) de las burbujas tiene una importancia limitada para la estabilidad de la espuma pero la desproporción es

sustancialmente más importante. La maduración de Ostwald es gobernada por la ecuación de De Vries (4):

$$r_t^2 = r_0^2 - \frac{4RTZS\gamma t}{P\theta} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

$r_t$ =radio de la burbuja en el tiempo t

$r_0$ =radio de la burbuja al inicio

R=constante de los gases (8.314 J K<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>)

T=temperatura absoluta (K)

Z=coeficiente de difusión del gas (m<sup>2</sup>/s)

S=solubilidad del gas (mol m<sup>-3</sup> Pa<sup>-1</sup>)

$\gamma$ =tensión superficial

t=tiempo (s)

P=presión

$\Phi$ =espesor de la película entre burbujas. El espesor de la película puede ser descrito como “mojadura” de la espuma.

Basado en las variables implicadas en la ecuación de De Vries: claramente los factores más significativos para proteger contra el colapso de la burbuja a través de la desproporción son el contenido del gas y el espesor de la película.

Esto último, en cambio, será impactado principalmente por las velocidades de drenado pero también por materiales activos en la superficie que ingresan en la pared de la burbuja que interactúan para alcanzar una estructura capaz de mantener la integridad de la película (4).

#### 1.4. La química de la espuma de la cerveza

Para que una proteína sea un surfactante efectivo debe:

- Ser capaz de ingresar a la pared de la burbuja.
- Ser capaz de cambiar una vez en la pared de la burbuja, lo cual puede comprender el desdoblamiento así como presentar la configuración más efectiva, interactuar con otras moléculas (por ejemplo, iso- $\alpha$ -ácidos) y ser un móvil (fluido) tal que pueda fluir para rectificar el adelgazamiento en otros lugares sobre la superficie de la burbuja.

Desde hace mucho tiempo se ha establecido que el material proteínico es la columna vertebral de la espuma de la cerveza. Para que una proteína tenga una buena capacidad de formación de espuma debe ser capaz de una rápida adsorción y desdoblarse en la superficie.

A fin de ofrecer una buena estabilidad de la espuma, la proteína debe formar una película fuerte, flexible y cohesiva a fin de reducir la permeabilidad del gas e inhibir la coalescencia y la desproporción. Una sola proteína puede no necesariamente combinar ambos atributos.

Las proteínas con buena formación de espuma tienden a ser flexibles, anfipáticas y relativamente pequeñas. Esto significa que se difunden rápidamente en la interfase gas-líquido, despliegan una adsorción fuerte y una disminución rápida de la tensión interfacial.

Las proteínas que despliegan una buena estabilidad de espuma forman y adsorben una película que es resistente a la deformación mecánica, pueden empacarse densamente y son capaces de agregarse y hacer conexiones



cruzadas. La estabilidad de la espuma tiende a ser más alta en su punto isoeléctrico. Porque no despliegan carga de red hay una repulsión electrostática y una hidratación mínima.

Si está presente una mezcla de proteínas, lo cual por supuesto es el caso de la cerveza, entonces la situación se vuelve complicada. Simplificando el caso a dos proteínas hipotéticas, si una de ellas es mucho más espumante, entonces una de ellas tenderá a “exprimir” a la otra que es menos espumante pero que es tal vez la más estabilizante de espuma.

Para cualquier cerveza la estabilidad de la red de espuma estará en el balance de las especies de polipéptidos presentes, hordeinas hidrolizadas y también varias proteínas (todas las derivadas de albúminas) que son las importantes por su función en la estabilización de espumas, por ejemplo la proteína Z de peso molecular 40 000 y la Proteína de Transferencia de Lípidos.

Se puede resumir que los sitios de nucleación de cualquier fuente (ralladuras, partículas endógenas, microburbujas generadas en el vórtice de los sistemas para dispensar) deberán ser uniformes tanto como sea posible a fin de generar un despliegue uniforme de pequeñas burbujas que alcancen una espuma más estable, menos propensa a la desproporción.

Los sitios de nucleación deberán ser abundantes y del orden de 100 nm, a fin de formar burbujas pequeñas, atractivas, estables, sin tomar en cuenta los métodos de servido. Deberá usarse un contenido de gas razonablemente más alto a fin de promover la cremosidad y la actividad de las burbujas dentro de la cerveza.

El incremento de la viscosidad “local” en la película de la cerveza realzará el espesor de la película a través de la reducción del drenado, que contrarrestará la desproporción. Tal incremento en la viscosidad localizada será más probablemente dada por complejos proteínicos comprendiendo componentes polipéptidos hidrofóbicos que llevan las especies dentro de la burbuja, asociados a una elemento polisacárido que alcanzarán tanto a una viscosidad incrementada en el límite del flujo del líquido y que físicamente mantendrán una distancia mayor entre burbujas adyacentes.

Deberá existir una disponibilidad alta en el contenido de proteína de tal forma que la espuma mantenga una estabilidad alta.

### **1.5. Fenómenos de flujo de fluidos**

El presente trabajo no pretende explicar a profundidad el fenómeno que ocurre internamente dentro del serpentín o que ocurrirá en la mezcla gas carbónico-cerveza, dicha investigación queda fuera del alcance de este trabajo pues requerirá un estudio profundo de carácter físico y químico, lo que se pretende evaluar es el mejor diseño de serpentín cuyo efecto sea positivo para mejorar la relación espuma-cerveza. No obstante, a continuación se presentan algunos conceptos importantes sobre flujo de fluidos que servirán como soporte teórico.

En el interior de la corriente de un fluido no compresible, que se encuentra bajo la influencia de límites sólidos, aparecen cuatro efectos importantes: 1) el acoplamiento de los campos gradiente de velocidad y de tensión de corte, 2) el inicio de la turbulencia 3) la formación y crecimiento de las capas límite y 4) la separación de las capas límite del contacto con el límite sólido.

A velocidades bajas, los fluidos tienden a moverse sin mezcla lateral y las capas adyacentes se desplazan unas sobre otras, como las cartas de una baraja. No existen corrientes transversales ni remolinos. Este tipo de régimen se llama flujo laminar. Desde hace mucho tiempo se sabe que un fluido puede circular a través de una tubería de dos formas diferentes.

A bajas velocidades de flujo, la caída de presión en el fluido se incrementa directamente con la velocidad del fluido, a altas velocidades se incrementa mucho más rápido, aproximadamente el cuadrado de la velocidad. Cuando el movimiento es al azar, dando lugar a corrientes transversales y remolinos se denomina flujo turbulento.

Las condiciones bajo las cuales un tipo de flujo cambia a otro en las cuales la velocidad crítica, cuando el flujo laminar cambia a flujo turbulento, depende de cuatro variables: el diámetro del tubo y la viscosidad, densidad y velocidad lineal promedio del líquido. Estos cuatro factores pueden combinarse formando y cuando el cambio ocurre para un valor definido del mismo, esto recibe el nombre de Número de Reynolds ( $Re$ ).

La transición del flujo laminar a turbulento realmente puede ocurrir para un amplio intervalo de Números de Reynolds. En una tubería, el flujo es siempre laminar a Números de Reynolds inferiores a 2 100. Bajo condiciones ordinarias, el flujo en una tubería o tubo es turbulento a Números de Reynolds superiores a aproximadamente 4 000.

Entre 2 100 y 4 000 existe una región de transición, donde el tipo de flujo puede ser tanto laminar como turbulento, dependiendo de las condiciones a la entrada del tubo y de la distancia a dicha entrada.

El Número de Reynolds se define con base en las siguientes variables por la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{d \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

Re=Número de Reynolds, adimensional

d=diámetro interno del tubo

v=velocidad en m/s

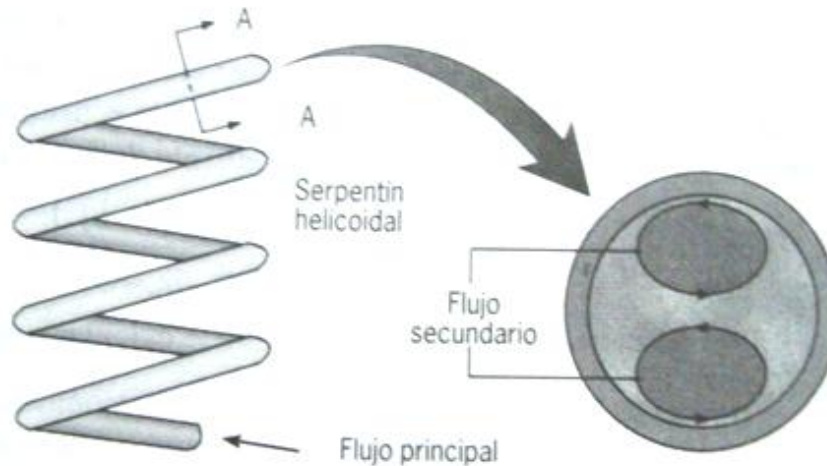
$\rho$ =densidad en kg/m<sup>3</sup>

$\mu$ =viscosidad (dinámica) en Pa·s

## **1.6. Flujo de fluidos a través de un serpentín helicoidal**

Al enrollar un tubo, se puede aumentar la transferencia de calor sin inducir turbulencia o área superficial adicional. En este caso, las fuerzas centrífugas inducen un flujo secundario que consiste en un par de vórtices longitudinales que aumentan el coeficiente de convección.

Figura 3. **Esquema de un tubo enrollado helicoidalmente y del flujo secundario en una vista de la sección transversal agrandada**



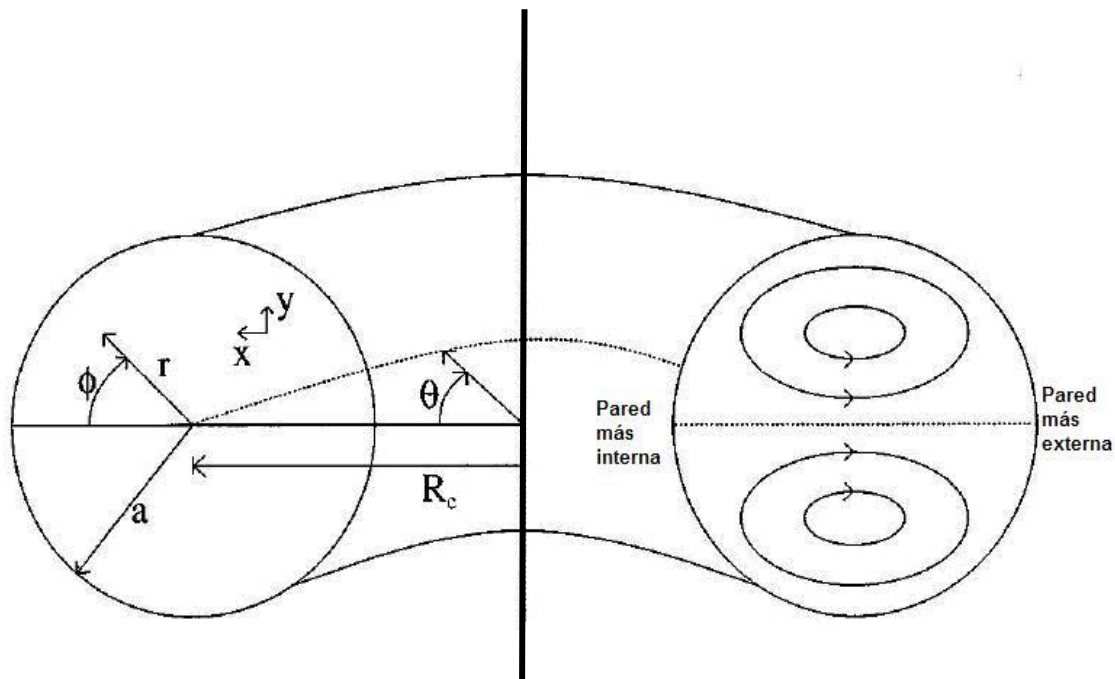
Fuente: Frank Incropera. Fundamentos de transferencia de calor. p. 285, 457.

A cualquier razón de flujo, el flujo a través de un serpentín helicoidal es desigualmente diferente de aquel a través de un tubo recto, debido al movimiento secundario inducido por un desbalance entre el gradiente de presión del flujo cruzado y la fuerza centrífuga. La figura 3 ilustra las líneas de flujo secundarias resultantes totalmente desarrolladas. Los dos vórtices contrarrotativos, llamados vórtices de Dean, están presentes, aún para aquellos tubos suavemente curvos. A Números de Reynolds bajos, el patrón totalmente desarrollado del vórtice de Dean está en estado laminar.

Con el incremento del Número de Reynolds, las mediciones experimentales previas en una posición fija en el serpentín han revelado a un flujo no turbulento debido a inestabilidad de la onda de transporte.

La figura 4 demuestra el sistema de coordenadas toroidal utilizado para describir la geometría del tubo curvo. Las tres direcciones de las coordenadas ortogonales son  $r$ , la distancia radial desde el centro del tubo,  $\Phi$ , el ángulo poloidal en la sección transversal del tubo; y  $\theta$ , al ángulo toroidal. La relación del radio de la curvatura respecto al radio del tubo se denota por  $R_c/a$ . La expresión “transición a turbulento” así como se aplica a tubos rectos es inapropiado, a lo mejor, ambiguo cuando se aplica al flujo a través de serpentines helicoidales.

Figura 4. **Definición del sistema de coordenadas toroidal con ilustración de las líneas de corriente de flujo transversal**



Fuente: D. Webster, J. Humphrey. *Traveling Wave Instability in Helical Coil Flow*. p. 407-415.

Las curvaturas respectivas de dos de los ejes de coordenadas toroidales ( $\theta$  y  $\phi$ ) conducen al apareamiento de varios términos de fuerza centrífuga y de

Coriolis en las ecuaciones de conservación de momentum. En la ecuación de momento  $r$ , aparecen fuerzas centrífugas y resultan de la velocidad de corriente transversal y al sentido de la velocidad de la corriente. En la ecuación de momentum  $\phi$  se encuentran términos que corresponden a la fuerza de Coriolis debido a la velocidad de la corriente transversal y a la fuerza centrífuga debido al sentido de la velocidad de la corriente.

La fuerza centrífuga que envuelve el componente del sentido de la velocidad de la corriente es el principal responsable por los vórtices de Dean contrarrotativos. Los términos que aparecen en la ecuación de momentum  $\theta$  corresponden a las fuerzas de Coriolis (14).

Para flujo a través de de tubos curvos o serpentines, ocurre una circulación secundaria perpendicular al flujo principal llamado Efecto Dean. Esta circulación incrementa la fricción relativa al flujo en tubo recto y estabiliza el flujo laminar, retrazando el Número de Reynolds de transición a aproximadamente:

$$Re_{crit} = 2100 \left( 1 + 12 \sqrt{\frac{d}{D}} \right) \quad (\text{Ec. 7}) \quad \text{Ecuación de Miropolskiy (5)}$$

Donde:

$D$ = Diámetro de la espira del serpentín (m)

$d$ = Diámetro interno del tubo (m) y

$Re_{crit}$ = Número de Reynolds crítico (adimensional).

La ecuación anterior es válida para  $10 < D/d < 250$ . El número de Dean se define como:

$$De = \frac{Re}{\sqrt{\frac{D}{d}}} \quad (\text{Ec. 8})$$

Si  $De < 11.6$  el flujo es laminar. Cuando  $De > 11.6$  y  $Re < Re_{crit}$  el flujo es laminar con grandes vórtices. El flujo pasa a turbulento si el  $Re > Re_{crit}$  (6).

Esta es la propiedad que se evaluó en el presente trabajo y que se determinó contribuye a estabilizar la mezcla gas carbónico-cerveza.

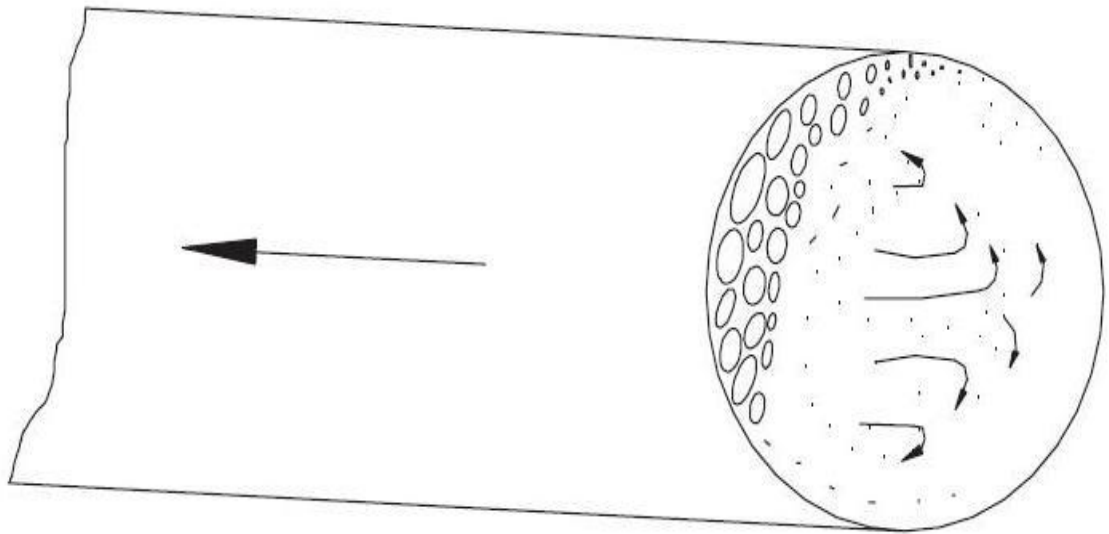
### **1.6.1. Desempeño hidráulico en tubos helicoidales de radio corto**

Debido a que el flujo en tubos enrollados helicoidales de radio y vuelta pequeña es fuertemente influenciado por la fuerza centrífuga, su desempeño hidráulico tiene las siguientes características:

- Por el efecto de la fuerza centrífuga, el Número de Reynolds crítico no es más un valor constante en la transición de flujo laminar a flujo turbulento, sino una función de  $De$  ( $De = Re(d/D)^{1/2}$ ), donde  $De$  es un criterio que caracteriza el efecto de la fuerza centrífuga. Y debido a que el efecto de la fuerza centrífuga inhibe fuertemente la turbulencia desordenada, el valor del Número de Reynolds crítico es mucho mayor (6).



Figura 5. **Modelo imaginario del flujo secundario en la sección de un tubo helicoidal**



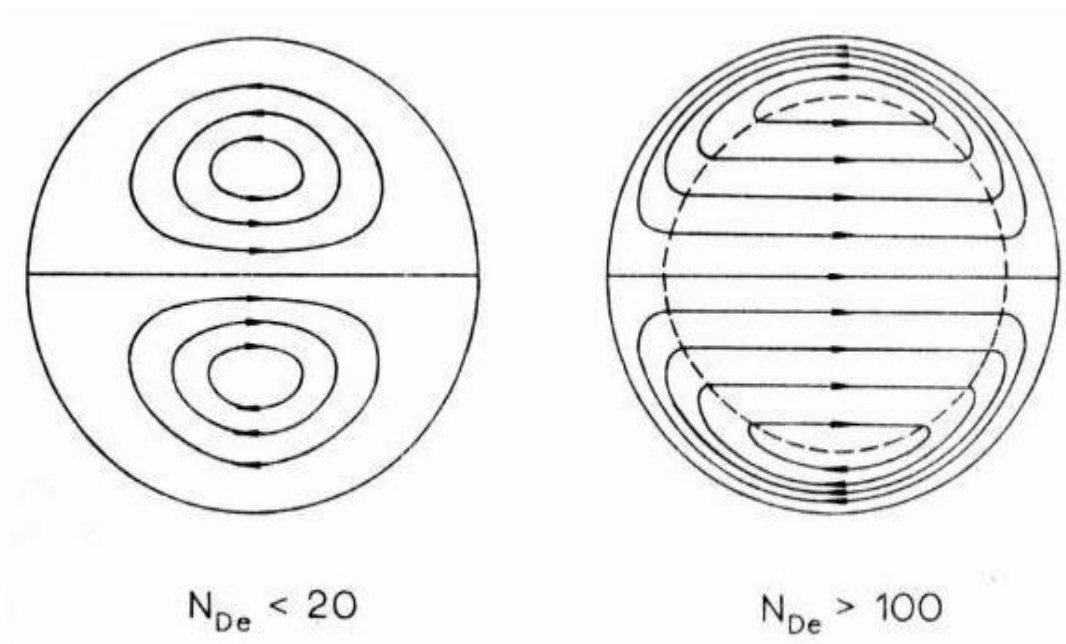
Fuente: Ju Huaiming. Hydraulic Performance of Small Bending Radius Helical Coil-Pipe. p. 826-830.

- En flujo bifásico, el vapor y el líquido fluyen en capas diferentes no sólo por la gravedad, sino que debido a que la densidad del líquido es mayor que la densidad del vapor, de esta forma el líquido se concentra en la parte más externa y su velocidad se incrementa, y el flujo secundario helicoidal se forma en la dirección transversal, así la resistencia por fricción es mucho más grande (6).

Los serpentines helicoidales son muy utilizados para varios procesos tales como intercambiadores de calor y reactores porque pueden acomodar a una gran área de transferencia de calor en un espacio pequeño, con grandes

coeficientes de transferencia de calor y tiempos de residencia estrechos. Debido al uso extensivo de serpentines helicoidales en estas aplicaciones, el conocimiento sobre la pérdida de presión, patrones de flujo y características de transferencia de calor son muy importantes. La curvatura induce un patrón de flujo secundario perpendicular a la dirección de flujo axial principal. Típicamente, el fluido en el centro del tubo se mueve hacia la pared más externa, entonces regresa hacia la porción más interna del tubo fluyendo de regreso a lo largo de la pared, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 6. **Flujo secundario para Números de Dean altos y bajos**



Fuente: Timothy Rennie. Numerical and Experimental Studies of a Double-Pipe Helical Heat Exchanger. p. 8-13.

Se puede esperar que este flujo secundario mejore la transferencia de calor entre la pared del tubo y el flujo del fluido. El movimiento del fluido en tubos curvos fue primeramente observado en 1911. Desde entonces numerosos estudios se han reportado en los campos de flujo que surgen de tubos curvos, incluyendo tubos helicoidales, que son derivados de tubos curvos.

Los campos de flujo han sido observados experimental y numéricamente. Estos estudios han mostrado que el patrón de flujo secundario puede cambiar substancialmente en la forma vista en la figura así como los parámetros han cambiado (en este caso el Número de Dean).

### **1.6.2. Patrones de flujo**

En 1902 se notó que la localización de la velocidad máxima axial cambiaba hacia la pared más externa del tubo curvado. Posteriormente se descubrió sobre un incremento en la resistencia al flujo comparando el tubo curvado con el tubo recto y este incremento en la resistencia podía ser correlacionado con la curvatura. Sin embargo, en tubos enrollados, en el enrollado de los tubos, ocurría una deformación considerable en la sección transversal de los tubos para algunas de las muestras, causando una sección transversal en forma elíptica. Se notó que la curvatura, aún suave, tendía a modificar la velocidad crítica que es el común indicador de la transición de flujo laminar a turbulento.

Utilizando inyecciones de tinta en agua fluyendo a través de tubos enrollados, tubos en U y codos, se observó el patrón del flujo secundario. Este flujo secundario aparece siempre que un fluido fluye en un tubo curvado o en un canal.

Se observó el mismo movimiento general en flujo turbulento cuando se introducía arena dentro de un tubo curvado (13). El primer intento para describir matemáticamente el flujo en un serpentín fue hecho por Dean. El primer papel descrito fue una aproximación del movimiento estable de un fluido incompresible fluyendo a través de un tubo enrollado con una sección transversal circular. También esta aproximación mostró un acuerdo cualitativo con las observaciones experimentales.

En su trabajo sucesivo, Dean observó que la reducción en el caudal debido a la curvatura dependía de una única variable,  $K$  (Número de Dean Original), la cual es igual a  $2(\text{Re})^2 a/R_c$  cuando el movimiento es bajo, donde  $\text{Re}$  es el Número de Reynolds,  $a$  es el radio del tubo,  $R_c$  es el radio de la curvatura. Sin embargo este trabajo fue realizado asumiendo que la relación  $a/R_c$  es pequeña. Dean (1928) también notó que sus cálculos sólo se aplicaban a líneas de corriente.

La explicación de Dean para el requerimiento de un gradiente de presión más alto para mantener un caudal dado en un tubo curvado fue que algo del fluido está en oscilación continua entre la parte central del tubo, donde la velocidad es alta, y la porción más externa del tubo, donde la velocidad es baja. Este movimiento es debido a las fuerzas centrífugas causadas por la curvatura del tubo y resulta en una pérdida de energía. Este movimiento no tiene contraparte en las líneas de corriente del flujo en tubos rectos (13).

Luego se fue más allá del estudio de Dean para flujo laminar de agua y aceite mineral de diferentes viscosidades a través de tubos curvos con curvaturas de  $1/15$ ,  $1/50$  y  $1/2050$ .

Se demostró que el comienzo de la turbulencia no dependía del valor sólo del Número de Reynolds, ni del criterio de Dean [ $De=Re(a/Rc)^{1/2}$ ]. Para una curvatura de 1/15, se necesitó un Número de Reynolds de 9 000 para sostener la turbulencia, mientras que para una curvatura de 1/2050 no hubo una diferencia marcada para la velocidad crítica para alcanzar la turbulencia comparada con un tubo recto.

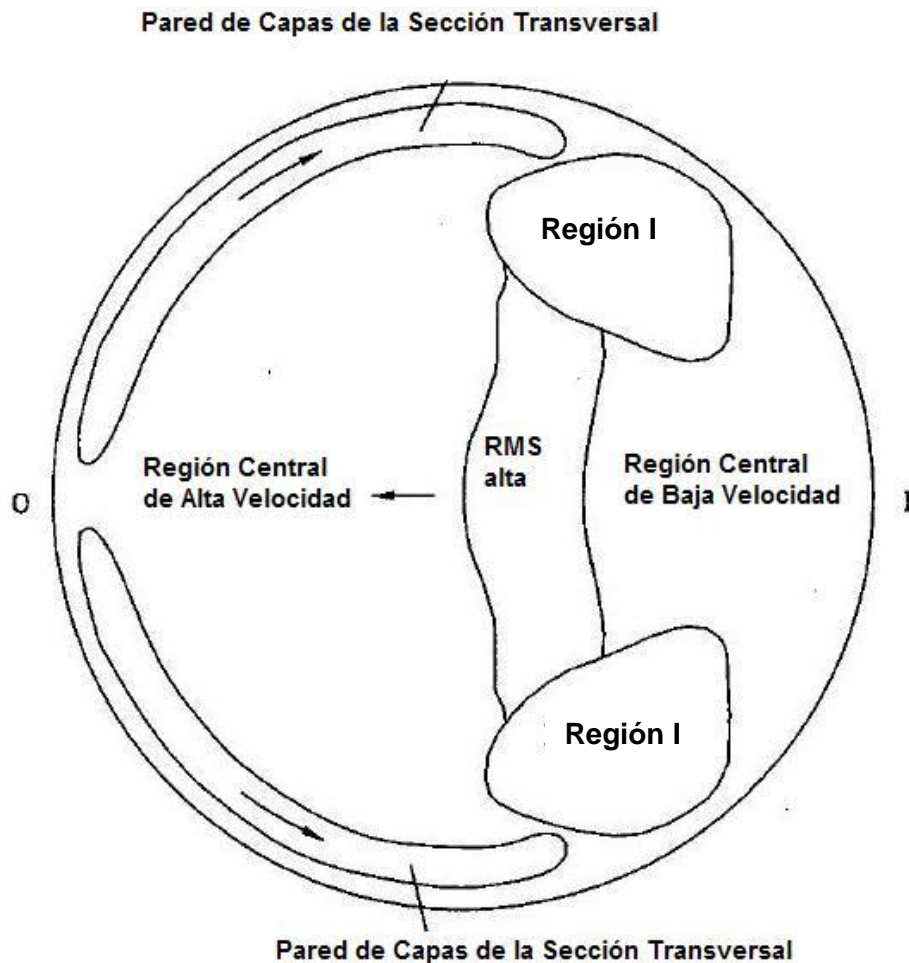
Se concluyó que el flujo en tubos curvos es más estable que el flujo en tubos rectos. Para valores de  $De$  menores de 11,6, no había diferencia en la resistencia del flujo comparado con tubo recto (13).

El caudal depende de dos variables independientes, el Número de Reynolds y la curvatura del tubo. Se ejecutaron estudios numéricos para determinar las características del flujo secundario para un flujo laminar totalmente desarrollado. Sus resultados mostraron que la velocidad axial se incrementaba, el valor máximo de la velocidad axial se movía hacia la pared más externa y los vórtices secundarios también migraban más cerca de la pared externa.

Las fluctuaciones turbulentas se reducen en tubos curvados comparados con tubos rectos. La torsión también juega un papel en el desarrollo del campo de flujo. Para alta torsión, el flujo secundario se reduce a un vórtice en lugar de los dos clásicos.

Se ha descubierto que los serpentines helicoidales pueden reducir la dispersión axial por un factor de 500 veces para flujo laminar, comparado con el flujo de un tubo recto.

Figura 7. **Bosquejo indicando las regiones de flujo en la sección transversal de un serpentín**



Fuente: D. Webster, J. Humphrey. *Traveling Wave Instability in Helical Coil Flow*. p. 407-415.

La figura 7 es un resumen de las regiones de flujo en la sección de un tubo curvo presentando las características en común. Las regiones de conducción de presión de flujo dirigida hacia la mitad interior de la sección transversal del tubo se denotan como "pared de capas de la sección transversal". La "región central" corresponde al flujo mayoritario de la corriente transversal, el cual es centrífugamente conducido hacia la pared más externa. Esto está además

subdivido en regiones de “alta velocidad” y “baja velocidad” para indicar la magnitud relativa de las líneas de corriente. La “Región I” indica las regiones cerca de las paredes inferiores y superiores en la mitad interior de la sección transversal del tubo donde hay una gran oscilación o variación de la velocidad (14).

### 1.6.3. Pérdida de presión en un serpentín helicoidal

La caída de presión para un serpentín se puede calcular como en un tubo horizontal corregido por un factor  $k$ . La pérdida de presión de un fluido es mayor en un serpentín (1).

$$k = 1 + 3,54 \frac{d}{D} \quad (\text{Ec. 11})$$

Para flujo turbulento, pueden ser usadas las ecuaciones de Ito y Srinivasan, Nandapurkar y Holland, con una precisión probable de  $\pm 15$  por ciento. Sus ecuaciones son similares a:

$$\frac{f_c}{f} = 1 + 0,090 \left( \frac{De^{1.5}}{70 + De} \right) \quad (\text{Ec. 9})$$

En flujo laminar, el factor de fricción para tubos curvos  $f_c$  pueden ser expresado en términos del factor de fricción en tubo recto  $f = 16/Re$  como:

$$f_c = \frac{0,079}{\text{Re}^{0,25}} + \frac{0,0073}{\sqrt{\frac{D}{d}}} \quad (\text{Ec. 10})$$

Las ecuaciones anteriores son útiles para observar cómo afecta el fenómeno de los vórtices dentro del serpentín.

## **1.7. Equipo para dispensar cerveza de barril**

A continuación se describe el equipo utilizado en el presente trabajo para dispensar cerveza de barril. Siguiendo el recorrido de la cerveza desde el barril hasta la salida en el grifo se tiene:

### **1.7.1. Cilindro para gas carbónico**

Tanque de acero o aluminio para alta presión que contiene el gas carbónico en estado líquido y parte en estado gaseoso, utilizado para impulsar o carbonatar la cerveza. El gas en estado gaseoso dentro del tanque puede tener una presión de 55 bares a temperatura ambiente.

La presión dentro del tanque se mantendrá constante hasta que bajará abruptamente cuando su contenido líquido se haya evaporado y por lo tanto quede casi vacío. El tanque posee una válvula de media vuelta junto a una válvula de seguridad, la cuál solo debe abrirse cuando se tenga el regulador conectado firmemente. La tara puede ser de 5, 10 o 15 Kg.



Figura 8. **Tanque para gas carbónico**



Fuente: [www.micromatic.com](http://www.micromatic.com). Consultada en febrero 2011.

### **1.7.2. Regulador de presión**

Necesario debido a la gran diferencia de presiones entre el gas carbónico (hasta 55 bar ú 800 psi) contenido en el tanque y la presión máxima de trabajo del envase o barril 3 bar. También sirve para establecer la presión correcta de trabajo, tanto para empujar como para carbonatar la cerveza.

Por lo general los reguladores traen dos manómetros: uno que mide constantemente la presión del tanque (opcional) y otro que mide la presión a la salida del regulador. La presión se regula con un tornillo.

Figura 9. **Regulador con el manómetro indicador para la presión del tanque de gas carbónico (arriba) y el manómetro indicador para la presión de salida (lateral). También se observa el tornillo regulador al centro**



Fuente: [www.micromatic.com](http://www.micromatic.com). Consultada en febrero 2011.

### **1.7.3. Mangueras**

La manguera de CO<sub>2</sub> (manguera cilindro-barril) debe ser adecuada para soportar la presión del gas. En el caso de las mangueras que transportan la cerveza (manguera barril- enfriador y manguera enfriador-torre), éstas deben ser del tipo adecuado para uso en bebidas y para alta presión además de ser flexibles.

Figura 10. **Manguera para uso en cerveza de barril**



Fuente: [www.micromatic.com](http://www.micromatic.com). Consultada en febrero 2011.

#### 1.7.4. Barril o Keg

Envase de acero inoxidable para contener la cerveza. Existentes en diferentes capacidades. Llevan insertos un tubo extractor el cual sirve de ingreso para el gas carbónico y de salida para la cerveza al conectarse con el cabezal. El que se usará en este trabajo tiene una capacidad de 50 L y una presión recomendada máxima de trabajo de 3 bares

Figura 11. **Barril o Keg, de izquierda a derecha 1) vista externa de un barril de 50 L 2) sección de un barril mostrando la ubicación del tubo extractor 3) tubo extractor**



Fuente: [www.franke.com/beveragesystems/de/en/home.html](http://www.franke.com/beveragesystems/de/en/home.html). Consultada febrero 2011.

### 1.7.5. Cabezal

Válvula que permite el ingreso de gas carbónico y la salida de cerveza controlando estas funciones a través de una palanca accionada por el usuario. Los modelos estadounidenses poseen válvula de seguridad, los europeos no.

Figura 12 Cabezal



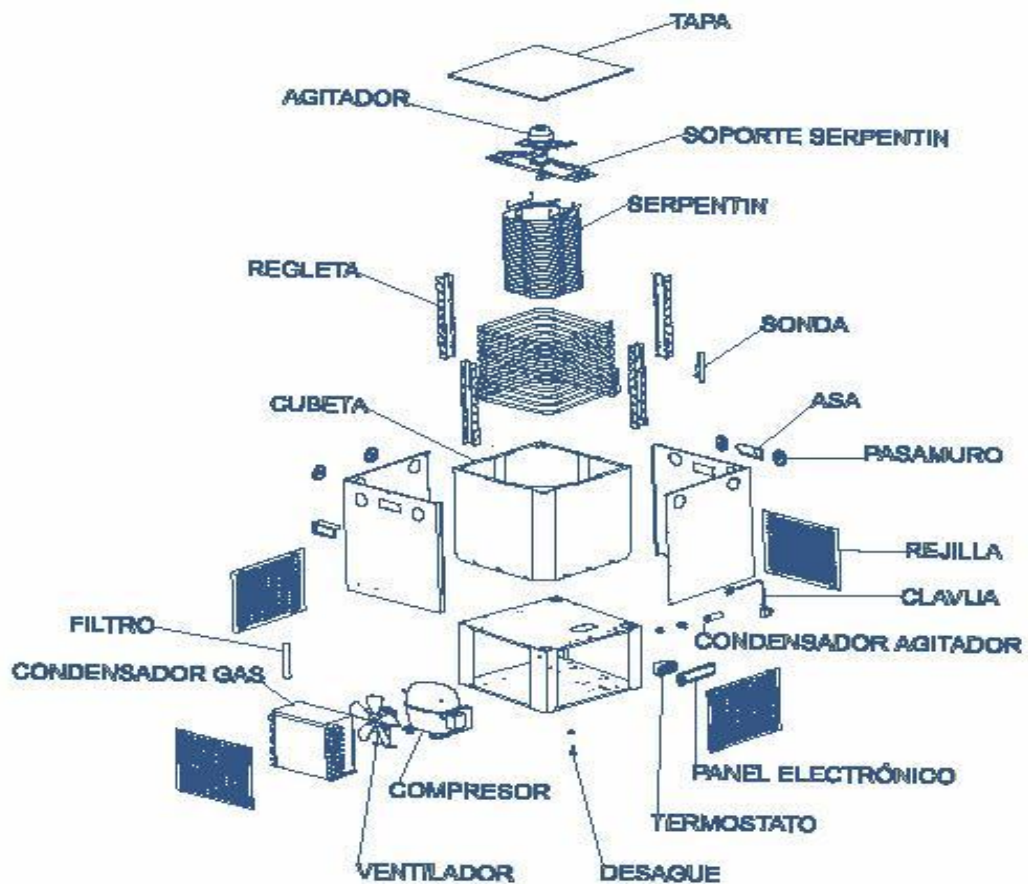
Fuente: [www.micromatic.com](http://www.micromatic.com). Consultada en febrero 2011.

### 1.7.6. Equipo enfriador-dispensador

El equipo consiste en un serpentín enfriador (con cambios de dirección de 90°) de acero inoxidable por donde circula la cerveza, el tubo está cubierto por hielo y agua (incluye un agitador) enfriado por un sistema de refrigeración por

compresión de vapor. El agua helada entra en contacto con el serpentín enfriándolo, el cual causa el enfriamiento de la cerveza. La longitud de la tubería de acero inoxidable varía entre 15 y 36 m dependiendo del modelo de enfriador lo que permite un contacto prolongado para causar el enfriamiento. Con un enfriador de 30 metros de tubería, la cerveza puede ser continuamente dispensada a 3 o 4 °C en el grifo aún si el barril está a temperatura ambiente.

Figura 13. Componentes de un equipo enfriador (marca Celli)



Fuente: Eddy Censo. Capacitación Producto No Embotellado. p. 4-5.

### 1.7.7. Torre y grifos

La torre es la base de el (los) grifo(s). Por ellas pasan los tubos que llevan la cerveza desde la salida del enfriador hasta los grifos. Normalmente también son enfriados por una extensión del agua del equipo de enfriamiento. Existen muchos diseños estilizados y con variantes de enfriamiento. Finalmente la cerveza es conducida a los grifos donde existe una válvula para permitir o cerrar el flujo de cerveza. Algunos modelos tienen también una válvula que permite regular el flujo. Algunas torres poseen uno o bien hasta 12 grifos.

Figura 14. Torre y grifos

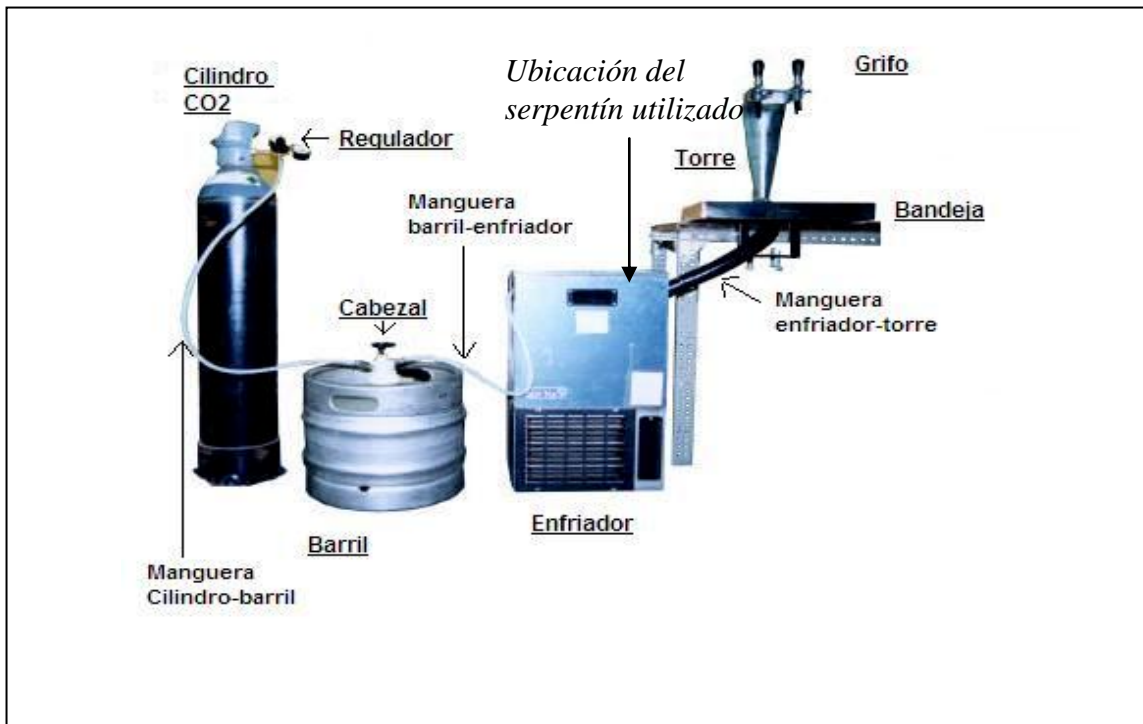


Fuente: [www.micromatic.com](http://www.micromatic.com). Consultada en febrero 2011

## 1.8. Funcionamiento del sistema de servido

Tomando la figura 15 como referencia. El gas carbónico sale del tanque, pasa a través del regulador y sale de este a una presión establecida, ingresa por cabezal e ingresa al barril donde se difunde en el espacio de cabeza y se solubiliza en la cerveza impulsándola y/o carbonatándola. La cerveza recorre el tubo extractor pasando nuevamente por el cabezal y recorriendo a través de la manguera la distancia hasta el inicio del enfriador, aquí como ya se mencionó, se enfría a través de toda la longitud del serpentín de enfriamiento. La cerveza sale ya fría y a través de otro pequeño tramo de manguera se une a la torre y finalmente sale por el grifo.

Figura 15. Sistema de dispensamiento para cerveza de barril



Fuente: Eddy Censo. Capacitación Producto No Embotellado. p. 4-5.

## 1.9. Teoría sobre el servido de la cerveza

Como se mencionaba, el servir cerveza de barril requiere ciertas condiciones no obstante esto no siempre funciona, he aquí la teoría.

Hay que recordar que cuando se ajusta la carbonatación esta se hace de acuerdo a la temperatura de la cerveza. Ahora si se cambia la temperatura, por ejemplo a una más alta para servirla, se necesitará cambiar la presión en la cabeza del barril para tomar en cuenta el cambio de temperatura. Por ejemplo, asumiendo que se carbonató una cerveza Lager a 5 °C a 2.6 volúmenes de CO<sub>2</sub>, se tendrán 0,7 bar de presión en el espacio de cabeza (ver tabla en el Anexo sobre carbonatación). Ahora, si se desea servir la cerveza a 7 °C, conforme la temperatura aumenta la cerveza no podrá retener tanto CO<sub>2</sub>. Viendo la tabla (ver tabla VI en el Anexo) se necesitarán 1,1 bar para mantener los 2,6 volúmenes en solución.

Si sólo se aplican 0,7 bar, el gas saldrá de la solución hasta que la presión llegue al equilibrio y se perderá entonces carbonatación. Más aún, si se trata de dispensar la cerveza a 0,7 bar, la cerveza perderá carbonatación conforme pase a través de la línea y lo que se dispensará será espuma. No obstante, aunque se haya ajustado la presión de cabeza de acuerdo a la temperatura de dispensamiento, si se trata de dispensar con 1,1 bar en la mayoría de sistemas de cerveza de barril se obtendrá un flujo muy fuerte más adecuado para lavar autos que para dispensar cerveza. La cerveza golpeará el fondo del vaso tan fuerte que casi todo el gas escapará y otra vez se terminará por tener un vaso de espuma.



Así que ambas condiciones, baja presión de cabeza y flujo alto dará siempre el mismo problema: un vaso lleno de espuma, no cerveza. De hecho, es completamente posible que una baja presión que es suficiente para crear espuma sea lo suficientemente alta para causar un flujo alto. Las razones a estos problemas son simples. Se necesita una presión para impulsar la cerveza a través de la línea y una presión de 0,7 a 1 bar podrá necesitarse para mantener el gas en solución.

Los sistemas de dispensamiento de cerveza están diseñados para que esas restricciones en la línea de cerveza produzcan un flujo adecuado de cerveza desde el barril. Hay dos grandes fuentes de restricción. La primera es la elevación. La otra fuente es la línea de cerveza en sí. Si se usa un grifo tipo cobra deberán agregarse 0,13 bar. Recordando siempre que la cerveza deberá fluir con esto de 3 a 7 L/min.

Ahora se tiene un sistema de cerveza de barril que está perfectamente balanceado cuando la válvula está abierta. Sin embargo cuando la válvula se cierra se tiene una presión adicional de 0,13 bar en el espacio de cabeza. Esto puede gradualmente llevar a una carbonatación incrementada y posiblemente el gas se escape y forme espuma cuando se dispense la cerveza. Hay muchas formas para tratar de resolver el dilema anterior. Primero es terminarse el barril lo más pronto posible. Segundo es cortar el flujo de gas al barril cuando no se está dispensando. Sin embargo, todavía se puede recoger alguna carbonatación adicional.

A fin de evitar la espuma y el escape del gas se necesitará incrementar gradualmente la presión de cabeza para la compensación de la disolución del gas carbónico. O bien se puede mantener la presión en el espacio de cabeza según lo requerido para mantener carbonatada la cerveza e incrementarla la

presión 0,13 bar sólo cuando se esté dispensando. Después de servir la cerveza por una tarde simplemente se disminuye la presión. No obstante esto es impráctico.

### **1.9.1 Transferencia de calor entre ambiente y serpentín helicoidal**

Debido a los datos experimentales obtenidos en pruebas previas realizadas por el autor la absorción de calor por parte del serpentín helicoidal y la cerveza en su interior, siempre y cuando la cerveza fluya, es despreciable, pues sólo se incrementa 1 °C cuando mucho la temperatura en la salida de la bebida.

## **2. DISEÑO METODOLÓGICO**

### **2.1. Variables**

#### **2.1.1. Dimensiones del serpentín**

Las variables con las cuales se trabajó fueron el diámetro del tubo, el diámetro de espira y la longitud del tubo.

#### **2.1.2. Presión en el sistema de servido**

La presión en el regulador se ajustó a 2,7 bar pues es la presión teórica obtenida con base en cálculos de flujo de fluidos y según las recomendaciones del medio técnico cervecero. La presión fue constante para todas las pruebas y para mantener un contenido de CO<sub>2</sub> de 2,7 a 2,8 volúmenes % v/v.

#### **2.1.3. Temperatura**

La temperatura recomendada para servir la cerveza es más bien un rango y depende del gusto del cliente. Sin embargo la recomendación es entre 2 °C y 4 °C. De esta forma la medición de la temperatura tuvo por objeto determinar si la temperatura se mantenía en este rango durante las diversas pruebas.

Un resultado arriba de 4 °C haría descartar la prueba o corrida, pues esto afectaría la calidad de la bebida.

Todos los barriles se mantuvieron a una temperatura fija de 20 °C previo a su utilización, esto para garantizar la uniformidad de la prueba. La temperatura de salida de la cerveza en este caso no tiene una gran relevancia si se compara con el flujo total o el volumen de espuma, se considero necesario únicamente el que la cerveza se obtuviera en la salida del equipo enfriador-dispensador con menos de 4 °C. Es decir en términos prácticos es igual un resultado con 2°C que con 4 °C.

#### **2.1.4. Flujo**

El flujo puede dividirse en flujo total (espuma y cerveza) y flujo del líquido (sin la espuma). En este documento en caso de referirse al primero se indicará como flujo total y en caso se indique sólo flujo se referirá al segundo. En el caso del flujo del líquido sólo indicará como flujo.

El flujo total fue medido por ser el resultado del cambio en las dimensiones del serpentín. Esta variable fue de especial atención dado que un flujo total bajo (inferior a 1,8 L/min) no es deseable porque la velocidad de servido se ralentiza y se vuelve inaceptable. Un flujo total demasiado alto, superior a 2,5 L/min resultaría en exceso de generación de espuma.

El flujo total se consideró en dos categorías, tipo A y B. Un flujo total tipo A o flujo total adecuado era si éste estaba entre 1,8 a 2,5 L/min. El tipo B, que no sería el ideal pero aún aceptado, se consideró en un rango entre 1,5 a 1,8 L/min. El flujo total A es preferido sobre el B.

### **2.1.5. Volumen de espuma**

Al igual que el flujo total esta es una variable de gran importancia. Se consideraron también dos categorías A y B. El tipo A sería un resultado con un volumen de espuma inferior al 10% y de 10 a 20% para el B. De igual forma el resultado tipo A es preferido sobre el B. La aplicación de los criterios se utilizó para poder descartar o filtrar los resultados que no cumplieran con las expectativas requeridas, esto se puede ver en el diagrama de la figura 20.

Porcentaje de espuma =  $\% \text{ Espuma} = \frac{\text{Volumen de espuma de la cerveza}}{\text{Volumen total de espumas y cerveza}} \times 100$  (Ec. 12).

Siendo el volumen total la suma del volumen de cerveza más el volumen de espuma.

## **2. 2. Delimitación del campo de estudio**

Este estudio es la ejecución y evaluación de diferentes diseños de serpentín, a través del monitoreo de 3 variables de salida (temperatura, flujo y porcentaje de espuma en la cerveza de salida de un dispensador-enfriador de cerveza de barril).

El universo de estudio fueron los barriles de 50 litros con cerveza tipo Lager con problemas de exceso de espuma. La selección de la muestra se realizó considerando que los barriles generaran 95% de espuma por lo menos, usando los barriles necesarios para reproducir 4 corridas y completar la Tabla I. Esto se realizó a nivel de laboratorio y con un solo modelo de equipo dispensador de cerveza de barril.

### **2.3. Recursos Humanos disponibles**

Asesor e Investigador.

### **2.4. Recursos materiales disponibles**

#### **2.4.1. Instrumentos**

- a. Manguera para aire comprimido de diferentes longitudes y diámetros internos. Tubo de acero inoxidable de diferentes diámetros
- b. Equipo para dispensar cerveza marca Celli remota con torre tipo cobra de tres grifos
- c. Cabezal para conexión equipo dispensador-barril
- d. Barriles (marca Franke) de 50 L de acero inoxidable con cerveza comprobada que generara 95% o más de espuma respecto al volumen total cerveza-espuma
- e. Regulador de gas carbónico con doble manómetro, de 0 a 4,1 bar (0- 60 psi) en la salida
- f. Manguera de 8, 6 y 4 mm de diámetro interno, presión máxima 17 bar (250 psi), para uso en bebidas
- g. Pichel cervecero
- h. Tarro cervecero de vidrio
- i. Tubos de metal de 35 cm de largo de varios diámetros
- j. Abrazaderas

#### **2.4.2. Equipo de medición**

- a. Probeta de 1 litro
- b. Beaker de 0,5 litros, 1 litro, 2 litros y 5 litros

- c. Termómetro
- d. Cronómetro
- e. Vernier

### **2.4.3. Insumos**

- a. Cerveza tipo Lager. La cerveza nunca tuvo más de una semana después de producida
- b. Cilindro de dióxido de carbono de 10 kg
- c. Agua
- d. Solución acuosa con desinfectante para uso en alimentos a base de ácido peracético.

### **2.4.4. Recursos Físicos**

**Lugar:** Instalaciones industriales y laboratorio de una cervecería. El lugar contó con control de temperatura y se ajustó a 22 °C para las pruebas.

## **2.5. Técnica cualitativa o cuantitativa**

Se tomó cada una de las configuraciones de la Tabla I, es decir cada uno de los serpentines con el diámetro de tubo interno indicado y con cada una de las longitudes y diámetro de espira, este serpentín se acopló en la salida del sistema de refrigeración y se siguió el procedimiento con serpentín detallado en la sección 2.6, determinando el porcentaje de espuma y midiendo el flujo de cerveza y la temperatura de la cerveza a través de los instrumentos indicados en la sección 2.4.2.

Este procedimiento se repitió 4 veces a cada una de las configuraciones de la Tabla I hasta completar la tabla.

## **2.6. Recolección y ordenamiento de la información**

### **2.6.1. Sin serpentín**

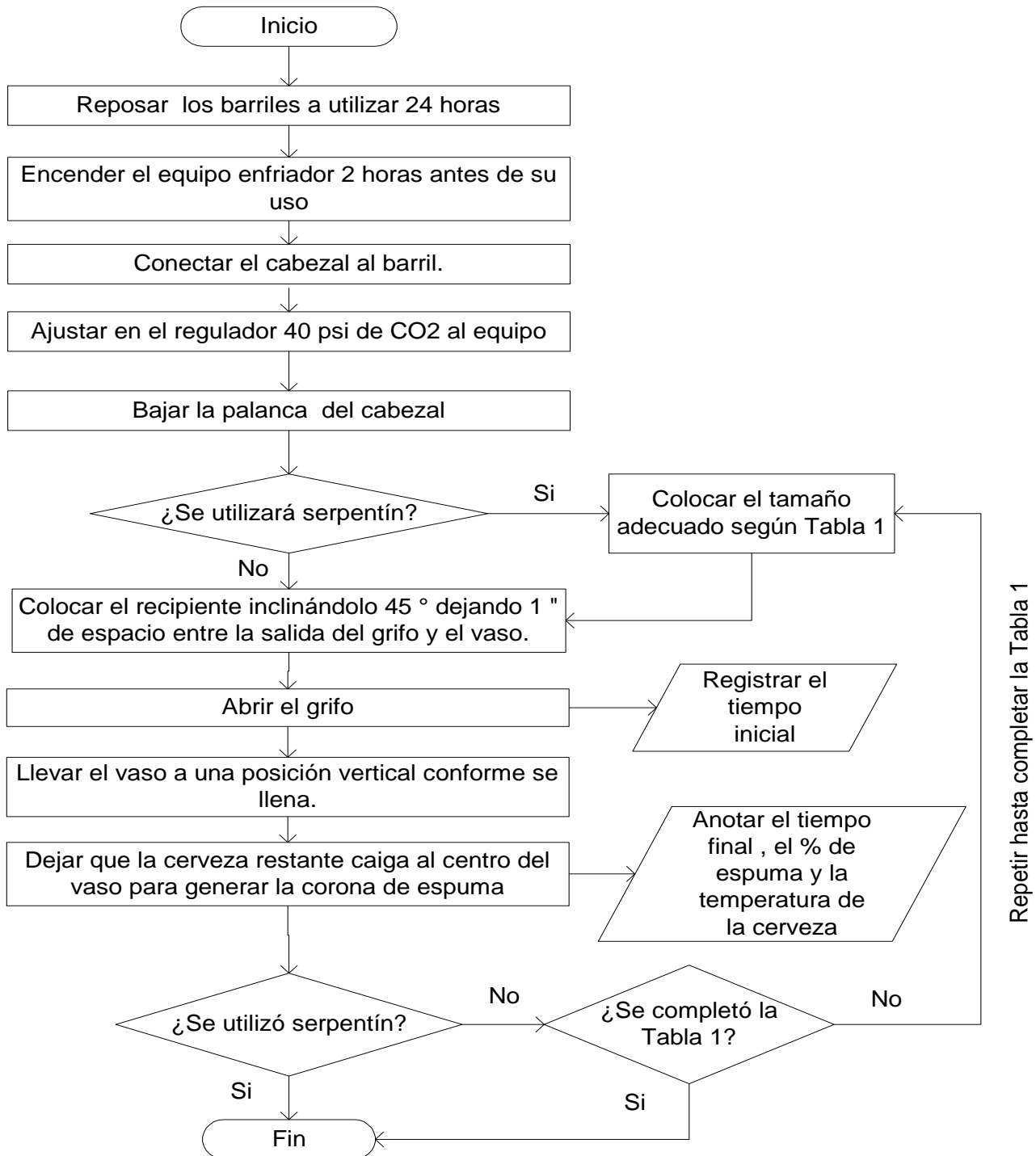
- a. Tomar los barriles con cerveza y dejarlos reposar por 24 horas en el lugar en donde se realizarán las mediciones.
- b. Poner a enfriar el equipo dispensador. Dispensar 2 horas antes de iniciar las pruebas
- c. Conectar el barril acoplado el cabezal del equipo dispensador con el espadín del barril lo cual permitirá el flujo de dióxido de carbono hacia el barril permitiendo mantener la carbonatación y a la vez impulsar la cerveza hacia el sistema de enfriamiento
- d. Fijar la presión de dióxido de carbono en el regulador en 2,7 bar (40 psi, presión recomendada para el tipo de máquina dispensadora)
- e. Colocar el recipiente para recibir la cerveza
- f. Conectar el barril bajando la palanca del cabezal,
- g. Permitir que fluya a través del sistema de tubería interna el flujo de gas carbónico y de cerveza
- h. Dispensar la cerveza siguiendo las recomendaciones indicadas en el apartado correspondiente (ver Anexo)
- i. Medir el tiempo para llenar el recipiente en uso.
- j. Medir también el volumen de espuma generada así la temperatura de salida de la cerveza y anotar los valores en la tabla 1 (sin serpentín debe estar en 3 y 4 °C)



### **2.6.2. Con serpentín**

- a. Seguir los pasos de a hasta g anteriores (Sección 2.6.1)
- b. Conectar el serpentín según el tamaño a probar para completar la Tabla I
- c. Continuar con los pasos de h hasta j hasta completar la Tabla I. A continuación de ilustra el diagrama de flujo utilizado del procedimiento descrito

Figura 16. Procedimiento experimental



Fuente: elaboración propia.

## 2.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Se utilizarán las siguientes ecuaciones:

$$A = \pi \cdot a^2 \quad (\text{Ec. 13}).$$

$$v = \frac{F}{A} \quad (\text{Ec. 14}).$$

$$Re = \frac{d \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$Re_{crit} = 2100 \left( 1 + 12 \sqrt{\frac{d}{D}} \right) \quad (\text{Ec. 7})$$

$$De = \frac{Re}{\sqrt{\frac{D}{d}}} \quad (\text{Ec. 8})$$

La ecuación anterior es válida porque todos los modelos de serpentín utilizados están en el rango de  $10 < D/d > 250$

Tomando la configuración No. 18 de la Tabla I como ejemplo, para los siguientes datos:

$d = 6 \text{ mm} \equiv 0,006 \text{ m}$ , es decir radio  $a = 0,003 \text{ m}$

$D = 15 \text{ cm} \equiv 0,15 \text{ m}$

$L = 4 \text{ m}$

$F = 8,06 \text{ L/min} \equiv 0,000134 \text{ m}^3/\text{s}$  (promedio de las 4 corridas)

$$T=2\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\mu=0,0019\text{ Pa}\cdot\text{s a }2\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\rho=1\,005\text{ kg/m}^3\text{ a }2\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\% E=8,75\text{ (promedio de las 4 corridas)}$$

El caudal F es la suma del volumen de espuma más la cerveza líquida en la salida del sistema, por lo que para tomar un volumen real, se restará el volumen de la espuma (promedio para cada configuración), esto es equivalente a despreciar el volumen dentro del tubo aportado por la espuma, por lo que el caudal F se multiplicará por el porcentaje de cerveza, es decir:

$$F'=F \times (100-\%E)/100\text{ (Ec. 15)}$$

$$\text{Por lo que } F'=1,23\text{ L/min}$$

Sustituyendo en las ecuaciones anteriores se tiene que:

$$A=2,83 \times 10^{-5}\text{ m}^2, \text{ es decir el área de la sección interna del tubo.}$$

$$v=0,72\text{ m/s}$$

$$Re=2\,300$$

$$Re_{crit}=7\,140$$

$$De=460$$

La siguiente tabla presenta la información ordenada de los datos originales y los resultados del procesamiento de los datos según el cálculo anterior, de acuerdo a la configuración del modelo de serpentín utilizado (diámetros y longitudes), así como la temperatura, flujo y porcentaje de espuma obtenidos. En tabla también se presenta el resultado obtenido al colocar el barril directo al sistema de dispensamiento de cerveza sin ningún tubo de por medio.

Tabla I. **Diámetros, longitudes de tubo y diámetros de espira utilizados para cada modelo de serpentín y los resultados obtenidos en cada corrida (flujo total, temperatura, porcentaje de espuma), así como el caudal, el Número de Reynolds, Número de Reynolds crítico y Número de Dean**

Configuración	d (mm)	L (m)	D (cm)	Corrida 1			Corrida 2			Corrida 3			Corrida 4			Q m3/s	Re	Recrit	De
				F L/min	T °C	%E	F L/min	T °C	%E	F L/min	T °C	%E	F L/min	T °C	%E				
T	0	0	0	10,4	2	99	10,7	3	100	10,3	2	98	10,5	2	99	1,73E-06	145,9	-	-
1	8	4	20	9,68	3	98	9,95	3	99	9,55	2	95	9,45	3	99	3,23E-06	271,6	7140	54
2	8	4	15	8,72	2	95	8,84	3	97	8,66	3	96	8,77	3	95	7,27E-06	611,8	7920	141
3	8	4	12	7,93	2	88	8,12	3	81	7,84	3	89	7,95	3	85	1,59E-05	1335	8607	345
4	8	4	8	6,72	3	84	6,93	3	87	6,55	3	88	6,53	3	88	1,79E-05	1509	10069	477
5	8	7	20	8,45	4	98	8,49	4	95	8,54	2	90	8,61	3	91	2,82E-06	237,1	7140	47
6	8	7	15	6,96	3	94	6,75	2	91	6,99	3	91	7,06	3	89	6,96E-06	585,9	7920	135
7	8	7	12	6,07	2	77	6,05	4	81	6,02	3	79	5,85	2	80	2,33E-05	1959	8607	506
8	8	7	8	4,93	3	69	5,14	3	65	4,76	3	64	4,99	3	61	2,55E-05	2144	10069	678
9	8	10	20	7,95	3	96	7,79	2	94	7,65	3	95	7,57	3	95	5,3E-06	446,2	7140	89
10	8	10	15	6,31	3	85	6,04	3	85	6,32	3	81	6,4	2	82	1,58E-05	1328	7920	307
11	8	10	12	4,82	2	57	5,05	2	51	4,85	3	54	4,42	3	53	3,45E-05	2908	8607	751
12	8	10	8	3,53	4	32	3,04	3	38	3,23	2	43	3,22	3	42	4E-05	3368	10069	1065
13	8	13	20	7,77	3	88	7,41	4	87	7,66	3	87	7,87	2	85	1,55E-05	1308	7140	262
14	8	13	15	5,84	4	66	6,03	3	65	5,55	3	60	5,76	3	68	3,31E-05	2786	7920	643
15	8	13	12	3,82	3	45	3,42	3	49	3,65	3	43	3,64	4	44	3,5E-05	2948	8607	761
16	8	13	8	2,65	4	21	2,57	3	24	2,36	4	25	2,55	3	27	3,49E-05	2937	10069	929
T	0	0	0	10,4	2	99	10,71	3	100	10,32	2	98	10,5	2	99	1,75E-06	196,2	-	-
17	6	4	20	9,35	3	98	9,01	3	98	9,05	3	99	9,15	3	97	3,05E-06	342	6464,8	59
18	6	4	15	8,01	3	89	8,09	3	84	8,2	3	81	7,95	2	85	2,05E-05	2300	7140	460
19	6	4	12	6,73	2	71	6,52	3	74	6,93	2	73	6,81	2	76	2,98E-05	3345	7734,9	748
20	6	4	8	5,65	3	55	5,71	3	56	5,55	3	63	5,76	3	54	4,06E-05	4559	9001,3	1249
21	6	7	20	8,5	3	95	8,62	3	94	8,37	3	94	8,31	2	96	7,39E-06	829,9	6464,8	144
22	6	7	15	6,25	3	72	6,43	3	79	6,38	2	71	6,55	3	75	2,75E-05	3084	7140	617

Fuente: elaboración propia.

**Continuación Tabla 1.**

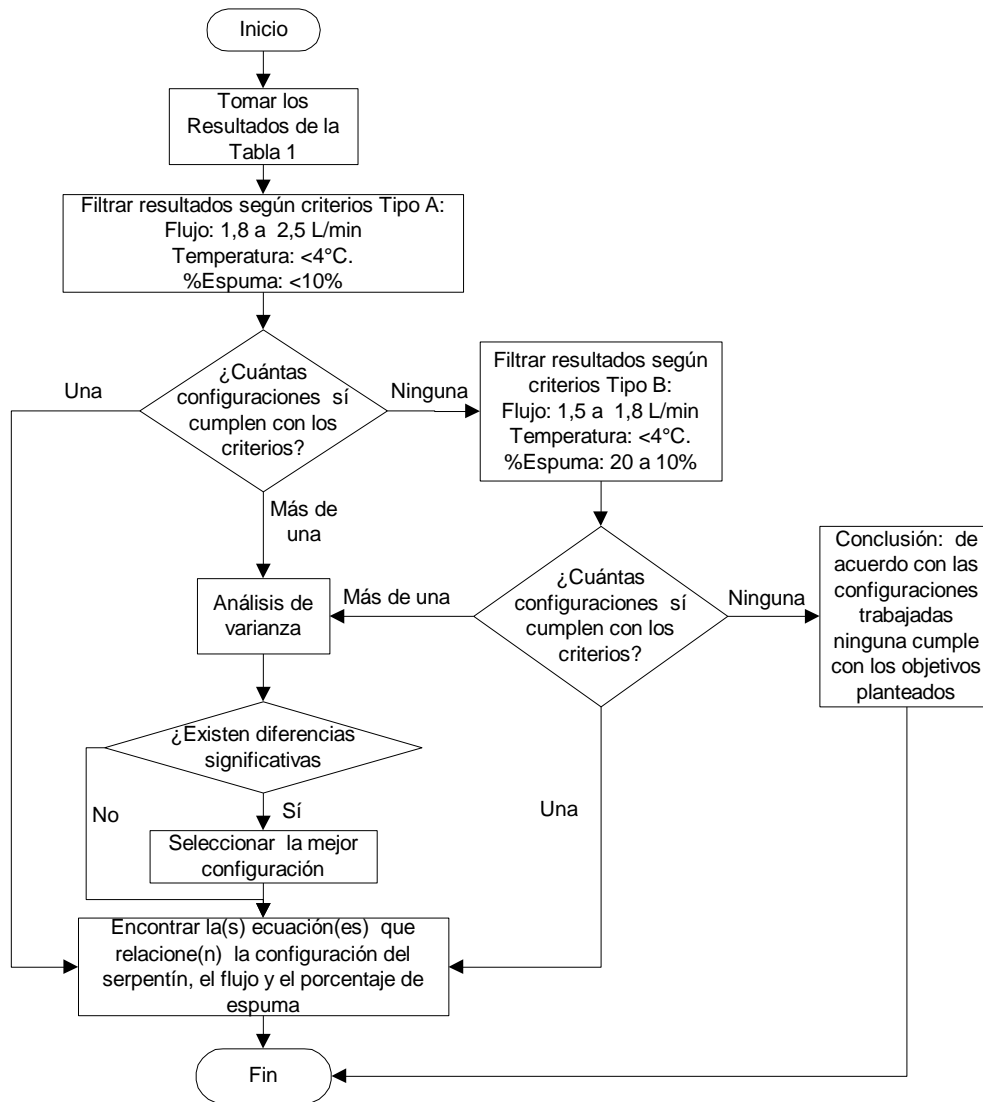
Configuración	d (mm)	L (m)	D (cm)	Corrida 1			Corrida 2			Corrida 3			Corrida 4			Q m3/s	Re	Re cr	De
				F L/min	T °C	%E	F L/min	T °C	%E	F L/min	T °C	%E	F L/min	T °C	%E				
23	6	7	12	5,39	3	57	5,07	3	60	5,09	3	53	5,01	3	52	3,81E-05	4279	7735	957
24	6	7	8	3,84	3	39	3,95	3	41	3,77	3	36	3,66	3	39	3,88E-05	4360	9001	1194
25	6	10	20	7,9	3	92	8,12	3	93	7,85	3	92	7,99	3	92	1,03E-05	1155	6465	200
26	6	10	15	5,71	4	61	5,42	4	62	5,77	3	59	5,69	3	60	3,72E-05	4173	7140	835
27	6	10	12	3,55	4	31	3,46	3	36	3,4	3	36	3,65	3	32	3,88E-05	4357	7735	974
28	6	10	8	2,2	3	18	2,28	3	16	2,54	3	16	2,45	3	20	3,26E-05	3654	9001	1001
29	6	13	20	7,27	3	86	7,11	3	87	6,95	3	86	6,85	3	85	1,64E-05	1845	6465	320
30	6	13	15	5,14	4	56	5,23	4	54	5,36	4	48	5,4	4	51	4,2E-05	4719	7140	944
31	6	13	12	3,15	4	25	3,03	3	23	3,25	3	22	3,16	3	21	4,05E-05	4549	7735	1017
<b>32</b>	<b>6</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>2,08</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2,19</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1,97</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>1,95</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3,3E-05</b>	<b>3706</b>	<b>9001</b>	<b>1015</b>
T	0	0	0	10,4	2	99	10,71	3	100	10,32	2	98	10,5	2	99	1,75E-06	294	-	-
33	4	4	20	8,5	3	95	8,31	2	94	8,76	2	93	8,55	2	94	8,53E-06	1436	5664	203
34	4	4	15	7,44	3	81	7,06	3	79	6,99	3	80	7,23	3	82	2,33E-05	3929	6215	642
35	4	4	12	6,29	3	58	5,96	3	56	6,16	3	59	6,05	3	60	4,26E-05	7164	6701	1308
36	4	4	8	5,24	2	52	4,87	2	51	5,29	3	50	4,88	3	54	4,08E-05	6865	7735	1535
37	4	7	20	6,53	3	93	6,71	4	90	6,87	2	89	6,65	4	90	1,06E-05	1783	5664	252
38	4	7	15	4,52	2	60	4,59	2	57	4,75	4	62	4,42	2	61	3,05E-05	5130	6215	838
39	4	7	12	3,21	3	39	3,33	3	43	3,75	3	37	3,65	3	35	3,57E-05	6015	6701	1098
40	4	7	8	2,45	3	29	2,76	2	28	2,46	3	26	2,64	2	27	3,11E-05	5244	7735	1173
41	4	10	20	5,11	3	85	5,23	3	84	4,9	3	87	5,01	3	87	1,2E-05	2024	5664	286
42	4	10	15	3,21	3	49	3,02	4	51	3,42	4	47	2,97	3	45	2,73E-05	4604	6215	752
43	4	10	12	1,97	3	21	1,82	3	23	1,76	3	25	2,01	3	26	2,4E-05	4044	6701	738
44	4	10	8	1,34	3	10	1,25	3	11	1,18	3	12	1,22	3	13	1,85E-05	3107	7735	695
45	4	13	20	4,7	4	73	4,29	4	76	4,47	4	70	4,61	4	75	2E-05	3359	5664	475
46	4	13	15	2,51	3	37	2,55	3	39	2,67	3	33	2,75	3	32	2,83E-05	4761	6215	777
47	4	13	12	1,45	2	10	1,51	2	12	1,36	3	9	1,42	3	12	2,13E-05	3594	6701	656
48	4	13	8	0,75	3	1	0,86	2	3	0,66	2	2	0,71	3	3	1,21E-05	2044	7735	457

Fuente: elaboración propia.

## 2.8 Análisis estadístico

Para poder realizar el análisis de resultados obtenidos con la Tabla I y cumplir con los objetivos establecidos se procedió de la siguiente manera:

Figura 17. Procedimiento para el análisis de datos



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados de la Tabla I y siguiendo el procedimiento de la figura 17, se obtiene este resultado tras aplicar el criterio del porcentaje de espuma:

**Tabla II. Resumen de las mejores configuraciones de acuerdo al desempeño para la disminución de espuma**

Configuración	d (mm)	L (m)	D (cm)	Corrida 1			Corrida 2			Corrida 3			Corrida 4			Tipo
				F L/min	T °C	%E	F L/min	T °C	%E	F L/min	T °C	%E	F L/min	T °C	%E	
28	6	10	8	2,20	3	18	2,28	3	16	2,54	3	16	2,45	3	20	B
32	6	13	8	2,08	4	3	2,19	4	2	1,97	3	4	1,95	4	4	A
44	4	10	8	1,34	3	10	1,25	3	11	1,18	3	12	1,22	3	13	B
47	4	13	12	1,45	2	10	1,51	2	12	1,36	3	9	1,42	3	12	A
48	4	13	8	0,75	3	1	0,86	2	3	0,66	2	2	0,71	3	3	A

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la tabla II, de los 48 modelos o configuraciones probados, únicamente 5 obtuvieron un resultado a considerar respecto a la disminución de espuma, el resto presentó porcentajes de espuma mayores al 20%, lo que se considera como ineficiente. El criterio se estableció en la sección 2.1.5. La configuración 28 y 44 pertenecen al tipo B, con 10 a 20% de espuma, mientras que la configuración 32, 47 y 48 presentaron excelentes resultados en cuanto al control de la espuma clasificándose como tipo A con menos de 10% de espuma. No obstante al aplicar el criterio del flujo según sección 2.1.4, se puede observar; en la misma tabla; que los modelos 44, 47 y 48 se eliminan



porque el flujo total es inferior a 1,5 L/min, dado que se estableció que de 1,5 a 1,8 L/min se clasificaría como tipo B y de 1,8 a 2,5 L/min como tipo A.

Tras analizar los resultados de la tabla II ninguna configuración es afectada por la temperatura (sección 2.1.3., ninguna superó los 4 °C). Finalmente se tiene:

**Tabla III. Resumen de las mejores configuraciones de serpentín de acuerdo con el criterio del desempeño en la disminución de espuma y el desempeño en el flujo de cerveza-espuma**

Confi- gura- ción	d (mm)	L (m)	D (cm)	Corrida 1			Corrida 2			Corrida 3			Corrida 4			Tipo
				F L/min	T °C	%E	F L/min	T °C	%E	F L/min	T °C	%E	F L/min	T °C	%E	
28	6	10	8	2,20	3	18	2,28	3	16	2,54	3	16	2,45	3	20	B
32	6	13	8	2,08	4	3	2,19	4	2	1,97	3	4	1,95	4	4	A

Fuente: elaboración propia.

El promedio en cuanto a porcentaje de espuma para la configuración #28 es de 18% con un promedio de flujo de 2,37 L/min. Mientras que la configuración #32 es 3% de espuma con 2,05 L/min. Entre la configuración #28 y la #32, la #32 se considera como la que mejor controla el efecto del exceso de espuma obteniendo un caudal muy apropiado de cerveza. La #28 no se puede considerar como descartada, pero es menos eficiente en cuanto al control de espuma, a pesar de que el flujo de cerveza es más alto. Es preferible el poder controlar la espuma más que tener un caudal muy elevado.

De acuerdo con el análisis anterior no es necesario aplicar ningún análisis de varianza pues los resultados se pudieron clasificar y concluir a través de las condiciones iniciales propuestas.

## **3. RESULTADOS**

### **3.1 Modelo óptimo de serpentín**

El modelo de serpentín helicoidal que optimiza la relación espuma-cerveza sin afectar el desempeño práctico del flujo es uno con un diámetro interno de tubo de 6 mm, una longitud de 13 m y un diámetro de espira de 8 cm, el cual genera un porcentaje de espuma del 4% respecto al volumen de cerveza y un flujo de 2,08 l/min.

### 3.2 Ecuaciones que relacionan el porcentaje de espuma y el flujo de cerveza con el modelo del serpentín

Tabla IV. Resumen de las ecuaciones que relacionan el porcentaje de espuma con la longitud del tubo del serpentín para cada diámetro de espira y cada diámetro de tubo interno

Ecuación No.	Ecuación, %E=Porcentaje de espuma	Coefficiente de correlación $r^2$
16	Diámetro de espira 20 cm, diámetro interno 8 mm <b>%E = -0,87L + 100,1</b>	0,710
17	Diámetro de espira 15 cm, diámetro interno 8 mm <b>%E = -2,48L + 103,7</b>	0,829
18	Diámetro de espira 12 cm, diámetro interno 8 mm <b>%E = -4,33L + 102,0</b>	0,944
19	Diámetro de espira 8 cm, diámetro interno 8 mm. <b>%E = -6,12L + 104,3</b>	0,965
20	Diámetro de espira 20 cm, diámetro interno 6 mm <b>%E = -0,96L + 100,6</b>	0,881
21	Diámetro de espira 15 cm, diámetro interno 6 mm <b>%E = -3,68L + 99,2</b>	0,976
22	Diámetro de espira 12 cm, diámetro interno 6 mm <b>%E = -6,02L + 97,8</b>	0,987
23	Diámetro de espira 8 cm, diámetro interno 6 mm <b>%E = -7,29L + 92,6</b>	0,974
24	Diámetro de espira 20 cm, diámetro interno 6 mm <b>%E = -1,83L + 101,0</b>	0,889
25	Diámetro de espira 15 cm, diámetro interno 4 mm <b>%E = -5,00L + 98,6</b>	0,985
26	Diámetro de espira 12 cm, diámetro interno 4 mm <b>%E = -6,68L + 91,4</b>	0,959
27	Diámetro de espira 8 cm, diámetro interno 4 mm <b>%E = -7,42L + 88,8</b>	0,940

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Resumen de las ecuaciones que relacionan el flujo total de cerveza-espuma con la longitud del tubo del serpentín para cada diámetro de espira y cada diámetro de tubo interno**

<b>Ecuación No.</b>	<b>Ecuación, F=flujo total en L/min, L=longitud en m.</b>	<b>Coefficiente de correlación r<sup>2</sup></b>
28	Diámetro de espira 20 cm, diámetro interno 8 mm <b>F = 0,0083L<sup>2</sup> – 0,344L + 10,6</b>	0,951
29	Diámetro de espira 15 cm, diámetro interno 8 mm <b>F =0,0185L<sup>2</sup> – 0,614L +10,6</b>	0,982
30	Diámetro de espira 12 cm, diámetro interno 8 mm <b>F=0,0159L<sup>2</sup> - 0,737L + 10,5</b>	0,995
31	Diámetro de espira 8 cm, diámetro interno 8 mm. <b>F= 0,0334L<sup>2</sup> – 1,045L + 10,5</b>	0,996
32	Diámetro de espira 20 cm, diámetro interno 6 mm <b>F =0,0042L<sup>2</sup> – 0,308L + 10,4</b>	0,976
33	Diámetro de espira 15 cm, diámetro interno 6 mm <b>F=0,0276L<sup>2</sup>-0,765L+10,5</b>	0,994
34	Diámetro de espira 12 cm, diámetro interno 6 mm <b>F =0,0374L<sup>2</sup>-1,053L+10,5</b>	0,995
35	Diámetro de espira 8 cm, diámetro interno 6 mm <b>F = 0,0549L<sup>2</sup> – 1,355L + 10,4</b>	0,997
36	Diámetro de espira 20 cm, diámetro interno 6 mm <b>F = 0,0126L<sup>2</sup> – 0,646L + 10,6</b>	0,985
37	Diámetro de espira 15 cm, diámetro interno 4 mm <b>F =0,0496L<sup>2</sup> – 1,270L + 10,7</b>	0,892
38	Diámetro de espira 12 cm, diámetro interno 4 mm <b>F =0,0491L<sup>2</sup> – 1,345x + 10,5</b>	0,997
39	Diámetro de espira 8 cm, diámetro interno 4 mm <b>F= 0,0638L<sup>2</sup> – 1,570L + 10,4</b>	0,998

Fuente: elaboración propia.

Observar la figura 33 y 34 en el Apéndice para detalle de resultados.

### **3.3 Efecto sobre la temperatura**

De acuerdo con la tabla 1 y según lo establecido en la sección 2.1.3 el efecto del serpentín sobre la temperatura de la cerveza en la salida del dispensador no es importante pues estuvo entre 2 y 4 °C.

### **3.4 Número de Reynolds crítico y Número de Dean**

Según se puede observar en la tabla 1 el Número de Reynolds crítico sitúa a los flujos de los modelos de serpentín probados en patrones de flujo laminar, esto es debido a la naturaleza propia de un serpentín, fenómeno que se fundamenta teóricamente en el efecto Dean. El Número de Dean indica que los vórtices contrarrotativos son grandes dentro del serpentín estabilizando el flujo. Esto se analizará en la sección 4.

## 4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con la tabla III, el modelo de serpentín que demostró mejores resultados es el que tiene un diámetro de espira de 8 cm, un diámetro interno de 6 mm y 13 m de longitud, el cual generó únicamente 4% de espuma con una temperatura de salida de 4 °C para la cerveza. Esto demuestra que un serpentín helicoidal con las dimensiones adecuadas tiene la capacidad de controlar el exceso de espuma en un dispensador de cerveza de barril.

Al analizar las tendencias de las figuras 21, 22 y 23 (Anexos), se observa una relación inversa entre la longitud del tubo del serpentín helicoidal contra el porcentaje de espuma. A medida que la longitud del tubo del serpentín se hace más grande, la cantidad de espuma disminuye. Esta tendencia aplica para todos los diámetros de espira trabajados y para todos los diámetros de tubo interno.

Es necesario tomar en cuenta que un serpentín demasiado largo puede no ser adecuado pues resultaría muy grande y por lo tanto poco práctico de trabajar. Adicionalmente se observa (en las mismas gráficas) que a medida que el diámetro de espira disminuye también disminuye el porcentaje de espuma, aun manteniendo una longitud y diámetro de tubo constante.

De igual forma a medida que el diámetro del tubo disminuye el porcentaje de espuma también disminuye. Es decir el porcentaje de espuma disminuye si la longitud del serpentín se incrementa, y si el diámetro de la espira y el diámetro del tubo disminuyen. Estos resultados pueden desde luego observarse en las pendientes de las ecuaciones que relacionan estos factores

(longitud, diámetro de espira y de tubo) versus la longitud del serpentín y que se resumen en la tabla IV. No obstante el análisis anterior estaría incompleto pues es necesario tomar en cuenta el factor flujo total volumétrico. De acuerdo con las gráficas 18, 19 y 20 el flujo total disminuye a medida que la longitud se incrementa y lo hace en forma cuadrática.

A medida que el diámetro de la espira disminuye también el flujo disminuye y a medida que el diámetro interno del tubo disminuye también disminuye el flujo total. El flujo total es una restricción a la efectividad de los modelos respecto a la disminución de la espuma. La razón de esto es que las restricciones impuestas en la metodología sobre el flujo total (1,8 a 2,5 L/min) condicionan el que el porcentaje de espuma no sea la única la variable objetivo.

De esta forma es que de todos los resultados obtenidos sólo uno se considere adecuado en cuanto a flujo y porcentaje de espuma. Una diferencia que se observa en el comportamiento de los datos, es que para el flujo total las correlaciones tienen un buen ajuste con una ecuación cuadrática, mientras que para el porcentaje de espuma, la correlación que mejores resultados dio fue la lineal, no obstante puede observarse en las gráficas 21, 22 y 23, que para las longitudes de tubo más grandes, y para los diámetros de espira más cerrados (8 cm), la tendencia ya no es lineal, esto es debido a que al disminuir tanto el flujo, la turbulencia dentro del tubo se detiene prácticamente y la generación de espuma tiende a cero.

La explicación al comportamiento descrito puede basarse al analizar los resultados del régimen de flujo observado. Tal como se planteó en el Marco Teórico, existe el flujo de laminar y turbulento, además el de transición situado entre ambos patrones de flujo.



En las figuras 24, 25 y 26 se muestra el Número de Reynolds en función de la longitud del serpentín para cada uno de los diámetros de espira y diámetros de tubo interno. En dichas gráficas, además de mostrar el Número de Reynolds (Re) convencional para un tubo recto, se muestra también el Número de Reynolds crítico ( $Re_{crit}$ ).

El Re es laminar si es menor que 2 100, de transición entre 2100 y 4 000; y turbulento si es mayor que 4 000, sin embargo esta descripción es válida para un tubo recto, para un tubo enrollado helicoidalmente, el flujo laminar tiene un límite superior diferente. De acuerdo con la ecuación de Miropolskiy (Ecuación 7), este límite es 2 100 multiplicado por un factor de corrección  $1 + 12\sqrt{\frac{d}{D}}$ . En la gráfica No. 24, se observa que los diámetros de espira más cerrados (15, 12 y 8 cm) alcanzarían la zona de transición si el tubo fuera de recto, sin embargo tras aplicar el criterio de que el flujo de transición se retrasa por ser un serpentín, el nuevo flujo de transición estaría ya no en 2 100 sino entre 7 000 y 10 000 según el diámetro de la espira.

En la gráfica 8 se observa el mismo fenómeno descrito, no obstante debido a que el diámetro interno del tubo es menor (6 mm en lugar de 8 mm) los resultados con los diámetros de espira de 12 y 8 cm entrarían en el régimen de flujo turbulento si fuera un tubo recto, pero nuevamente por ser un serpentín resulta que el flujo laminar se extiende aún hasta valores de 7 750 a 9 000 para los diámetros de espira de 12 y 8 cm respectivamente, por lo que en realidad el flujo es laminar. Para la gráfica 26, el diámetro de espira es aún más cerrado (4 mm) y todos los diámetros de espira se sitúan entre un régimen de flujo turbulento y de transición, de igual forma el  $Re_{crit}$  indica que el flujo aún es laminar.

Otro fenómeno que puede observarse en la gráfica 26 es que para los serpentines con diámetro de espira de 15, 12 y 8 cm el Re se incrementa, pero a medida que el serpentín incrementa su longitud el Re disminuye, esto es debido a que el Re es función de la velocidad del fluido y a medida que la longitud se incrementa también se incrementa el efecto de la caída de presión debido a la fricción dentro del tubo y al fenómeno de los vórtices que se forman dentro del serpentín o efecto Dean, esto disminuye el flujo y por lo tanto la velocidad y por tanto Re decrece. Esto es más claro en las gráficas 27, 28 y 29 que resumen el flujo de la cerveza contra la longitud del serpentín para cada modelo con diferente diámetro de espira y diámetro de tubo interno.

En la gráfica 27, 28 y 29 se observa que a medida la longitud del serpentín se incrementa el flujo de la cerveza líquida aumenta, pero existe una diferencia según sea el diámetro de espira y el diámetro interno del tubo. Para cuando el diámetro del tubo es más abierto (8 mm) el flujo líquido tiende a aumentar para las espiras de 20, 15 y 12 cm, pero para el diámetro de espira más cerrado (8 cm) el flujo tiende a subir y luego a disminuir. Esto se acentúa para cuando el diámetro de tubo interno es de 6 mm y el diámetro de espira es de 8 cm.

Para la espira de 12 cm, el flujo de cerveza tiende a estabilizarse y para las espiras de 15 y 20 cm la tendencia es sólo a incrementar y no disminuir. Este efecto es aún más marcado al analizar la gráfica 29, en donde el diámetro de tubo interno es de 4 mm. Se observa que el flujo líquido para las curvas con espiras más cerradas (8 y 12 cm) aumentan y luego disminuyen en forma clara. La espira con 15 cm aumenta y disminuye pero en forma menos evidente y la espira de 20 cm sólo aumenta.

Lo observado en las gráficas 27, 28 y 29 es debido a que la espuma disminuye a medida que aumenta la longitud del serpentín, consecuencia del retraso del flujo laminar que permite que el líquido fluya mejor al disminuir la espuma y que es favorecido al disminuir el diámetro del tubo, pero al ser éste muy cerrado (4 mm) el flujo líquido disminuye precisamente por ser el diámetro más cerrado y la mayor longitud del tubo, fenómeno también favorecido al ser la espira de menor diámetro. Esto concuerda con lo que la teoría indica: que el flujo depende dos variables, tanto del Re como de la curvatura de la espiral.

En las gráficas 30, 31 y 32 se muestra el Número de Dean ( $De$ ) en función de la longitud del serpentín, el diámetro de espira y el diámetro interno del tubo. En la gráfica No. 30; con un diámetro interno de tubo de 8 mm; se puede ver que para la espira con mayores diámetros, el  $De$  aumenta, pero para la espira más cerrada de 8 cm, el  $De$  aumenta y luego disminuye. Para cuando el diámetro de tubo interno es de 6 mm, el  $De$  aumenta para las espiras con mayor diámetro pero para la espira con 8 cm el  $De$  disminuye. El  $De$  de la espira de 12 cm aumenta pero no tanto como las espiras con 15 y 20 cm.

Para cuando el diámetro del tubo interno es de 4 mm (el más cerrado, gráfica 32), el  $De$  de la espira de 20 cm aumenta levemente, el  $De$  de la espira con 15 cm se ve estable, pero el  $De$  de las espiras con 12 y 8 cm disminuyen. Este fenómeno es parecido al comportamiento del Re y del flujo de cerveza. Los  $De$  son superiores a 100 para aquellos serpentines con diámetro de espira igual o inferior a 15 cm, no importando el diámetro interno del tubo. Esto significa que el efecto sobre la espuma es mayor si  $De$  es grande, para el caso de este estudio si  $De$  es cerca de 1 000.

Un  $De$  inferior favorece la formación de espuma o la pérdida de flujo. Lo anterior significa también que el flujo es laminar dentro del serpentín para todos los modelos probados y que los vórtices contrarrotativos son grandes. Es lo mismo que indica el  $Re_{crit}$ .

De acuerdo con el análisis anterior, al tener una cerveza de barril con un exceso de espuma, dicha cerveza puede hacerse pasar a través de un tubo en espiral. Si la espiral es muy abierta, el serpentín tendrá un efecto poco significativo sobre el exceso de espuma, aún cuando éste sea largo y aún cuando el diámetro interno del tubo sea cerrado (aunque sí habrá un efecto sobre la disminución de espuma, éste no será muy relevante). Al mismo tiempo el flujo total cerveza-espuma es alto debido al gran volumen de la espuma en relación con el volumen del líquido. La misma espuma dificulta el que la cerveza en su estado líquido avance. En este punto el  $Re$  y el  $De$  son un Número bajo.

A medida que el diámetro de la espira del serpentín es más cerrado, el volumen de la espuma disminuye, esto efecto es más marcado al aumentar la longitud y disminuir el diámetro interno del tubo. En la medida que el volumen de la espuma disminuye, permite aumentar el volumen de la cerveza en su estado líquido. Lo cual permite el aumento de  $Re$  y de  $De$ , no obstante al ser muy cerrado el diámetro de la espira, el tubo muy largo y el diámetro interno del tubo muy pequeño, el flujo líquido de cerveza (en esta etapa la espuma prácticamente se ha eliminado) disminuye debido a la pérdida por fricción, lo cual genera otro problema (la falta de flujo), es por ello que debe guardarse un equilibrio entre la generación de espuma y el flujo de cerveza a través de las dimensiones correctas del serpentín.

Según la sección 1.6 El Número de Reynolds siempre es menor que el Número de Reynolds crítico, por lo que el flujo nunca llega a ser turbulento. Todo lo anterior concuerda con lo esperado con la teoría, pues al final el serpentín estabiliza la mezcla gas carbónico-cerveza debido a que cambia el patrón de flujo dentro del tubo retrazando el apareamiento del flujo turbulento y de transición de tal forma que el flujo siempre es laminar.

Está fuera del alcance de este estudio el poder establecer el comportamiento de la espuma dentro del tubo recto o curvo, no obstante los resultados validan que el tubo curvo tiene un efecto notable sobre la generación de exceso de espuma en la cerveza. Sobre la temperatura en términos prácticos no cambió durante las pruebas efectuadas. De acuerdo con la sección 2.8, se acepta la hipótesis alternativa  $H_1$  y se rechaza la hipótesis nula  $H_0$ .



## CONCLUSIONES

1. El serpentín óptimo obtenido tiene un diámetro de espira de 8 cm, longitud de tubo de 13 m y diámetro interno de 6 mm cuyo efecto disminuye la espuma a un 4% respecto al volumen de cerveza sin afectar el desempeño práctico del flujo de cerveza (flujo obtenido de 2,08 l/min) al conectar dicho serpentín a un equipo dispensador de cerveza de barril.
2. Para el diseño de serpentín óptimo; el porcentaje de espuma (%E) y la longitud del tubo L (en m) se relacionan por:  $\%E = -7,29L + 92,6$ . Mientras que el flujo F de cerveza (l/min) se relaciona por  $F = 0,0549L^2 - 1,355L + 10,4$ .
3. La adición de un serpentín del tipo estudiado no tiene un efecto importante sobre la temperatura de salida de la cerveza.
4. El Número de Reynolds crítico sitúa a los flujos de los modelos de serpentín probados en patrones de flujo laminar, esto es debido a la naturaleza propia de un serpentín, fenómeno que se fundamenta teóricamente en el efecto Dean.





## RECOMENDACIONES

1. Debido a que en el presente estudio únicamente se probaron los diferentes diseños de serpentín en un sólo tipo de equipo dispensador, es importante repetir el estudio en otros de diferente fabricante.
2. Es conveniente monitorear el comportamiento de la sanitización y limpieza del sistema de enfriamiento-dispensamiento de cerveza de barril a través de pruebas microbiológicas, dado que el serpentín agrega un buen tramo de tubo, el cual puede ser difícil de mantener con condiciones de inocuidad.
3. Considerando que existen diversos tipos de cerveza; oscuras por ejemplo, es importante realizar pruebas para otros tipos de cerveza.
4. Es importante determinar si es posible reducir el tamaño del serpentín (su longitud principalmente) al partir el flujo en dos antes de ingresar al serpentín, o bien enrollando el tubo sobre diferentes capas de espiras.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARDERAS, Antonio. *Problemas de Flujo de Fluidos*. México: Noriega editores LIMUSA. 134 p.
2. BAMFORTH, C.W. *The Relative Significance of Physics and Chemistry for Beer Foam Excellence: Theory and Practice* [en línea]. Journal of the Institute of Brewery 110 volumen 4. Estados Unidos. 2004. [ref. febrero 2009]. Disponible en web: <http://www.scientificsocieties.org/jib/papers/2004/g-2004-1306-269.pdf>.
3. CENSO, Eddy. *Capacitación Producto No Embotellado*. Febrero 2004
4. EMRICH, R. J. H. *The Perfect Pour: Beer Foam Physics and the Art of Dispensing Beer*. Canadá: Universidad de Waterloo. 2006. 5 p.
5. GEANKOPLIS, Christie. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. (3a. ed.). Traducción por Patricia Straulino. México: Compañía Editorial Continental. 1999. 991 p.
6. HUAMING Ju et al. *Hydraulic Performance of Small Bending Radius Helical Coil-Pipe* [en línea]. Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 32, No. 10, Octubre 2001. Beijing, China. [ref. febrero 2009]. Disponible en web: [http://www.jstage.jst.go.jp/article/jnst/38/10/826/\\_pdf](http://www.jstage.jst.go.jp/article/jnst/38/10/826/_pdf)

7. INCROPERA, Frank y DeWITT, David. *Fundamentos de transferencia de calor*. (4. ed.). Traducción por Ricardo Cruz. México: Prentice Educación. 1999. 890 p.
8. INFOPLAN BONN. *Gepflegtes Bier-gutes Bier, Wissenswertes über gepflegtes Bier*. Alemania: Deutscher Brauer-Bund E.V.
9. MEBAK e.V. *Métodos de Análisis Cerveceros*. Tomo IV. (Traducción de la tercera edición en alemán por la Asociación Latinoamericana de Fabricantes de cerveza). Venezuela: ALAFACE. 2001. 131 p.
10. MOULES, Carole. *Interfacial Elasticity and the Destabilization of Beer Foams* [en línea]. [ref. enero 2011]. Disponible en Web: <http://www.esum.com.cn/updata/jiem3.pdf>
11. PAISARN, Naphon. *A Review of Flow and Heat Transfer Characteristics in Curved Tubes* [en línea]. Tailandia: Universidad de Tecnología Thonburi. [ref. enero 2009]. Disponible en web: <http://www.thailand-energy.info/Article/Ts-3%20a%20review%20of%20flow20and%20heat%20transfer%20characteristics%20in%20curved%20tubes.pdf>
12. PERRY, R., GREEN, D. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 7a Edición. Estados Unidos: Editorial McGraw-Hill, 1999.
13. RENNIE, Timothy. *Numerical and Experimental Studies of a Double-Pipe Helical Heat Exchanger* [en línea]. Canadá: McGill University. 2004. [ref. julio 2008]. Disponible en web. <http://webpages.mcgill.ca/staff/deptshare/FAES/066>

14. WEBSTER D, Humphrey. *Traveling Wave Instability in Helical Coil Flow* [en línea]. Estados Unidos: American Institute of Physics 1997. [ref. julio 2009]. Disponible en web: <http://people.ce.gatech.edu/~dw139/pof3.pdf>
  
15. THE BEER NUT, INC. *Guide to Kegging Beer* [en línea]. <http://www.beernut.com/zen-cart/pub/kegging.pdf>. [Consulta: febrero 2011].
  
16. THE FRANKE BEVERAGE SYSTEMS [en línea]. <http://www.franke.com/beveragesystems/de/en/home.html/> [Consulta: febrero 2011].
  
17. THE HEINEKEN BEER [en línea]. <http://www.heineken.com/AgeGateway.aspx>. [Consulta: mayo 2009].
  
18. THE MICROMATIC KEGERATOR, DRAFT KEG BEER EQUIPMENT, TAPS [en línea]. [www.micromatic.com](http://www.micromatic.com). [Consulta: febrero 2011].



## BIBLIOGRAFÍA

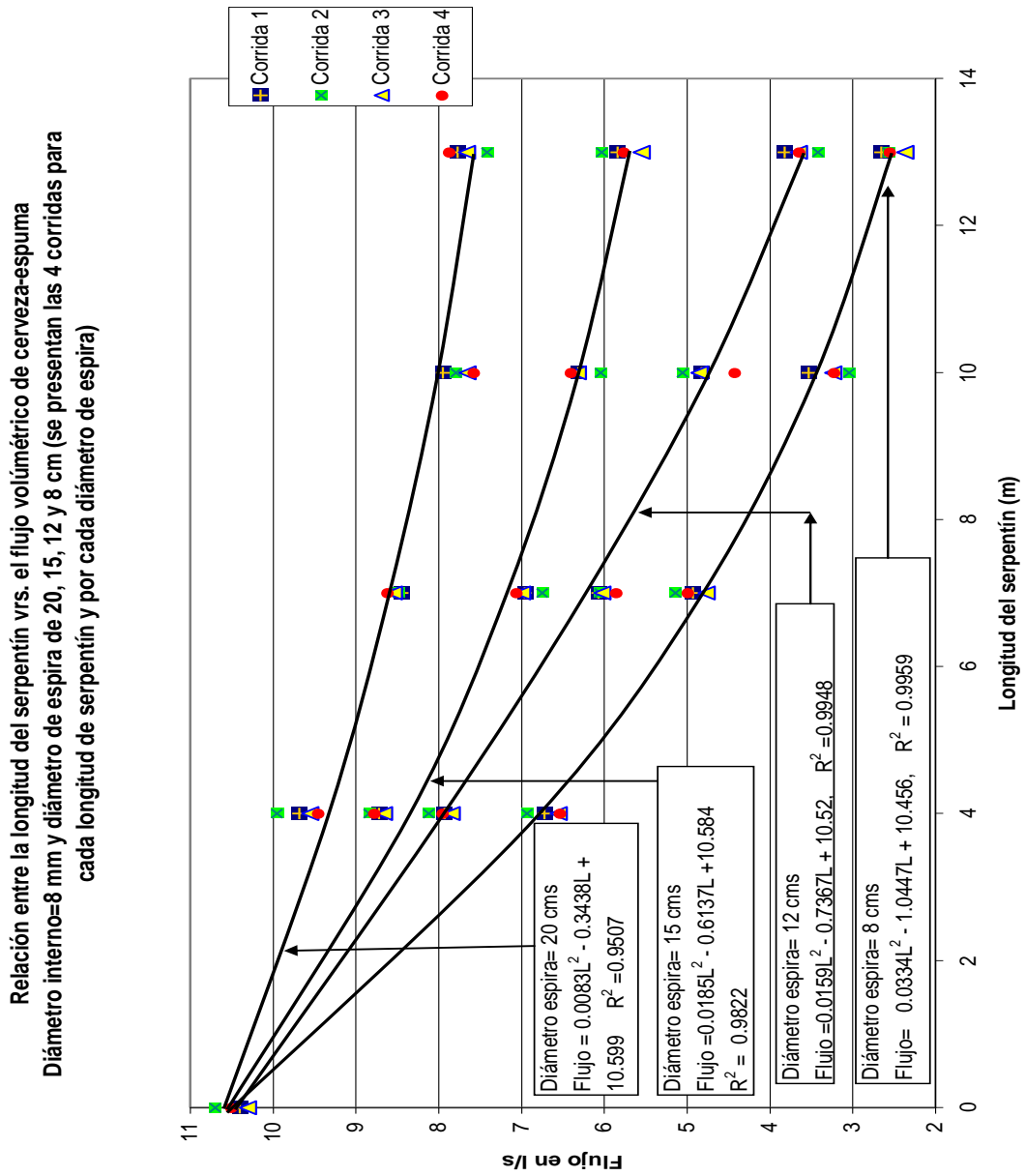
1. LAIDLER, Keith y MEISER, John. *Fisicoquímica*. (2a.ed.). Traducción por María Aguilar. México: Compañía Editorial Continental. 2002.
2. LEVINE, Ira. *Fisicoquímica*. (4ª. Ed.). Traducción por Ángel González. España: McGraw-Hill Interamericana. 1996.
3. MASTER BREWERS ASSOCIATION OF THE AMERICAS. *El cervecero en la práctica*. (2ª. ed.). Traducción por ALAFACE. Perú: ALAFACE. 1977.
4. POLLOCK, J. *Brewing Science*. Inglaterra: Academic Press. 1981.





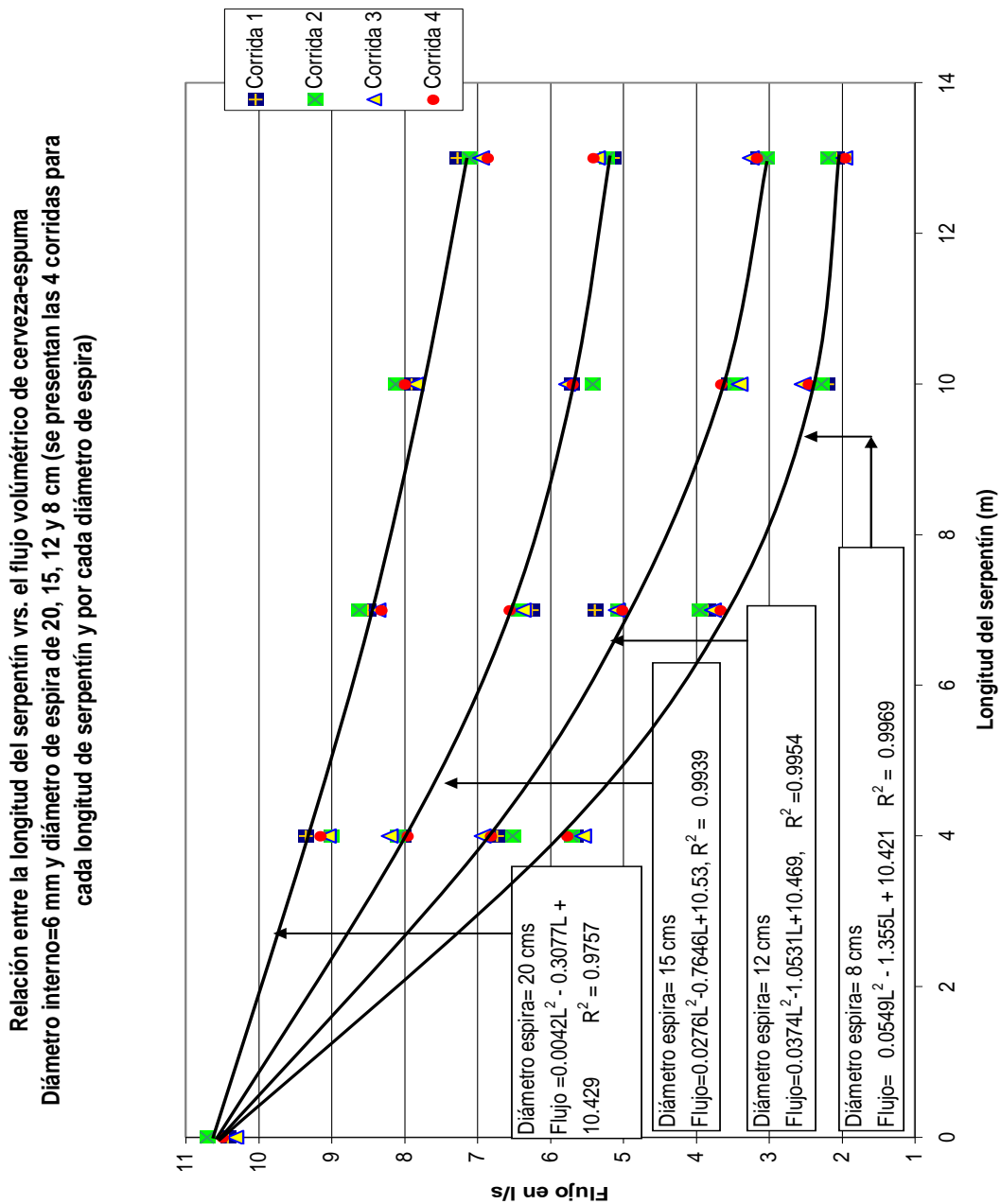
## APÉNDICES

Relación entre la longitud del serpentín vrs. el flujo volumétrico de cerveza-espuma para un diámetro interno de 8 mm y diámetro de espira de 20, 15, 12 y 8 cm. Se presentan las 4 corridas para cada longitud de serpentín y por cada diámetro de espira



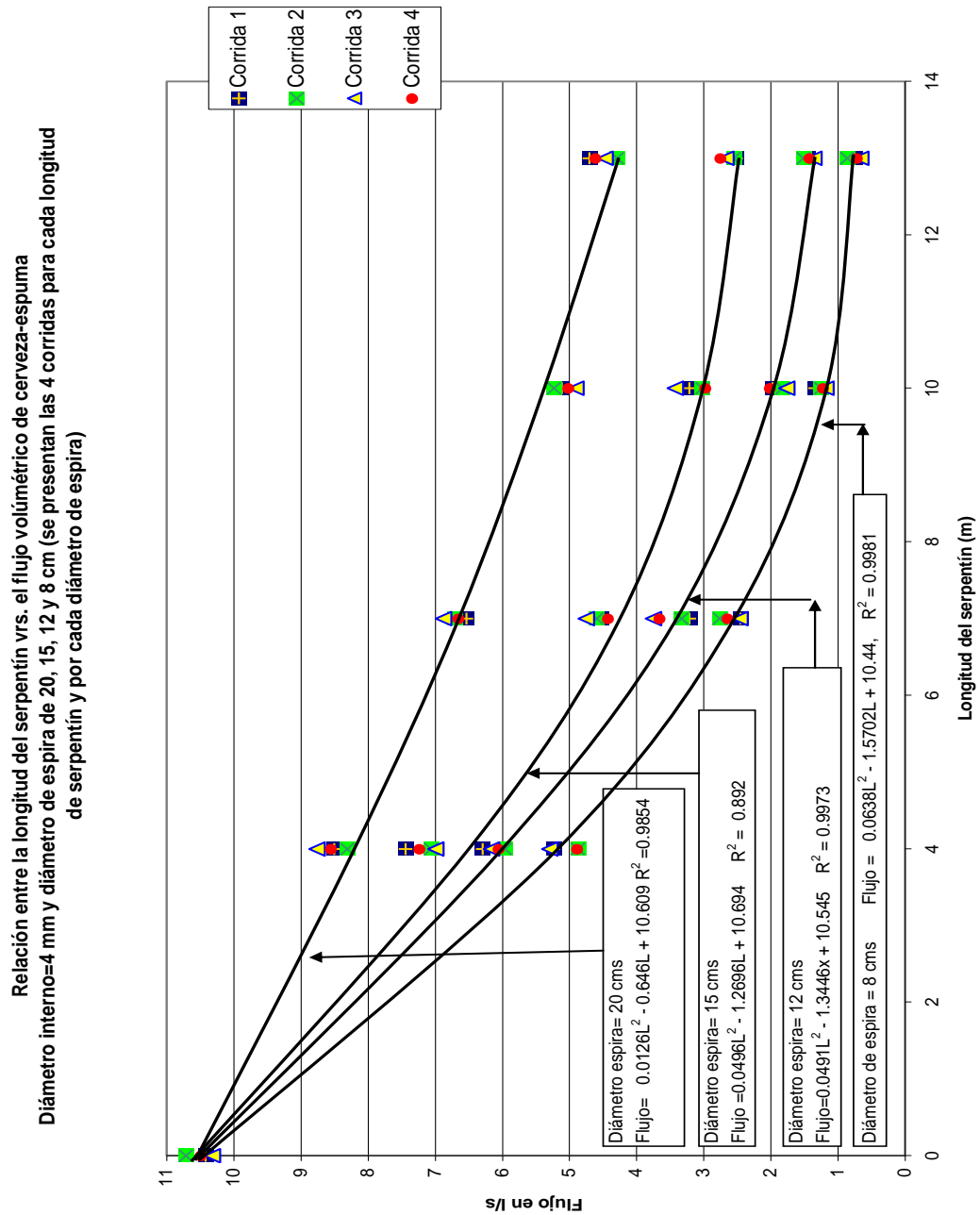
Fuente: elaboración propia.

Relación entre la longitud del serpentín vrs. el flujo volumétrico de cerveza-espuma para un diámetro interno de 6 mm y diámetro de espira de 20, 15, 12 y 8 cm. Se presentan las 4 corridas para cada longitud de serpentín y por cada diámetro de espira



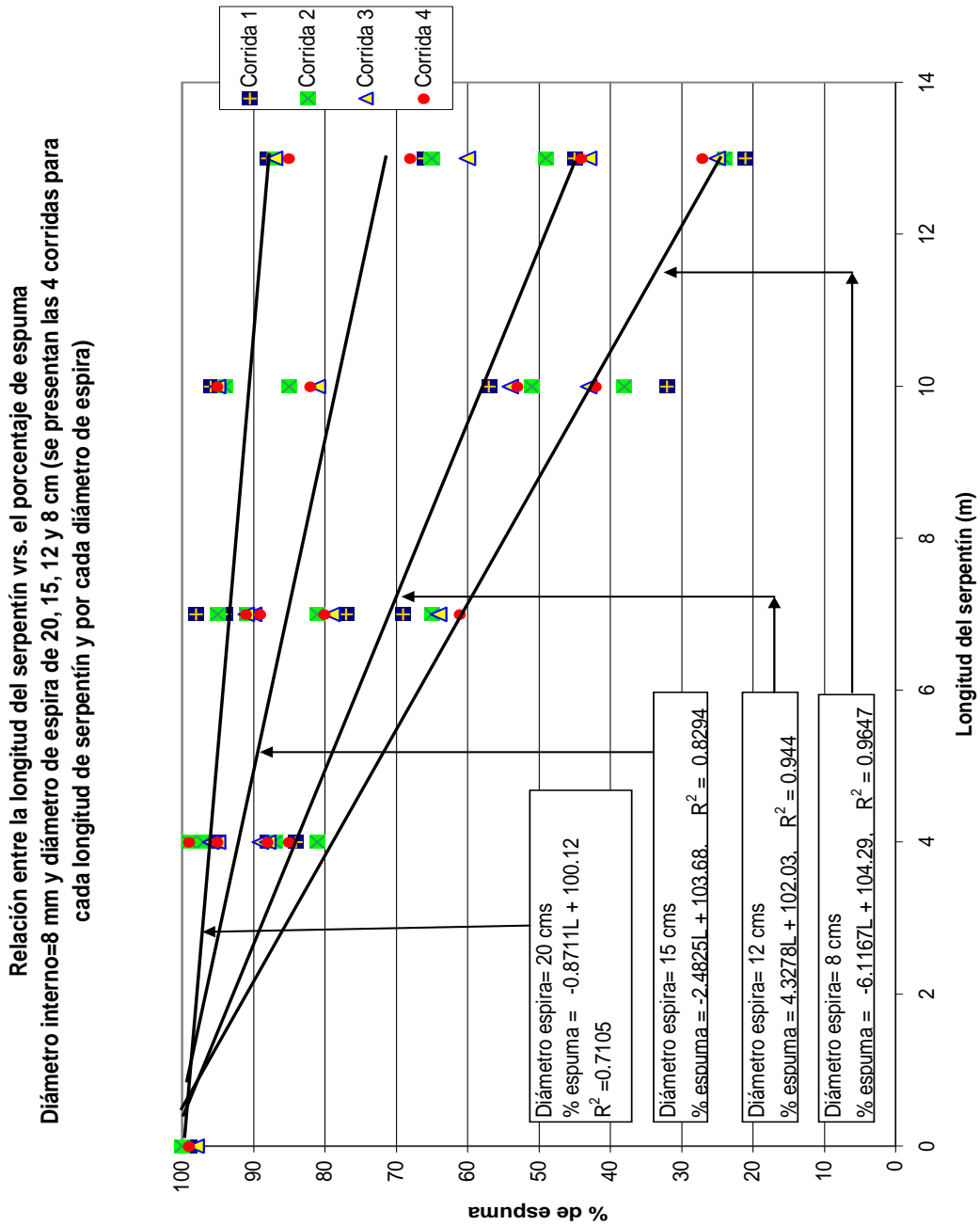
Fuente: elaboración propia.

Relación entre la longitud del serpentín vrs. el flujo volumétrico de cerveza-espuma para un diámetro interno de 4 mm y diámetro de espira de 20, 15, 12 y 8 cm. Se presentan las 4 corridas para cada longitud de serpentín y por cada diámetro de espira



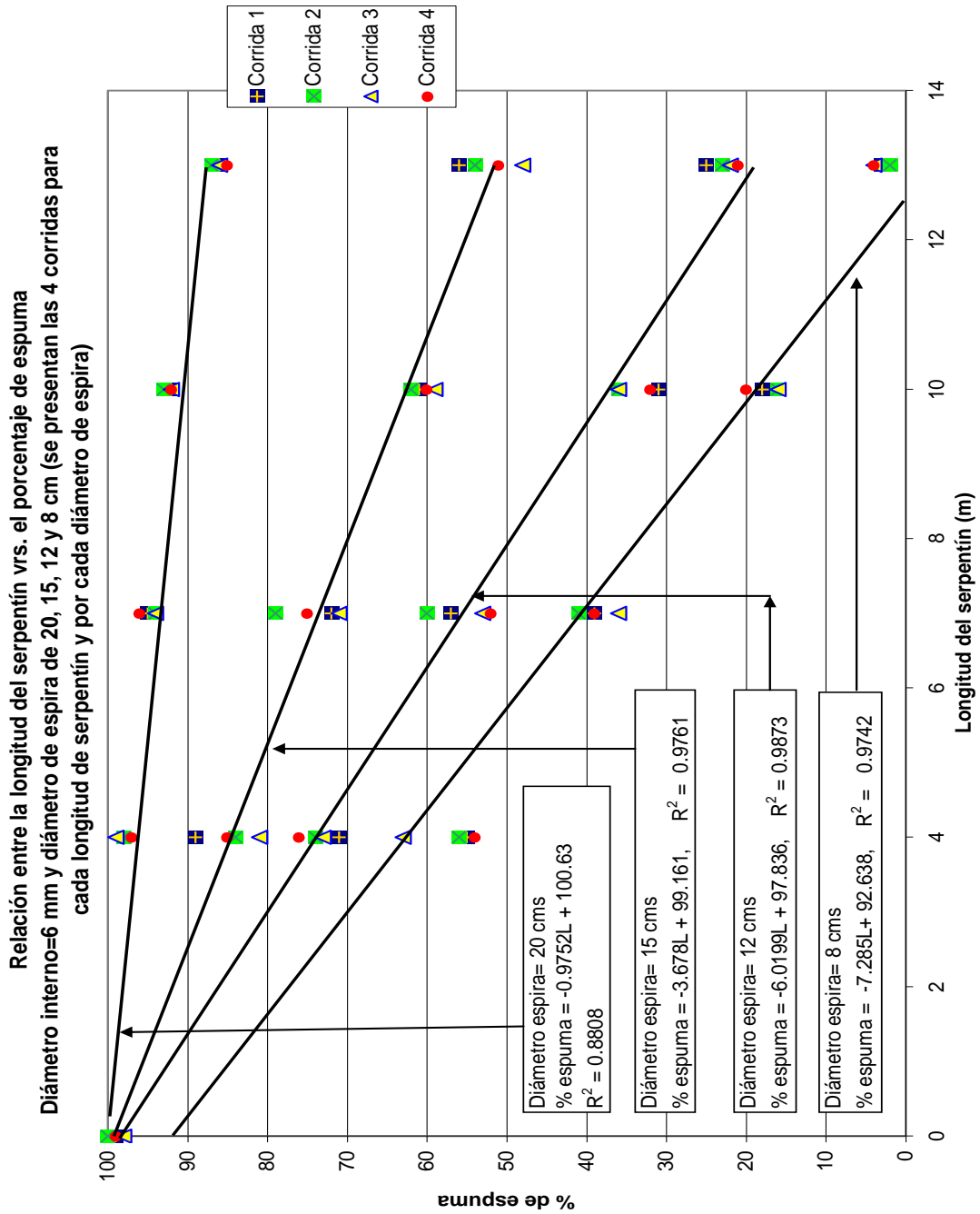
Fuente: elaboración propia.

**Relación entre la longitud del serpentín vrs. el porcentaje de espuma para un diámetro interno de 8 mm y diámetro de espira de 20, 15, 12 y 8 cm. Se presentan las 4 corridas para cada longitud de serpentín y por cada diámetro de espira**



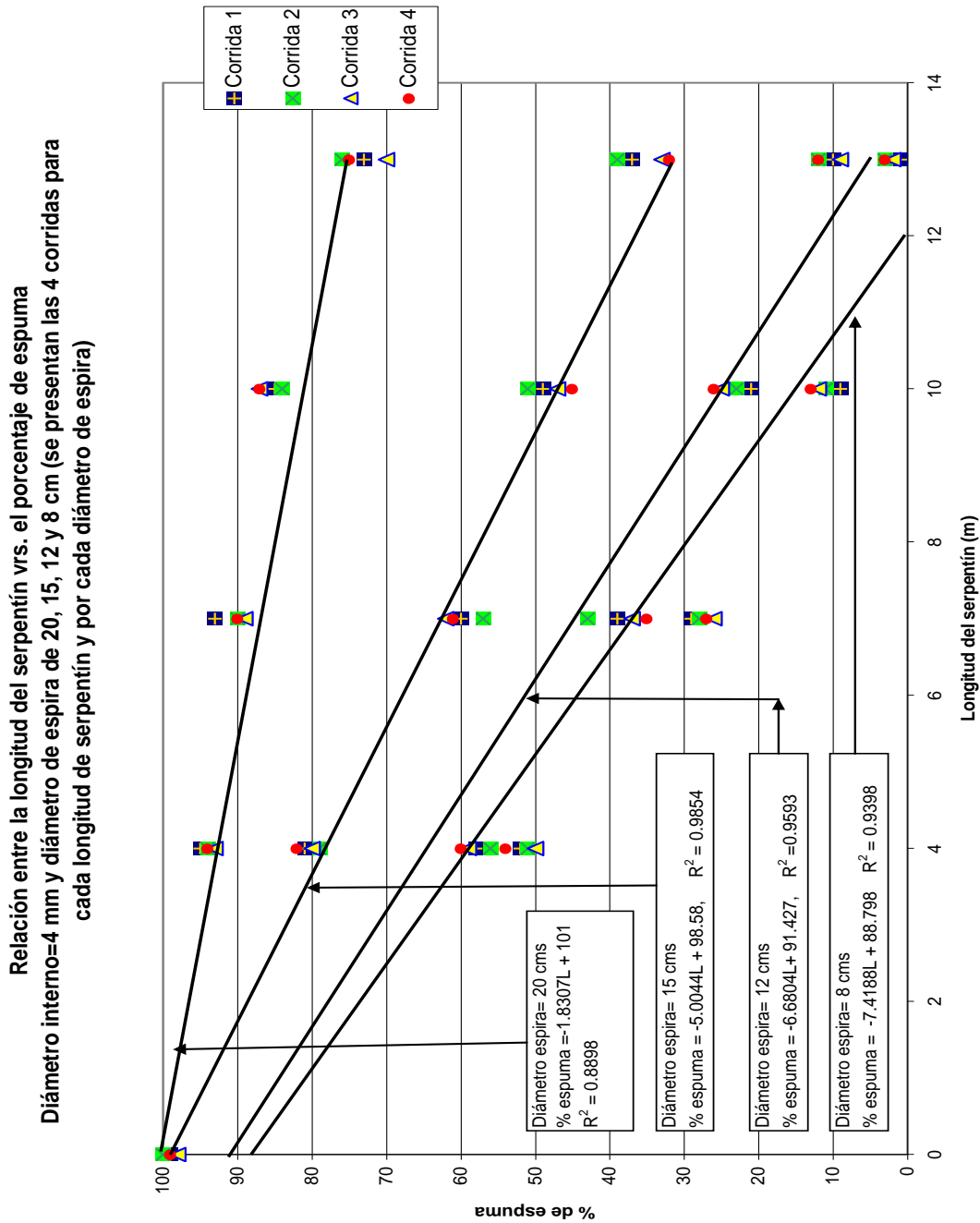
Fuente: elaboración propia.

Relación entre la longitud del serpentín vrs. el porcentaje de espuma para un diámetro interno de 6 mm y diámetro de espira de 20, 15, 12 y 8 cm. Se presentan las 4 corridas para cada longitud de serpentín y por cada diámetro de espira



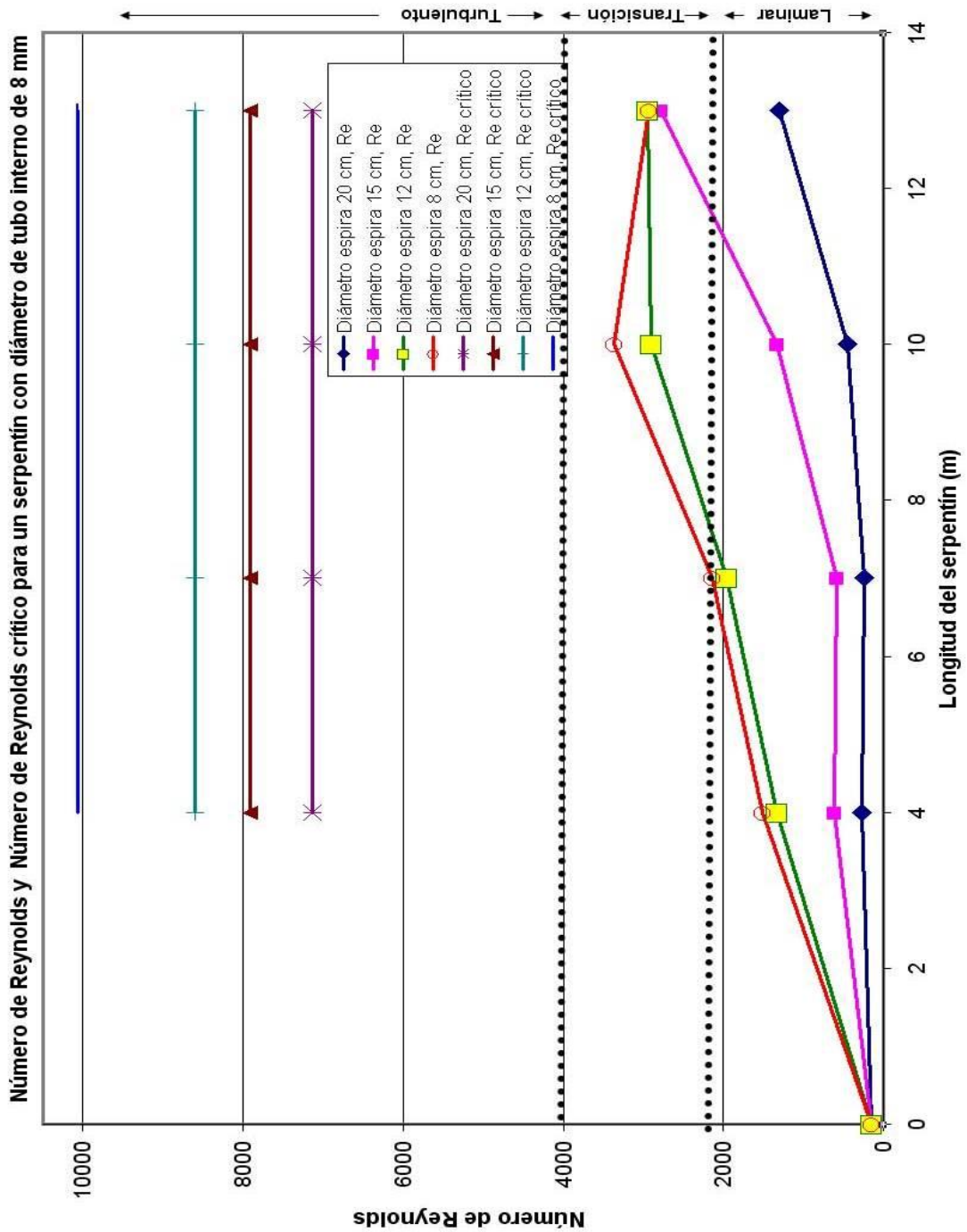
Fuente: elaboración propia.

Relación entre la longitud del serpentín vrs. el porcentaje de espuma para un diámetro interno de 4 mm y diámetro de espira de 20, 15, 12 y 8 cm. Se presentan las 4 corridas para cada longitud de serpentín y por cada diámetro de espira



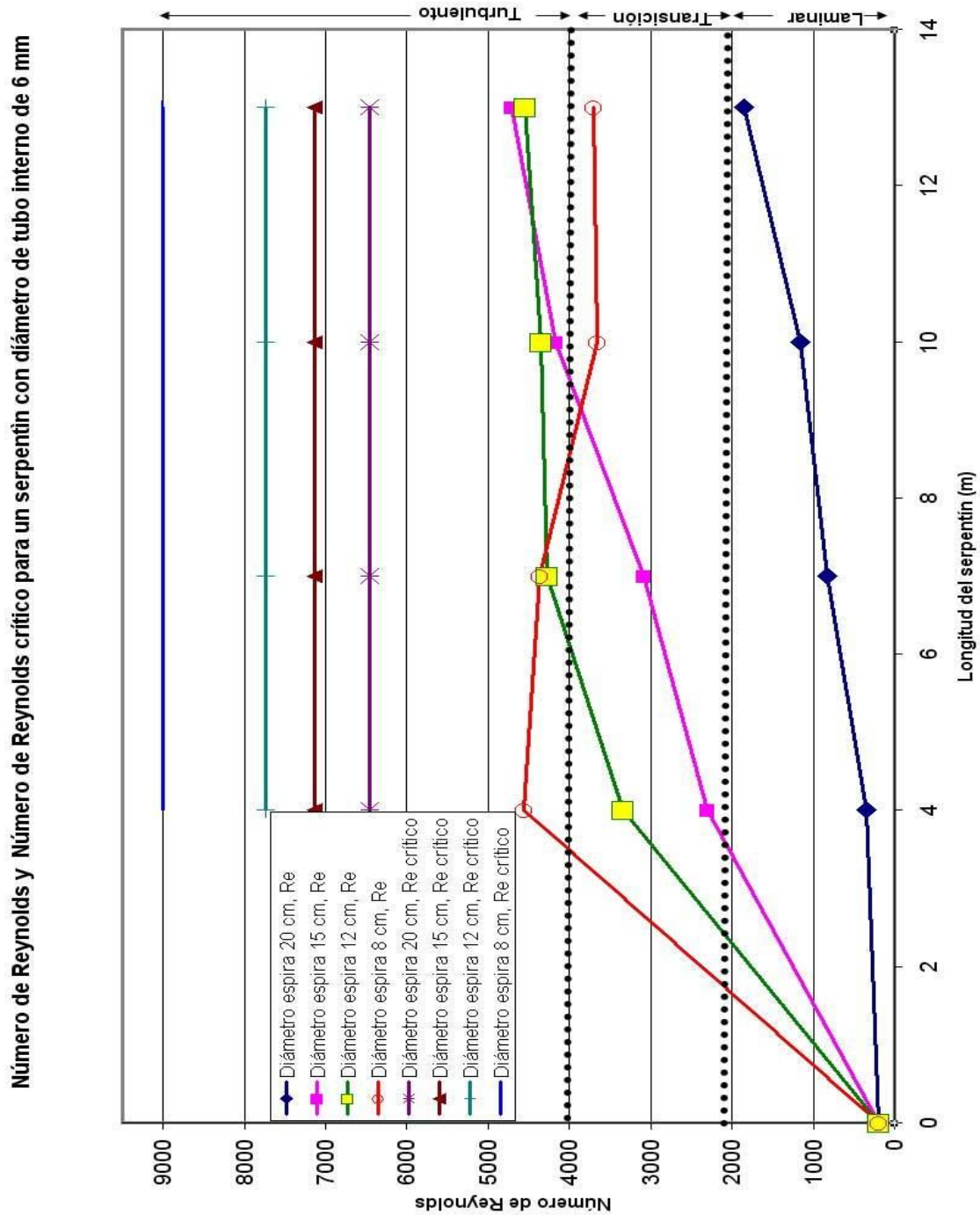
Fuente: elaboración propia.

**Número de Reynolds (Re) y Número de Reynolds crítico (Recrit) para diferentes longitudes de serpentín y diferentes diámetros de espira, para un diámetro interno de tubo de 8 mm**



Fuente: elaboración propia.

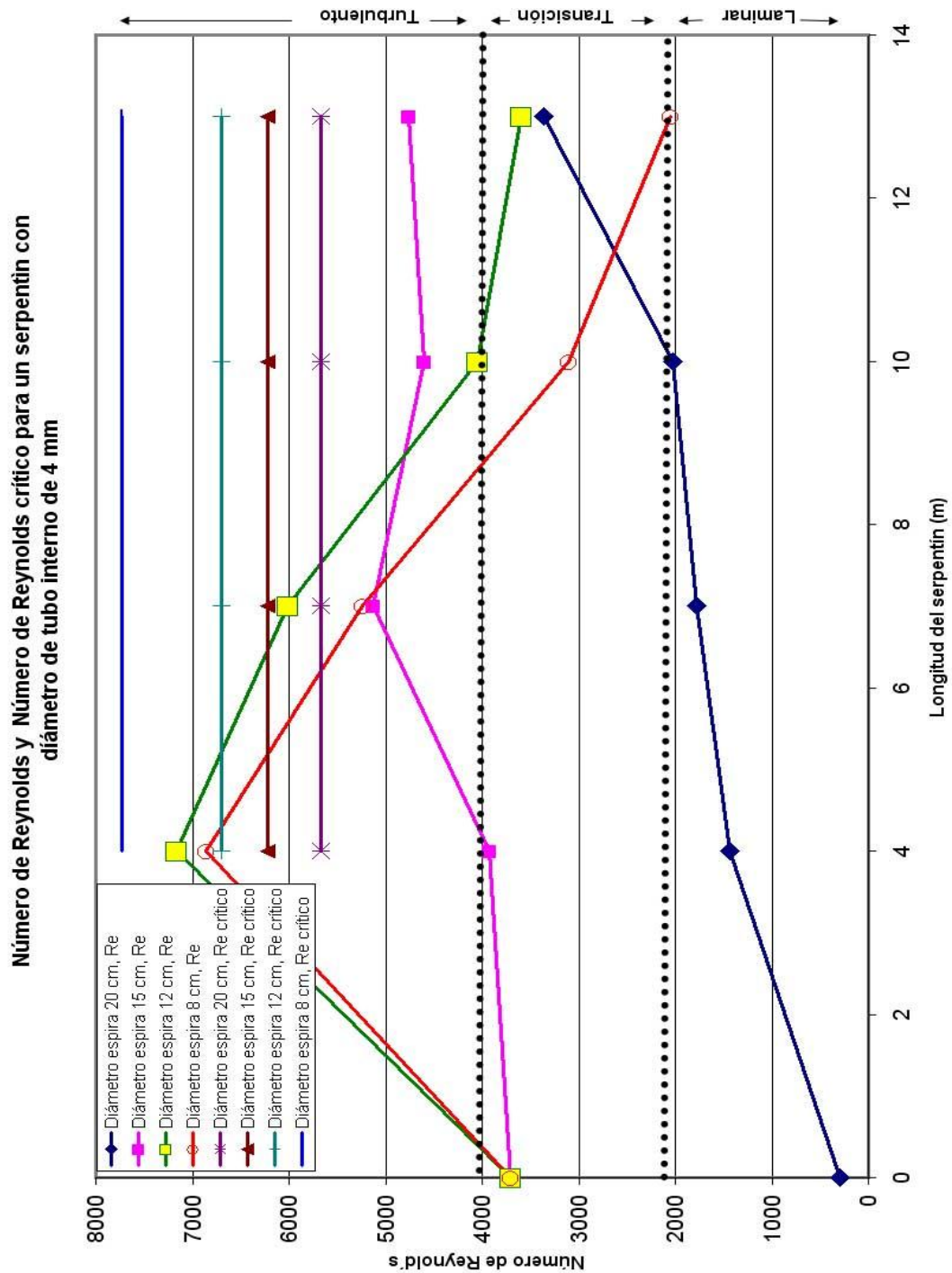
**Número de Reynolds (Re) y Número de Reynolds crítico (Recrit) para diferentes longitudes de serpentín y diferentes diámetros de espira, para un diámetro interno de tubo de 6 mm**



Fuente: elaboración propia.

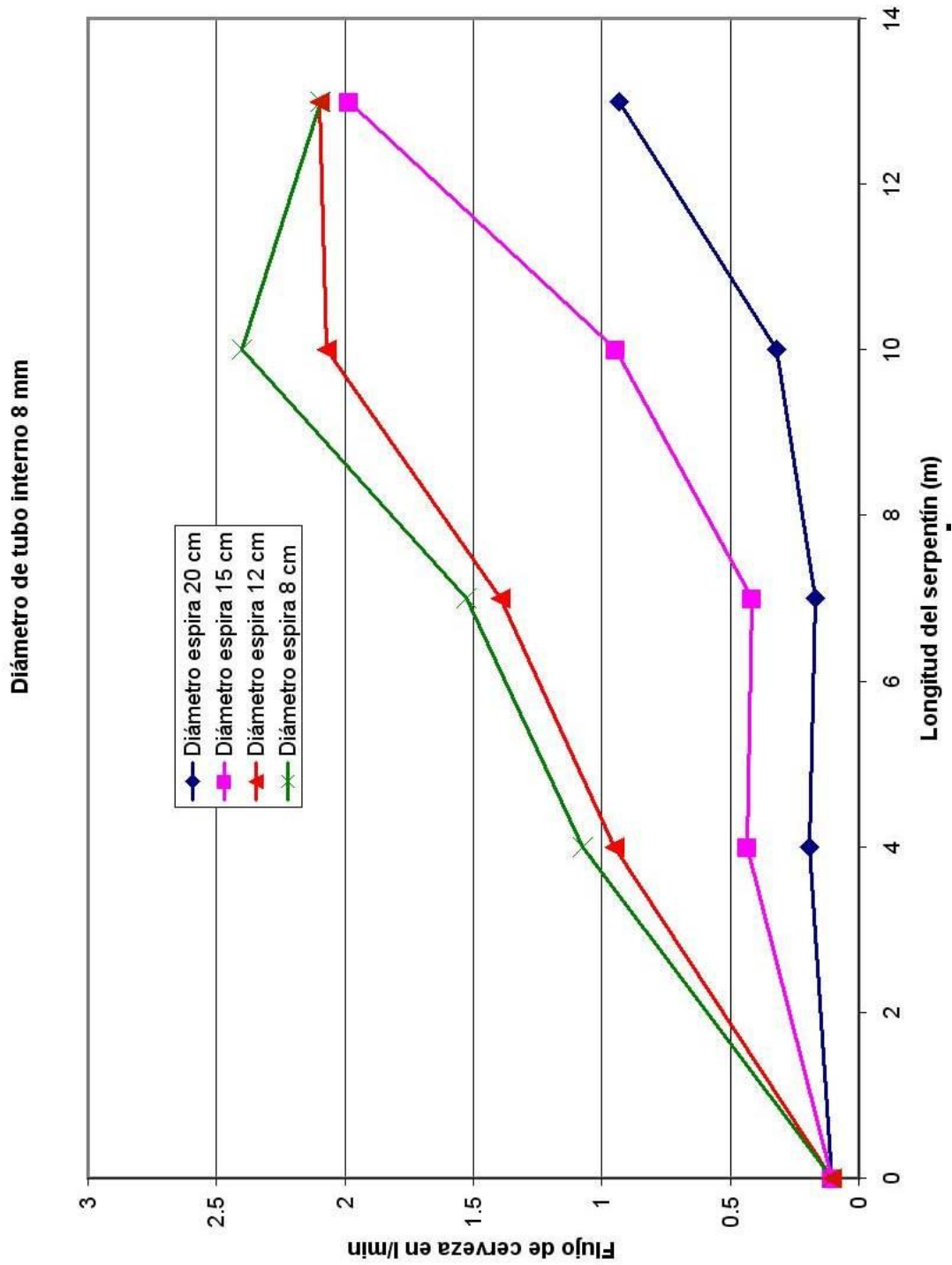


**Número de Reynolds (Re) y Número de Reynolds crítico (Recrit) para diferentes longitudes de serpentín y diferentes diámetros de espira, para un diámetro interno de tubo de 4 mm**



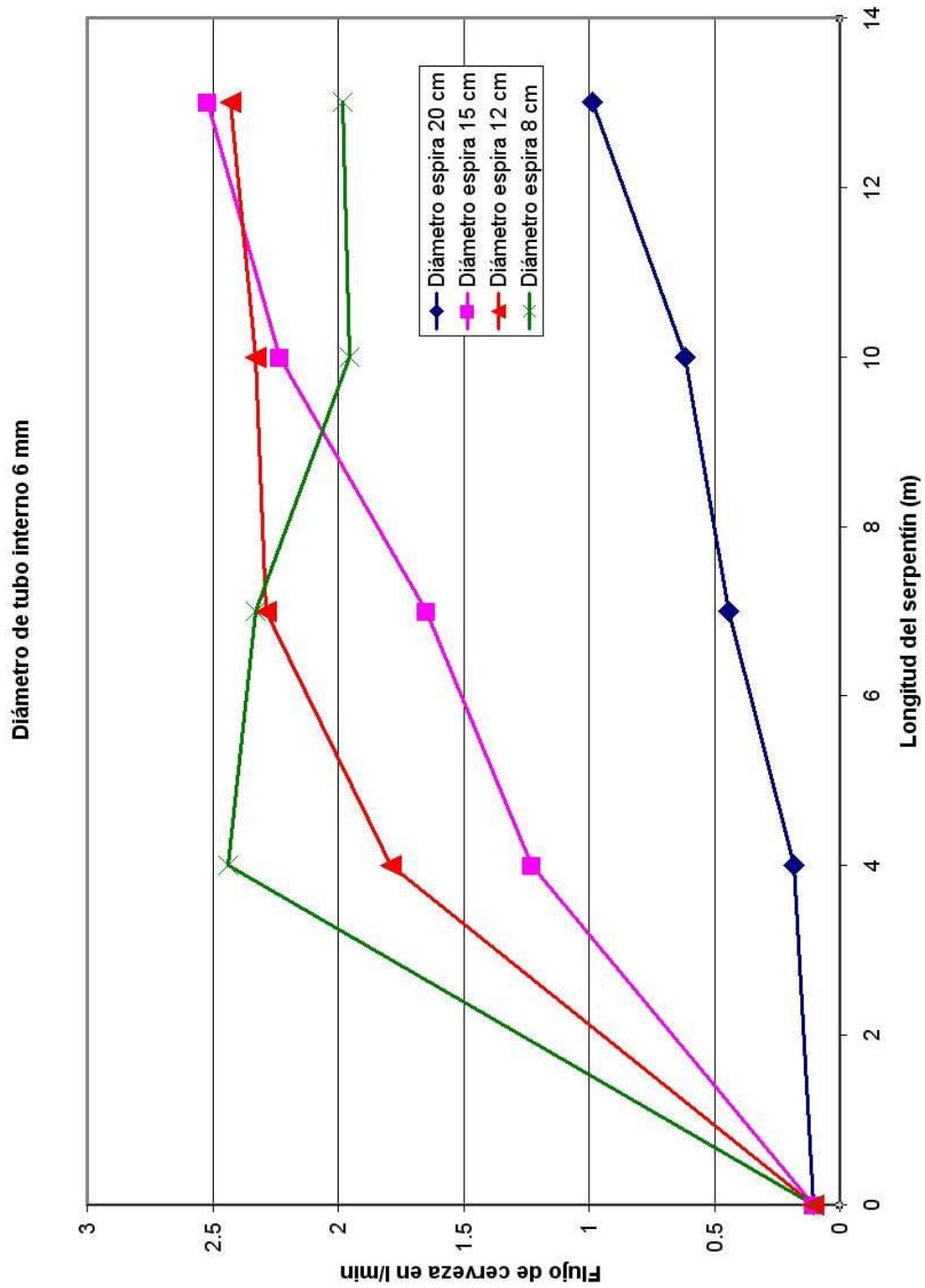
Fuente: elaboración propia.

**Flujo de cerveza en función de diferentes longitudes y diámetros de espira de un serpentín con 8 mm diámetro interno de tubo**



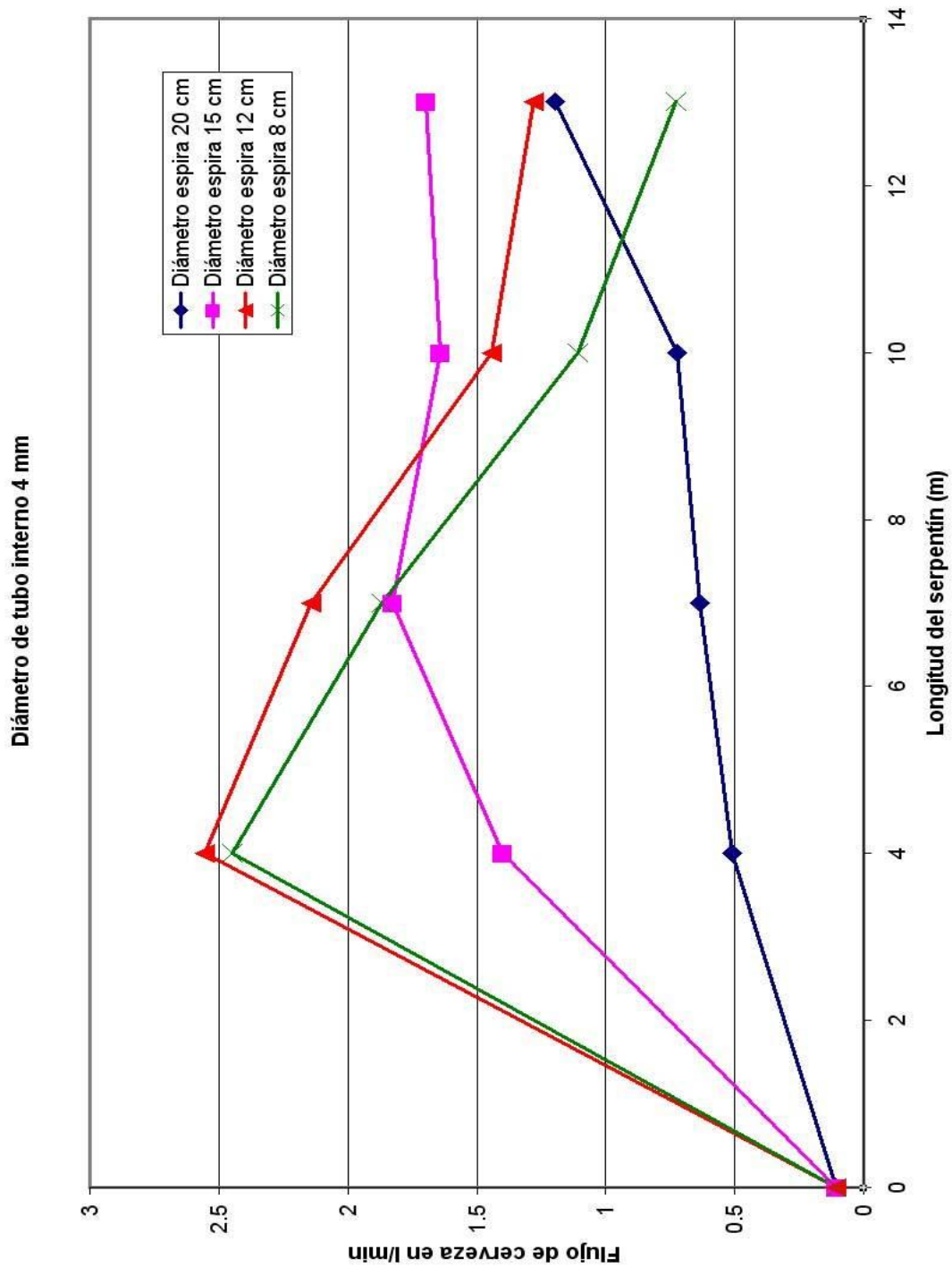
Fuente: elaboración propia.

**Flujo de cerveza en función de diferentes longitudes y diámetros de espira de un serpentín con 6 mm diámetro interno de tubo**



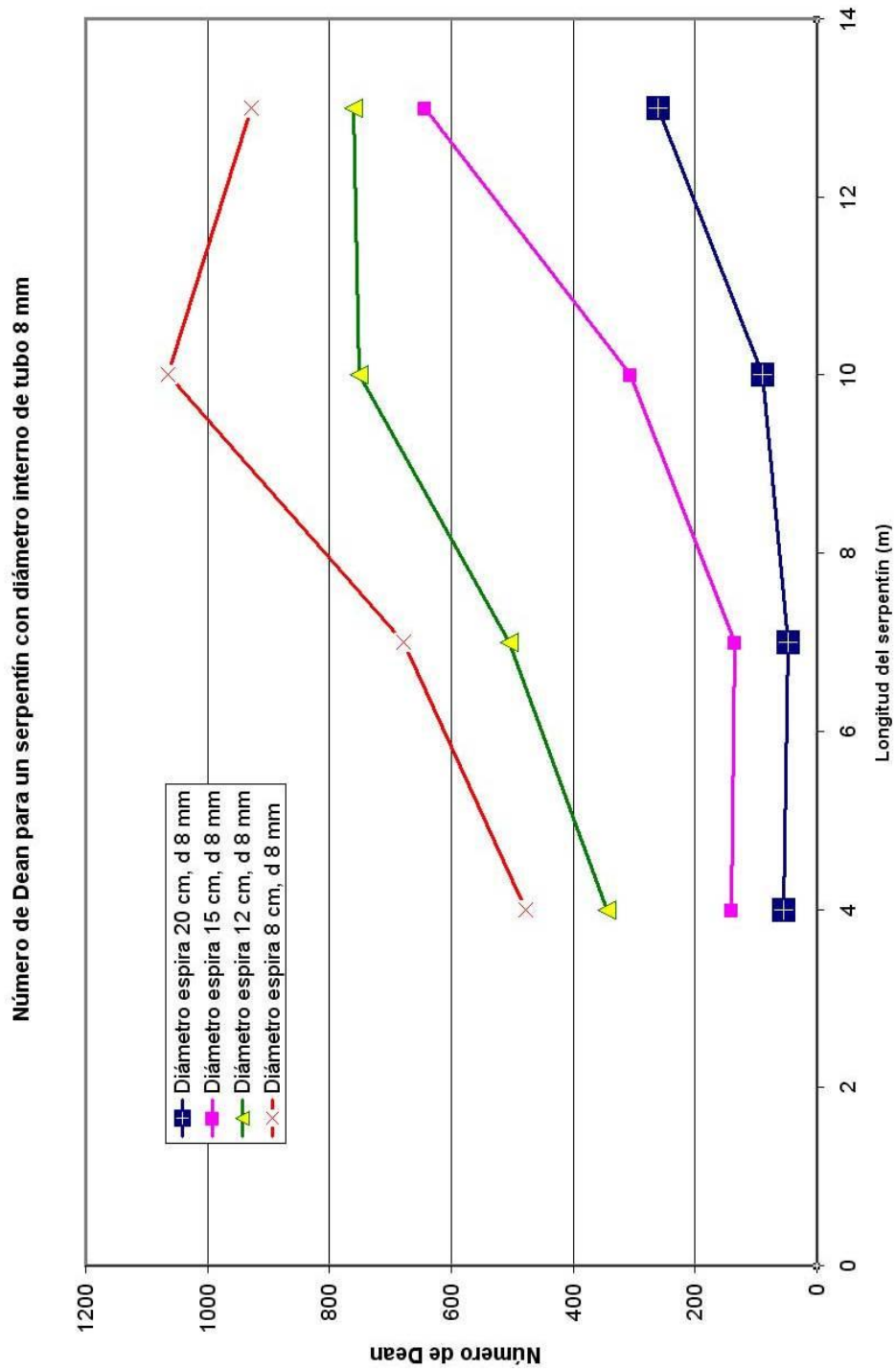
Fuente: elaboración propia.

**Flujo de cerveza en función de diferentes longitudes y diámetros de espira de un serpentín con 4 mm diámetro interno de tubo**



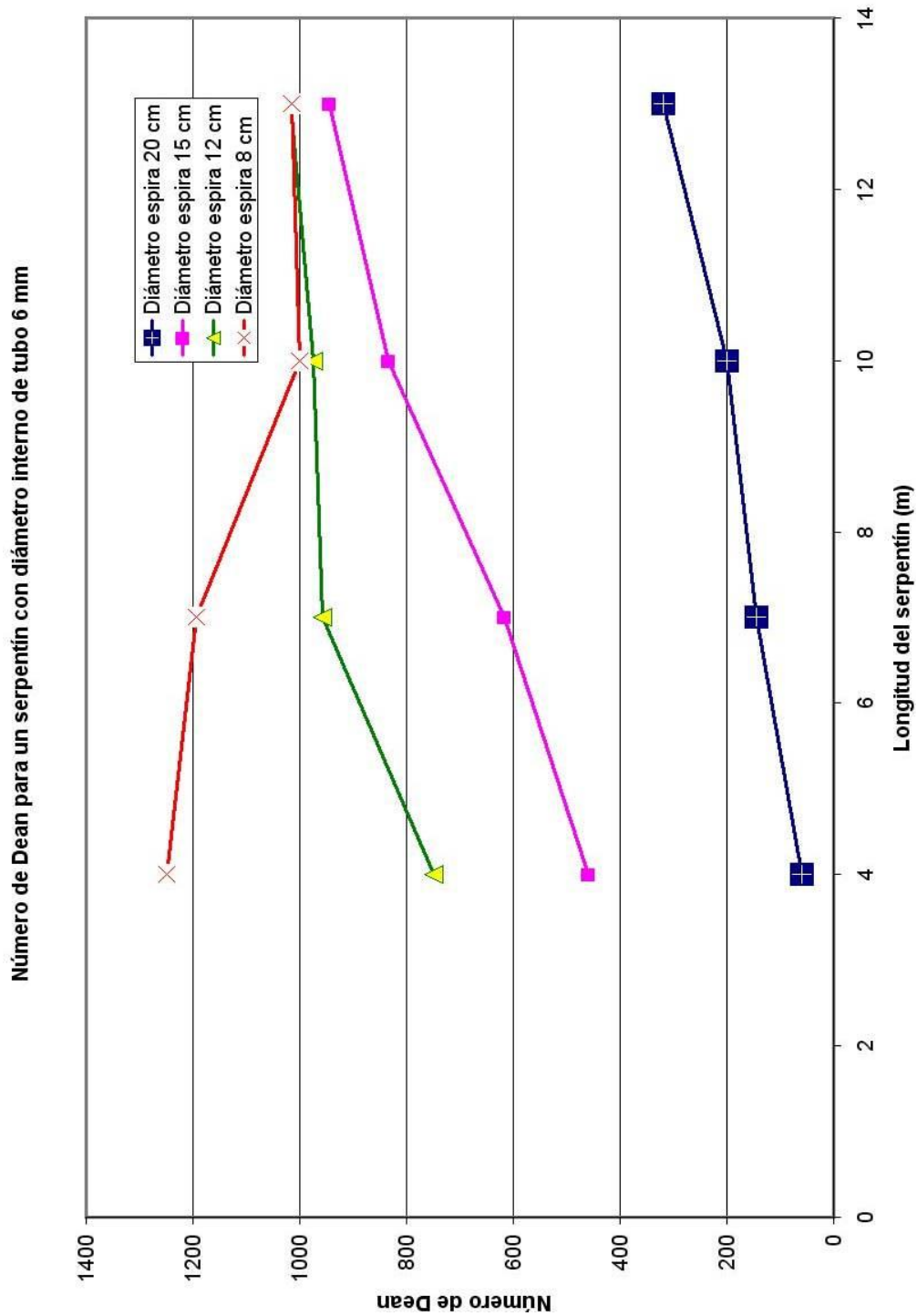
Fuente: elaboración propia.

**Número de Dean (De) en función de diferentes longitudes y diámetros de espira de un serpentín con 8 mm diámetro interno de tubo**



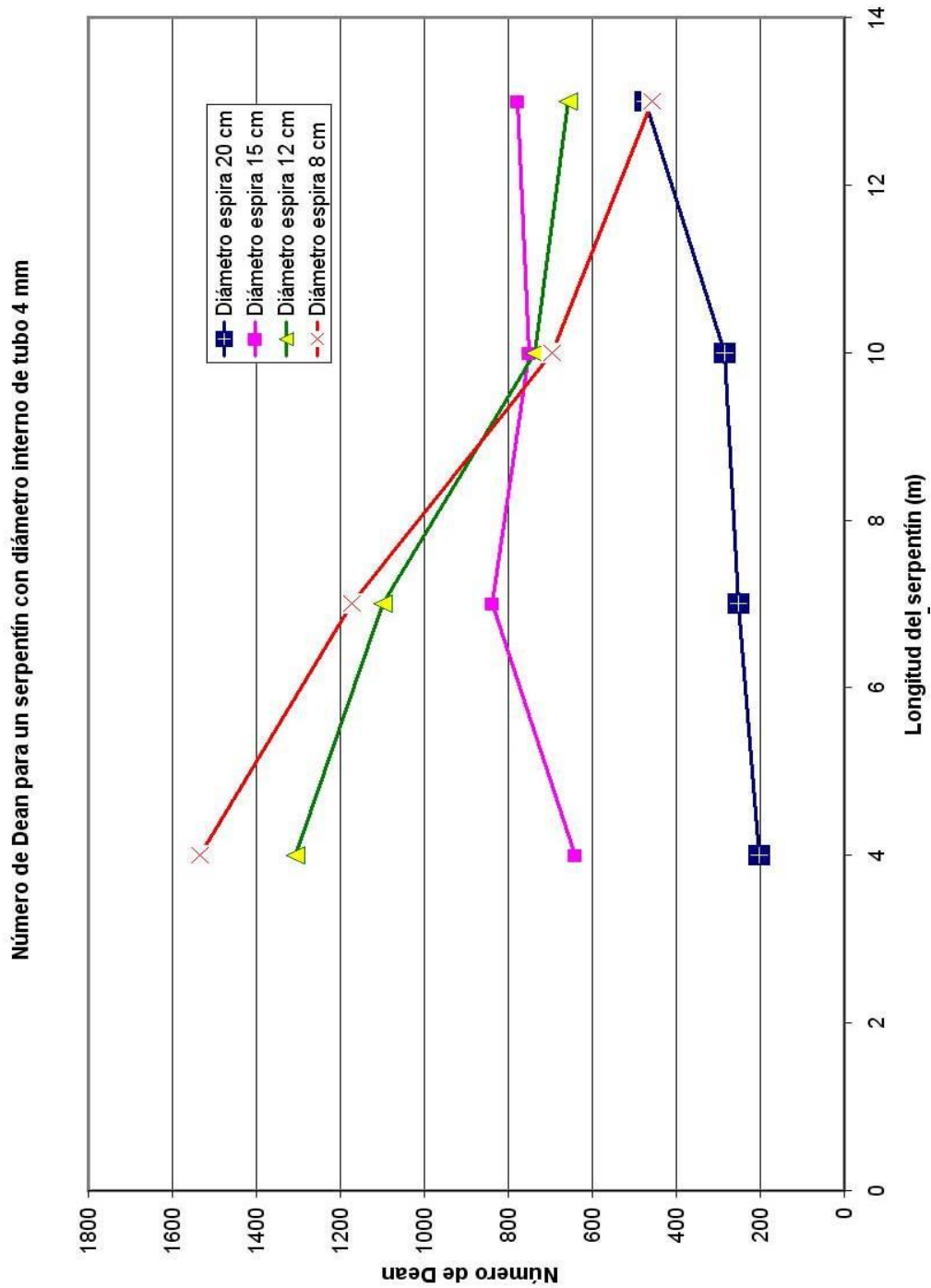
Fuente: elaboración propia.

**Número de Dean (De) en función de diferentes longitudes y diámetros de espira de un serpentín con 6 mm diámetro interno de tubo**



Fuente: elaboración propia.

**Número de Dean (De) en función de diferentes longitudes y diámetros de espira de un serpentín con 4 mm diámetro interno de tubo**



Fuente: elaboración propia.

**Comparación visual entre el flujo de salida para un grifo sin serpentín (izquierda) y uno con serpentín (derecha) para un mismo barril de cerveza**



Fuente: elaboración propia.

**Comparación visual para el porcentaje de espuma obtenido. Sin serpentín (izquierda) y con serpentín (derecha) para un mismo barril de cerveza**



Fuente: elaboración propia.

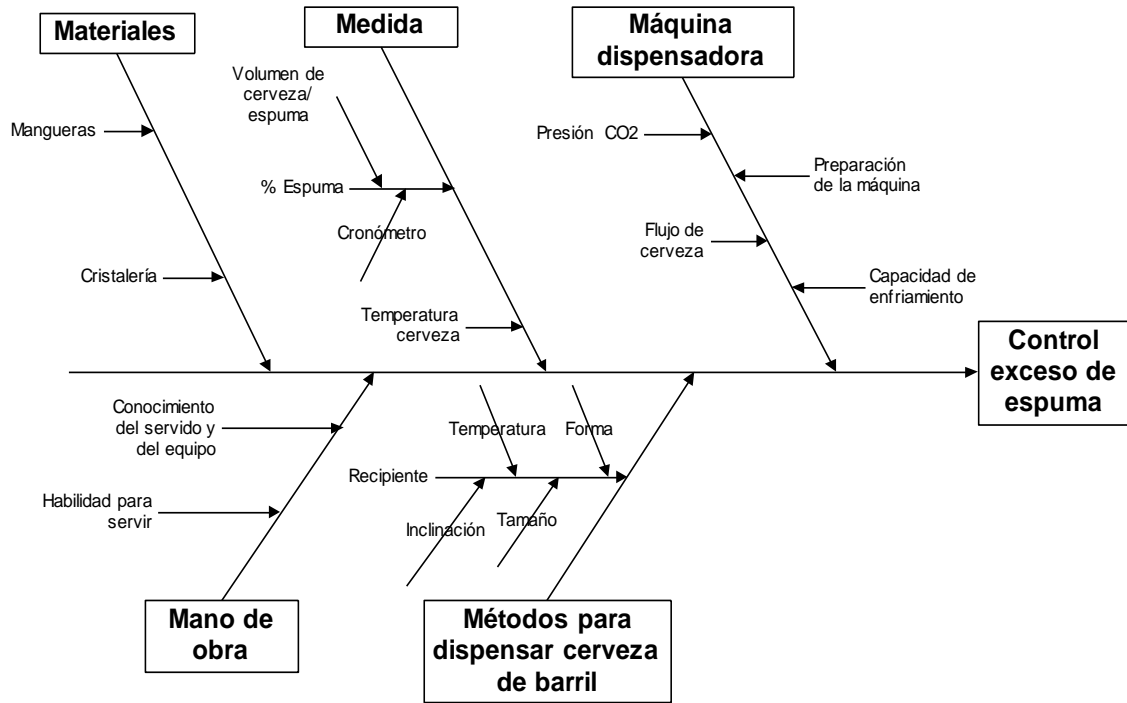


**Uno de los modelos de serpentín probados, el material es acero inoxidable**



Fuente: elaboración propia.

## Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

## ANEXO

### Volúmenes de dióxido de carbono en función de la presión y la temperatura para cerveza

#### Volumes of Carbon Dioxide

*Pounds per square inch (psi)*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
30	1.82	1.92	2.03	2.14	2.23	2.36	2.48	2.60	2.70	2.82	2.93														
31	1.78	1.88	2.00	2.10	2.20	2.31	2.42	2.54	2.65	2.76	2.86														
32	1.75	1.85	1.95	2.05	2.16	2.27	2.38	2.48	2.59	2.70	2.80	2.90													
33	1.81	1.91	2.01	2.12	2.23	2.33	2.43	2.53	2.63	2.74	2.84														
34	1.78	1.86	1.97	2.07	2.18	2.28	2.38	2.48	2.58	2.68	2.79	2.89													
35	1.83	1.93	2.03	2.14	2.24	2.36	2.43	2.52	2.62	2.73	2.83	2.93													
36	1.79	1.88	1.99	2.09	2.20	2.29	2.37	2.47	2.57	2.67	2.77	2.86													
37	1.94	1.94	2.04	2.15	2.24	2.34	2.42	2.52	2.62	2.72	2.80	2.90													
38	1.80	1.90	2.00	2.10	2.20	2.29	2.38	2.47	2.57	2.67	2.75	2.85													
39	1.86	1.96	2.05	2.15	2.25	2.34	2.43	2.52	2.61	2.70	2.80	2.89													
40	1.82	1.92	2.01	2.10	2.20	2.30	2.39	2.47	2.56	2.65	2.75	2.84	2.93												
41	1.87	1.97	2.06	2.16	2.25	2.35	2.43	2.52	2.60	2.70	2.79	2.87													
42	1.83	1.93	2.02	2.12	2.21	2.30	2.39	2.47	2.56	2.65	2.74	2.82	2.91												
43	1.80	1.90	1.99	2.08	2.17	2.25	2.35	2.43	2.52	2.60	2.69	2.78	2.86												
44	1.86	1.95	2.04	2.13	2.21	2.30	2.39	2.47	2.56	2.64	2.73	2.81	2.90												
45	1.82	1.91	2.00	2.08	2.17	2.26	2.34	2.42	2.51	2.60	2.68	2.77	2.85	2.94											
46	1.88	1.96	2.04	2.13	2.22	2.30	2.38	2.47	2.55	2.63	2.72	2.80	2.89												
47	1.84	1.92	2.00	2.09	2.18	2.25	2.34	2.42	2.50	2.59	2.67	2.75	2.84	2.93											
48	1.80	1.88	1.96	2.05	2.14	2.21	2.30	2.38	2.46	2.55	2.62	2.70	2.79	2.87											
49	1.85	1.93	2.01	2.10	2.18	2.25	2.34	2.42	2.50	2.58	2.66	2.75	2.83	2.91											
50	1.82	1.90	1.98	2.06	2.14	2.21	2.30	2.38	2.45	2.54	2.62	2.70	2.78	2.86	2.94										
51	1.87	1.95	2.02	2.10	2.18	2.25	2.34	2.41	2.49	2.57	2.65	2.73	2.81	2.89											
52	1.84	1.91	1.99	2.06	2.14	2.22	2.30	2.37	2.45	2.54	2.61	2.69	2.76	2.84	2.93										
53	1.80	1.88	1.96	2.03	2.10	2.18	2.26	2.33	2.41	2.48	2.57	2.64	2.72	2.80	2.88										
54	1.85	1.93	2.00	2.07	2.16	2.22	2.29	2.37	2.44	2.52	2.60	2.67	2.75	2.83											
55	1.82	1.89	1.97	2.04	2.11	2.19	2.25	2.33	2.40	2.47	2.55	2.63	2.70	2.78											
56	1.86	1.93	2.00	2.10	2.15	2.21	2.29	2.36	2.43	2.50	2.58	2.65	2.73												
57	1.83	1.90	1.97	2.04	2.11	2.18	2.25	2.33	2.40	2.47	2.54	2.61	2.69	2.76											
58	1.80	1.86	1.94	2.00	2.07	2.14	2.21	2.29	2.36	2.43	2.50	2.57	2.64												
59	1.83	1.90	1.97	2.04	2.11	2.18	2.25	2.32	2.39	2.46	2.53	2.60													
60	1.80	1.87	1.94	2.01	2.08	2.14	2.21	2.28	2.35	2.42	2.49	2.56													

*Beer Temperature (deg F)*

*Move across from the temperature of the beer to the desired volumes of CO<sub>2</sub>, then up to find the correct psi of your regulator*

Fuente: The Beer Nut, Inc. Guide to Kegging Beer. p. 1-2.

## **Aspectos a considerar al servir Cerveza de barril y las consecuencias al no cumplirse estos aspectos**

Tanto la literatura como los fabricantes de los diferentes equipos hacen las siguientes recomendaciones. En la práctica sucede que a pesar de seguir estas recomendaciones eventualmente aparecerán problemas como exceso de espuma, problema que evaluará este trabajo.

- Manejo del envase con el producto. Deberá evitarse la agitación en lo mínimo antes de comenzar a dispensar el producto. En el caso de que se haya sometido a movimientos fuertes u otras prácticas que generen inestabilidad en el equilibrio cerveza-dióxido de carbono, se recomienda reposar el barril por 24 horas. De no seguirse esta recomendación se pueden tener problemas con exceso de espuma al momento de dispensar.
- Cuando un barril que está siendo utilizado llega a agotarse y todo el sistema sigue trabajando, en un momento determinado no será cerveza la que ingresará al sistema sino únicamente dióxido de carbono, esto causará que toda la línea termine con gas o bolsas de gas. Cuando se conecte el siguiente barril al principio generará problemas como exceso de espuma.
- Temperatura de salida de la cerveza. Deberá ser entre 3 y 4° C al salir del grifo. Los equipos de enfriamiento están diseñados para cumplir con esta temperatura, únicamente es necesario encender el equipo con una hora de anticipación para genera un banco de hielo que soporte el uso continuo del equipo. La temperatura de salida puede ser menor sin embargo los equipos no tienen este alcance al menos para mantenerlo. Si la temperatura llega a ser mayor, los clientes pueden no quedar satisfechos, además de favorecer el porcentaje de espuma a medida que la temperatura aumenta.

- Caudal recomendado de cerveza. El caudal de cerveza a servir va relacionado con la capacidad de enfriamiento del equipo, con la necesidad de dispensamiento del cliente en el punto de venta y de acuerdo también con la recomendación de velocidad de cerveza en tuberías. Esta recomendación es de 2 m/s como máximo. Los métodos de análisis en la industria cervecera recomiendan un flujo de 3 a 7 L/min, aunque flujos hasta de 1,8 L/min puede aceptables aún.

Si el flujo es muy alto, saldrá a una velocidad excesiva, golpeando fuertemente el recipiente generando espuma. Esto sucede aún cuando desde el grifo salga bien la bebida. Si el caudal de salida es muy bajo, este no será lo suficientemente rápido como para soportar la demanda de los clientes.

La ventaja de usar un caudal bajo es que la cerveza regularmente no generará problemas con exceso de espuma. El flujo de cerveza va relacionado con la presión de dióxido de carbono que se establezca en el regulador.

- Presión necesaria de CO<sub>2</sub> en el regulador. La presión recomendada para el equipo es de 40 psi. El cálculo realizado arroja un resultado de 2,75 a 2,9 bar (40 a 42 psi), según 2 metodologías diferentes, una basada en los métodos de análisis en la industria cervecera y otra según la teoría general de flujo de fluido en válvulas tuberías y accesorios. Este cálculo no se incluye en el presente trabajo. Si la presión es algo más baja no dará problemas en sí con la bebida, simplemente el flujo de líquido será más bajo. Esto es inadecuado cuando el cliente tenga una buena demanda de la bebida.

- Si la presión es demasiado baja no saldrá suficiente cerveza pudiendo salir gas con líquido de tal forma que la cerveza termine por no fluir por el sistema generando golpes de espuma. También habrá una deficiente carbonatación generando un sabor inadecuado en la bebida. Si la presión es más alta, el caudal de cerveza será más alto y por lo tanto la velocidad de la bebida en la salida será muy alta generando turbulencia al momento de chocar con el recipiente. También hay que tomar en cuenta la presión máxima recomendada de uso para los barriles de acero inoxidable, para los cuales se recomienda 3 bar. En realidad puede ser superior debido a los factores de seguridad y las pruebas que el fabricante realiza, pero 3 bar es lo recomendado.
- Limpieza y sanitización del equipo. Esto es importante debido a que debe cumplirse con buenas prácticas de higiene como en cualquier sistema que se utilice para el manejo de alimentos y bebidas. Para ello existen procedimientos ya establecidos por el fabricante y el proveedor del equipo y producto que deberán cumplirse para que las líneas sean inocuas. Esto es para evitar problemas de contaminación del producto pudiendo generar variaciones de calidad.
- Recipiente para dispensar cerveza. Este debe estar limpio y libre de aceites o grasas, pues la menor presencia reducirá notablemente la formación de la espuma. Es característico de la cerveza de barril, la consistencia de la espuma cuya corona deberá medir entre 1,5 y 2 cm. No deben utilizarse recipientes plásticos pues desfavorecen a la calidad de la cerveza.

- Otro aspecto a tomar en cuenta es la temperatura del recipiente, este debe estar frío o bien remojarse en agua fría previo a ser utilizado. Esto es de suma importancia pues un recipiente a temperatura ambiente, 20 o 25° C al ser llenado con cerveza puede generar hasta un 30% del volumen espuma-cerveza final. Esto es debido a que el gas se libera del líquido y asciende en forma de espuma. También tiene que ver el tamaño del recipiente. Un recipiente pequeño favorece la generación de turbulencia y por lo tanto de espuma. Un recipiente grande permitirá un mejor control del flujo y por lo tanto de la generación de exceso de espuma.
- Siempre el primer tarro saldrá con un poco de espuma (aún cuando se tomen las medidas ya explicadas cuando hay cambio de barril).
- Esto se controlará inclinando el vaso (en ángulo de 45° enderezándolo a medida que sirve la cerveza). La superficie del vaso debe estar a una pulgada del grifo.
- El grifo no debe tocar el vaso.
- Conforme el vaso se llena a la mitad, gradualmente se debe llevar el vaso a una posición vertical.
- Dejar que la cerveza restante caiga directo al centro del vaso. Esto asegura una liberación adecuada de gas carbónico produciendo la corona de espuma.
- Cerrar el grifo completa y rápidamente.

## Servido correcto de cerveza de barril



Fuente: <http://www.heineken.com/AgeGateway.aspx>. Consultada en mayo 2009.



## EVALUACIÓN DEL EFECTO DE UN SERPENTÍN HELICOIDAL SOBRE LA RELACIÓN ESPUMA-CERVEZA (TIPO LAGER) Y SOBRE EL FLUJO DE CERVEZA EN UN DISPENSADOR DE CERVEZA DE BARRIL

ANEXO: Requisitos Académicos

