



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CARBONATADOR DE
INYECCIÓN COMOPARTE DE UNA LÍNEA DE PROCESO PARA LA
PRODUCCIÓN DE CERVEZAARTESANAL”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTORES: CRISTIAN DAVID CALVA CEDEÑO

JUAN RAÚL VENEGAS ORTIZ

DIRECTORA: Dra. LOURDES CUMANDÁ CARRERA BELTRÁN M.Sc.

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, Cristian David Calva Cedeño & Juan Raul Venegas Ortiz

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor

Nosotros, CALVA CEDEÑO CRISTIAN DAVID y JUAN RAÚL VENEGAS ORTIZ, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados. Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 16 de septiembre de 2021

Cristian David Calva Cedeño
2101125835

Juan Raul Venegas Ortiz
1805201538

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

El tribunal del trabajo de Integración Curricular certifica que: El trabajo de Integración Curricular, :
Tipo: Proyecto Técnico, : **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CARBONATADOR DE INYECCIÓN COMO PARTE DE UNA LÍNEA DE PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE CERVEZA ARTESANAL”**, realizado por los señores **CRISTIAN DAVID CALVA CEDEÑO** y **JUAN RAUL VENEGAS ORTIZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación

FIRMA

FECHA

Ing. Segundo Hugo Calderón M.Sc.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

16 de septiembre de 2021

Dra. Lourdes Cumandá Carrera Beltran M.Sc.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

16 de septiembre de 2021

Ing. Luis Santiago Carrera Almendariz M.Sc.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

16 de septiembre de 2021

DEDICATORIA

La parte que me corresponde de este trabajo está dedicada a una idea, a una utopía, a un sueño: el sueño de mejores días para todos y todas; a una venganza personal, la venganza llamada el derecho de tus hijos e hijas a los juegos y las flores; a un ideal, el ideal de ver a todos mis hermanos de la patria engalanados de justicia y dignidad; a la destrucción, la destrucción de la más insultante opulencia que cotidianamente fusila a la más miserable pobreza.

Está dedicado a mis padres, Holger y Mercedes quienes, con su amor y sus ideas, sus enseñanzas y correcciones, me han traído hasta este preciso momento, un momento precioso que siempre recordaré. Está dedicado a todo aquel que siente en lo más profundo de su ser, el dolor ajeno como propio. La dedicatoria es un mensaje, pero también una declaración, la declaración de mis intenciones, las intenciones de perseguir un mejor país para todos y todas.

Cristian

A mi abuelita, mis padres, mi hermana, mis tías, mis tíos, les doy las gracias por haberme apoyado siempre, a todos quienes me motivaron y a las oportunidades, decisiones y fracasos que me llevaron hasta aquí. A este mundo caótico donde cada uno de nosotros tratamos de sobrevivir desafiando la suerte.

Juan

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, ahora sé que siempre estuvieron y estarán allí para apoyarme; agradezco del corazón de mi madre la calidez y el refugio eterno e infinito de su abrazo; agradezco del temple de mi padre la sabiduría inmensa de los años en sus palabras y la dulce firmeza de su voz curtida por el paso del tiempo. Agradezco de los dos la confianza que en mí depositan y el haberme dado una vida sencilla y escueta, pero rica, llena de ideas y principios firmes. Sus mejores enseñanzas las llevo en el alma.

A mis hermanos; la niñez nos juntó en una cálida cama en donde los tres entrábamos, la adolescencia nos mostró lo diferentes que somos, y la adultez temprana nos devolvió aquella hermandad que de sangre y casa siempre tuvimos. A ustedes porque son mis hermanitos y su hermano mayor siempre los observará.

A mis tíos cercanos, aquellos que se regocijaron con su primer sobrino cuando jóvenes, aquellos que se regocijan aún hoy tras tantos años: Maricela, Javier, Romel, Franklin, Fernando, Albita, gracias por ser mis referentes en lo bueno y en lo malo, gracias por su cercanía desde que nací.

A mis abuelos, porque sé que les llena de orgullo saber que el día de estas palabras ha llegado.

A mis primos, porque tienen que ser muchísimo mejores que su primo mayor, pero sin olvidarse lo que a ustedes les apasiona: Giancarlo, Yader, Darien, Yenell, Christopher, sé que lo harán muchísimo mejor, no se dejen presionar por sus padres.

A Michele, porque llegó a mi vida sin anunciarse y rápidamente se convirtió en la persona más cercana que tengo y en una de las más importantes. Su cariño, afecto, comprensión, cercanía, confianza, complicidad y amor son luz en los momentos más oscuros e incluso en los más claros y son el más bonito regalo que alguien me ha dado.

A Juan, mi compañero de tesis y amigo de depresiones, porque las risas contigo están aseguradas y siempre nos reiremos del Reactor M.Z. Gracias por hacer el otro 50 de este capricho de los dos.

A mis amigos: Richard, Josue, Gabriela, Karla, Carla, por su amistad durante la universidad

Cristian y Juan

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	1
1.1. Identificación del problema.....	1
1.2. Justificación del proyecto	2
1.3. Beneficiarios directos e indirectos	2
1.3.1. <i>Beneficiarios directos</i>	2
1.3.2. <i>Beneficiarios indirectos</i>	3
1.4. Localización del proyecto	3
1.5. Objetivos	4
1.5.1. <i>Objetivo general</i>	4
1.5.2. <i>Objetivos específicos</i>	4

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
2.1. Antecedentes de la investigación	5
2.2. Estado del arte: carbonatación.....	6
2.3. Marco conceptual o glosario.....	8
2.3.1. <i>Brewing</i>	8
2.3.1.1. <i>Malteado</i>	9
2.3.1.2. <i>Secado y tostado</i>	9
2.3.1.3. <i>Molienda</i>	10
2.3.1.4. <i>Maceración</i>	10

2.3.1.5.	<i>Cocción</i>	10
2.3.1.6.	<i>Fermentación</i>	10
2.3.1.7.	<i>Carbonatación</i>	11
2.3.1.8.	<i>Envasado</i>	11
2.3.2.	<i>Carbonatación</i>	11
2.3.3.	<i>Dióxido de carbono</i>	12
2.3.4.	<i>Diagrama de fases del dióxido de carbono</i>	13
2.3.5.	<i>Fuentes de dióxido de carbono</i>	14
2.3.6.	<i>Nivel de carbonatación</i>	15
2.3.7.	<i>Estilos de cerveza en función del nivel de carbonatación</i>	15
2.3.8.	<i>Instrumentación para medir el nivel de carbonatación</i>	16
2.3.9.	Condiciones que afectan a la eficiencia del proceso de carbonatación	16
2.3.10.	<i>Carbonatación natural o acondicionamiento en la botella</i>	17
2.3.11.	<i>Carbonatación forzada</i>	17
2.3.12.	<i>Carbonatador tipo batch</i>	18
2.4.	Ley de Henry	18

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	20
3.1.	Tipo de estudio	20
3.1.1.	<i>Investigación exploratoria</i>	20
3.1.2.	<i>Investigación experimental</i>	20
3.2.	Experimentación	21
3.2.1.	<i>Caracterización de la materia prima</i>	21
3.2.2.	<i>Parámetros físico químicos</i>	21
3.2.2.1.	<i>Contenido alcohólico</i>	21
3.2.2.2.	<i>Acidez total</i>	21
3.2.2.3.	<i>Ph</i>	21
3.2.2.4.	<i>Contenido de hierro</i>	22
3.2.2.5.	<i>Contenido de cobre</i>	22
3.2.2.6.	<i>Contenido de zinc</i>	22
3.2.2.7.	<i>Contenido de arsénico</i>	22

3.2.2.8.	<i>Contenido de plomo</i>	23
3.2.3.	Parámetros microbiológicos	23
3.2.3.1.	<i>Microorganismos Anaerobios</i>	23
3.2.3.2.	<i>Mohos y levaduras</i>	23
3.2.4.	Test de carbonatación	23
3.3.	Establecimiento de las variables de proceso	24
3.4.	Cálculos de ingeniería	24
3.4.1.	Diseño del tanque de carbonatación	25
3.4.1.1.	<i>Selección del material de construcción</i>	25
3.4.1.2.	<i>Cálculo del headspace y volumen total del tanque</i>	26
3.4.1.3.	<i>Cálculo del diámetro y la altura</i>	27
3.4.1.4.	<i>Tolerancia de corrosión</i>	28
3.4.1.5.	<i>Selección del tipo de cabezal</i>	28
3.4.1.6.	<i>Cálculo del ancho de pared y otros parámetros del cabezal</i>	29
3.4.1.7.	<i>Cálculo del ancho de pared del cascarón</i>	34
3.4.1.8.	<i>Determinación de los valores de S (valor máximo de estrés permisible) y E (eficiencia de las soldaduras)</i>	34
3.4.2.	Diseño del sistema de alimentación y difusión de dióxido de carbono	35
3.4.2.1.	<i>Tanque de almacenamiento y distribución de dióxido de carbono</i>	35
3.4.2.2.	<i>Regulador de presión de dióxido de carbono</i>	38
3.4.2.3.	<i>Sistema de difusión en el tanque de carbonatación</i>	38
3.4.2.4.	<i>Balance de masa del sistema</i>	41
3.4.3.	Diseño del sistema de refrigeración	41
3.4.3.1.	<i>Selección del sistema de refrigeración</i>	41
3.4.3.2.	<i>Selección del tipo de serpentín</i>	41
3.4.3.3.	<i>Determinación del coeficiente global de transferencia de calor</i>	42
3.4.3.4.	<i>Balance de energía</i>	44
3.4.3.5.	<i>Determinación del tiempo de refrigeración del lote de cerveza</i>	45
3.4.3.6.	<i>Variación del flujo de calor con el tiempo</i>	45
3.4.3.7.	<i>Temperatura de salida del líquido refrigerante con el tiempo</i>	45
3.4.3.8.	<i>Parámetros de diseño del sistema</i>	46
3.4.3.9.	<i>Iteraciones para determinar el largo del serpentín</i>	47
3.4.3.10.	<i>Número de vueltas y volumen del serpentín</i>	48

3.4.3.11.	<i>Altura del serpentín</i>	48
3.5.	Accesorios del tanque de carbonatación	49
3.5.1.	Válvulas	49
3.5.1.1.	<i>Válvula check</i>	49
3.5.1.2.	<i>Válvula de bola</i>	50
3.5.1.3.	<i>Válvula mariposa</i>	51
3.5.1.3.	<i>Válvula de alivio de presión</i>	51
3.5.2.	Accesorios metálicos	52
3.5.2.1	<i>Codos</i>	52
3.5.2.2.	<i>Espigas</i>	53
3.5.2.3.	<i>Adaptadores</i>	53
3.5.2.4.	<i>Neplos</i>	54
3.5.2.5.	<i>Tubería de plástico</i>	54
3.5.2.6.	<i>Abrazaderas</i>	55
3.5.2.7.	<i>Acoples rápidos</i>	55
3.5.3.	Instrumentos	56
3.5.3.1.	<i>Manómetros</i>	56
3.5.3.2.	<i>Termómetro</i>	56
3.6.	Prueba hidrostática estándar	57

CAPÍTULO IV

4.	RESULTADOS	59
4.1.	Caracterización de la materia prima	59
4.1.1.	<i>Parámetros físico químicos</i>	59
4.1.2.	<i>Parámetros microbiológicos</i>	60
4.2.	Test de carbonatación	60
4.2.1.	<i>Parámetros de diseño del tester de carbonatación</i>	60
4.2.2.	<i>Tester de carbonatación</i>	61
4.2.3.	<i>Resultados</i>	61
4.3.	Establecimiento de las variables de proceso	62
4.4.	Cálculos de ingeniería	63
4.4.1.	<i>Tanque de carbonatación</i>	63

4.4.2.	<i>Selección del material</i>	65
4.4.3.	<i>Tolerancia de corrosión</i>	65
4.4.4.	<i>Diseño de los cabezales</i>	66
4.4.5.	<i>Diseño del cascarón</i>	69
4.4.6.	<i>Diseño del sistema de alimentación y difusión de dióxido de carbono</i>	71
4.4.6.1.	<i>Demanda de CO₂ por lote de cerveza</i>	71
4.4.6.2.	<i>Tanque de almacenamiento de CO₂ y regulador de presión</i>	72
4.4.6.3.	<i>Sistema de difusión de CO₂ y método de carbonatación</i>	73
4.4.6.4.	<i>Balace de masa</i>	74
4.4.7.	<i>Selección del sistema de refrigeración</i>	75
4.4.7.1.	<i>Selección del tipo de serpentín</i>	75
4.4.7.2.	<i>Determinación del coeficiente global de transferencia de calor</i>	76
4.4.7.3.	<i>Balace de energía</i>	77
4.4.7.4.	<i>Iteraciones para determinar el largo del serpentín</i>	77
4.4.7.5.	<i>Variación de la temperatura del lote en función del tiempo</i>	80
4.4.7.6.	<i>Variación del flujo de calor del lote en función del tiempo</i>	81
4.4.7.7.	<i>Temperatura de salida del líquido refrigerante en función del tiempo</i>	82
4.5.	Prueba hidrostática estándar	83
4.6.	Diagrama de flujo del proceso	85
4.7.	Discusión de resultados	87
4.7.1.	<i>Prueba hidrostática estándar</i>	87
4.7.2.	<i>Pruebas físicas, químicas y microbiológicas de la cerveza</i>	87
4.7.3.	<i>Test de carbonatación</i>	88

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Coordenadas de la línea de proceso para cerveza artesanal	3
Tabla 2-1:	Estilos de cerveza y sus niveles de carbonatación	15
Tabla 3-1:	Variables de proceso	24
Tabla 3-2:	Aditivo alimenticio dióxido de carbono: especificaciones	35
Tabla 3-3:	Propiedades de llenado de los tanques de dióxido de carbono	35
Tabla 3-4:	Coefficientes de convección exterior para diferentes configuraciones de serpentín ...	44
Tabla 3-5:	Parámetros de diseño del serpentín	46
Tabla 3-6:	Esquema de iteraciones para la elección del largo de serpentín.....	47
Tabla 3-7:	Prueba hidrostática estándar	57
Tabla 3-8:	Inspección visual de fugas en el tanque.....	58
Tabla 4-1:	Resultados de los análisis físico químicos	59
Tabla 4-2:	Resultados de los análisis microbiológicos.....	60
Tabla 4-3:	Dimensiones del tester de carbonatación.....	60
Tabla 4-4:	Accesorios del tester de carbonatación.....	60
Tabla 4-5:	Resultado de carbonatación de la cerveza	62
Tabla 4-6:	Volúmenes de CO ₂ experimentales en función del tiempo	62
Tabla 4-7:	Rango de carbonatación según la INEN 2262 Bebidas Alcohólicas Cerveza Requisitos	62
Tabla 4-8:	Variables de proceso	63
Tabla 4-9:	Parámetros de operación del tanque de carbonatación	63
Tabla 4-10:	Dimensiones del tanque.....	64
Tabla 4-11:	Propiedades del acero AISI 304 L.....	65
Tabla 4-12:	Tolerancia de corrosión	65
Tabla 4-13:	Propiedades y dimensiones del cabezal.....	66
Tabla 4-14:	Propiedades y dimensiones del cascarón.....	69
Tabla 4-15:	Demanda de CO ₂ del tanque de carbonatación	71
Tabla 4-16:	Propiedades del tanque de CO ₂	72
Tabla 4-17:	Propiedades del regulador de presión.....	72
Tabla 4-18:	Propiedades de la piedra de difusión.....	73
Tabla 4-19:	Parámetros de operación para el primer método de carbonatación para alcanzar 2.85 vol	74

Tabla 4-20:	Coeficientes de convección exteriores para ciertas configuraciones de serpentín	76
Tabla 4-21:	Datos para realizar las iteraciones	77
Tabla 4-22:	Resultado de las iteraciones para determinar el largo del serpentín	80
Tabla 4-23:	Resultados de la prueba hidrostática estándar	83
Tabla 4-24:	Comparación de resultados físico químicos	87
Tabla 4-25:	Comparación de resultados microbiológicos	88
Tabla 4-26:	Carbonatación	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Localización del proyecto	4
Figura 2-1:	Testador de CO ₂ de Zahm Nagel	16
Figura 3-1:	Aparato de perforación para medición de volúmenes de CO ₂	24
Figura 3-2:	Esquema de un carbonatador tipo batch.....	25
Figura 3-3:	Tipos de cabezales para tanques presurizados.....	29
Figura 3-4:	Cabezal elipsoidal.....	29
Figura 3-5:	Cabezal torisférico.....	30
Figura 3-6:	Cabezal hemisférico.....	32
Figura 3-7:	Cabezal cónico	33
Figura 3-8:	Reguladores de presión de dióxido de carbono	38
Figura 3-9:	Piedra de carbonatación comercial	39
Figura 3-10:	Diseños de serpentín	42
Figura 3-11:	Válvula check utilizada.....	49
Figura 3-12:	Diagrama de partes de la válvula check.....	49
Figura 3-13:	Válvula de bola utilizada.....	50
Figura 3-14:	Válvula mariposa utilizada.....	51
Figura 3-15:	Válvula de alivio utilizada.....	51
Figura 3-16:	Partes de una válvula de alivio	52
Figura 3-17:	Codos utilizados	52
Figura 3-18:	Espiga utilizada	53
Figura 3-19:	Adaptadores utilizados.....	53
Figura 3-20:	Neplos utilizados	54
Figura 3-21:	Manguera para alta presión utilizada	54
Figura 3-22:	Modelo de abrazadera utilizada.....	55
Figura 3-23:	Acoples rápidos utilizados	55
Figura 3-24:	Manómetro utilizado.....	56
Figura 3-25:	Termómetro utilizado.....	56
Figura 4-1:	Tester de carbonatación	61
Figura 4-2:	Vista bidimensional del cabezal diseñado.....	68
Figura 4-3:	Vistas tridimensionales de los cabezales del tanque.....	69
Figura 4-4:	Vista bidimensional del cascarón diseñado.....	70

Figura 4-5:	Vista tridimensional del cascarón	71
Figura 4-6:	Balance de masa y diagrama de flujo del proceso de carbonatación	74
Figura 4-7:	Serpentín helicoidal	75
Figura 4-8:	Diagrama de flujo del proceso de carbonatación de cerveza.....	86

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2-1:	Solubilidad del CO ₂ en agua.....	12
Gráfico 2-2:	Solubilidad del CO ₂ en etanol.....	13
Gráfico 2-3:	Diagrama de fases del CO ₂	14
Gráfico 4-1:	Temperatura del lote de cerveza en función del tiempo.....	81
Gráfico 4-2:	Calor retirado del lote de cerveza en función del tiempo.....	82
Gráfico 4-3:	Temperatura de salida del refrigerante en función del tiempo.....	83

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** TANQUE DE CARBONATACIÓN CONSTRUÍDO
- ANEXO B:** PLANOS DEL TANQUE DE CARBONATACIÓN
- ANEXO C:** FICHA TÉCNICA TANQUE DE CO₂ MARCA LINDE
- ANEXO D:** NORMA INEN NTE 2262 BEBIDAS ALCOHÓLICAS CERVEZA REQUISITOS, TABLA 1 REQUISITOS FÍSICOS Y QUÍMICOS, TABLA 2 REQUISITOS MICROBIOLÓGICOS
- ANEXO E:** NORMA NTE INEN 2324 BEBIDAS ALCOHÓLICAS CERVEZA DETERMINACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO “CO₂” Y AIRE, TABLA 1 CONTENIDO DE CO₂ (v/v)
- ANEXO F:** NTE INEN 2322 BEBIDAS ALCOHÓLICAS CERVEZA DETERMINACIÓN DE ALCOHOL, MÉTODO VOLUMÉTRICO
- ANEXO G:** NTE INEN 2323 BEBIDAS ALCOHÓLICAS. CERVEZA. DETERMINACIÓN DE LA ACIDEZ TOTAL, MÉTODO POR TITULACIÓN CON FENOLFTALEÍNA
- ANEXO H:** NTE INEN 2325 BEBIDAS ALCOHÓLICAS. CERVEZA. DETERMINACIÓN DEL pH
- ANEXO I:** NTE INEN 2326 BEBIDAS ALCOHÓLICAS. CERVEZA. DETERMINACIÓN DE HIERRO
- ANEXO J:** NTE INEN 2327 BEBIDAS ALCOHÓLICAS. CERVEZA. DETERMINACIÓN DE COBRE
- ANEXO K:** NTE INEN 2328 BEBIDAS ALCOHÓLICAS. CERVEZA. DETERMINACIÓN DE ZINC
- ANEXO L:** NTE INEN 2329 BEBIDAS ALCOHÓLICAS. CERVEZA. DETERMINACIÓN DE ZINC
- ANEXO M:** NTE INEN 2330 BEBIDAS ALCOHÓLICAS. CERVEZA. DETERMINACIÓN DE PLOMO
- ANEXO N:** NTE INEN 1529-17 CONTROL MICROBIOLÓGICO DE LOS ALIMENTOS. BACTERIAS ANAEROBIAS MESÓFILAS. RECuento EN TUBO POR SIEMBRA EN MASA.
- ANEXO O:** NTE INEN 1529-10 CONTROL MICROBIOLÓGICO DE LOS ALIMENTOS. MOHOS Y LEVADURAS VIABLES. RECuentos EN PLACA POR SIEMBRA EN PROFUNDIDAD

- ANEXO P:** RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS
- ANEXO Q:** OFICIO NO. 02 D.FC.2021 ENTREGA DEL TANQUE DE CARBONATACIÓN
- ANEXO R:** CERTIFICADO DBRA

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue diseñar y construir un carbonatador de inyección como parte de una línea de proceso para la producción de cerveza artesanal. Se establecieron las variables de proceso presión y temperatura, siguiendo los requerimientos del parámetro carbonatación de la norma NTE INEN 2262 “Bebidas alcohólicas. Cerveza. Requisitos”. El diseño del cuerpo del tanque, sus principales accesorios y la selección del material de construcción se basaron en el código ASME Sección VIII: Reglas para la construcción de recipientes a presión, División I y la Sección II Materiales Parte D Propiedades del mismo código. Adicionalmente, se construyó un aparato para verificar el nivel de carbonatación bajo los lineamientos de la norma NTE INEN 2324 “Bebidas alcohólicas para verificar el nivel de carbonatación. Se determinó una presión máxima de 30 psi y una temperatura entre 5 y 25 grados Celsius. El tanque diseñado tiene un ancho de pared de 3mm, 40 litros de capacidad, cabezales elipsoidales y una válvula de alivio Swagelok, regulable, para evitar explosiones debido a excesos de presión; opera hasta una presión máxima sugerida de 30 psi, verificados mediante pruebas hidrostáticas. Como resultado de la carbonatación, se obtuvo 2,45 vol. de dióxido de carbono por litro de cerveza, valor que está dentro del rango permitido para carbonatación por la norma NTE INEN 2262. Finalmente, este trabajo se puede ampliar estudiando el uso de un sistema de control automático o un sistema de agitación y se recomienda el uso del tanque para carbonatar diferentes tipos de bebidas.

Palabras clave: <DISEÑO DE EQUIPOS>, <CARBONATACIÓN>, <CERVEZA>, <DISUFIÓN>, <DIÓXIDO DE CARBONO>, <CÓDIGO ASME>.



1497-DBRA-UTP-2021

ABSTRACT

The objective of this work was to design and build an injection carbonator as part of a process line for the production of craft beer. The pressure and temperature process variables were established, following the requirements of the carbonation parameter of the NTE INEN 2262 standard "Alcoholic beverages. Beer. Requirements". The design of the tank body, its main accessories and the selection of the construction material were based on the ASME code Section VIII: Rules for the construction of pressure vessels, Division I and Section II Materials Part D Properties of the same code. Additionally, a device was built to verify the carbonation level under the guidelines of the NTE INEN 2324 standard "Alcoholic beverages to verify the carbonation level. A maximum pressure of 30 psi and a temperature between 5 and 25 degrees Celsius was determined. The designed tank has a 3mm wall width, 40 liter capacity, ellipsoidal heads and an adjustable Swagelok relief valve to avoid explosions due to excess pressure; operates up to a pressure suggested maximum 30 psi, verified by hydrostatic testing. As a result of carbonation, 2.45 vol. of carbon dioxide per liter of beer, a value that is within the range allowed for carbonation by the NTE INEN 2262 standard. Finally, this work can be expanded by studying the use of an automatic control system or a stirring system. It is recommended to use the tank to carbonate different types of drinks.

Keywords: <EQUIPMENT DESIGN>, <CARBONATION>, <BEER>, <DISSUFION>, <CARBON DIOXIDE>, <ASME CODE>.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1. Identificación del problema

Actualmente no existen líneas de proceso para la producción de cerveza en los laboratorios de la Facultad de Ciencias. Es más, incluso a nivel nacional los estudios intensivos con respecto al diseño y construcción de equipos para la elaboración de cerveza es incipiente (salvo en la ESPOL en donde a partir del año 2017 se empezó a estudiar la construcción de biorreactores en un programa impulsado por la misma Universidad (Lopez, 2017, p.35).).

La poca oferta de equipos listos para la preparación de cerveza afecta a un grupo microempresarial del país muy determinado, los productores de bebidas alcohólicas artesanales (Ramirez, 2015, p.95). Así, surge un problema de cara al crecimiento de la demanda de estos productos. Se espera que, en un futuro muy cercano, los bioprocesos desplacen lentamente a los procesos químicos tradicionales puesto que, los primeros resultan mucho más eficientes, más amigables con el medio ambiente y relativamente selectivos y específicos con los productos esperados (Al-Zuhair, 2011, p.5). A medida que el costo de la síntesis de biocatalizadores decrezca y su número se incremente, la biosíntesis de productos químicos será incluso más atractiva desde una perspectiva económica.

En este sentido, es necesario comprender y aprender las herramientas necesarias para dar solución a esta problemática cuyo eje central es el diseño y construcción de la línea de proceso para obtener la cerveza.

La construcción de la línea de proceso constituye un trabajo ingenieril importante, y es económicamente significativo. Por lo tanto, se ha dividido la construcción de esta línea en tres partes: macerado y molienda, fermentación y carbonatación. Cada una de estas será abordada en tres estudios distintos que se complementan entre sí. En este caso en particular, se abordará el proceso de carbonatación de la cerveza obtenida tras la fermentación.

El problema entonces reside en el arte de diseñar, construir y presentar un equipo óptimo, eficiente y accesible para el grupo objeto de este trabajo y para la línea de proceso que será parte del laboratorio de Procesos Industriales de la facultad de Ciencias

1.2. Justificación del proyecto

El mercado de las bebidas alcohólicas es un sector en auge en el Ecuador y en los últimos años ha mantenido un crecimiento constante de aproximadamente 2% en volumen de producción y distribución (Andrade, 2020, p. 10).

A pesar de que las cervecerías artesanales tienen una participación de mercado de tan solo el 0.59 % (Revista LÍDERES, 2019) según datos de la Asociación de Cervecerías Artesanales, en 2017 la actividad en cuestión generó USD 13 millones en ventas y se registró un importante crecimiento del 10% para el año 2018. Según la Superintendencia de Compañías, para 2020 existen en el país unos 1300 productores que se desempeñan bajo la figura de persona natural de los cuales 282 elaboran bebidas malteadas y de malta (cervezas artesanales principalmente). Esto es un crecimiento importante respecto al año 2018 cuando se registraban tan solo 117 productores.

En este sentido, la demanda de equipos listos para la producción de bebidas alcohólicas de alcance para el microempresario artesanal es una problemática que debe atenderse y resolverse. A palabras de la Asociación de Cervecerías Artesanales “es complicado encontrar equipos de fabricación local”. Adicionalmente, en los laboratorios de la facultad de ciencias de la ESPOCH no existen equipos que contemplen e ilustren el proceso completo de obtención de una bebida alcohólica.

Así, es necesario contar con equipamiento que sirva de forma didáctica a la explicación y formación práctica de los alumnos de la facultad en un campo multidisciplinario que es una “una combinación de la termodinámica, los procesos físicos como el mezclado, el consumo de energía y el transporte de masa y calor, y los procesos biológicos” (Qazizada, 2016).

Por lo tanto, este trabajo se centrará en diseñar y construir un carbonatador que cumpla con el requisito carbonatación de la NTE INEN 2262 evaluado mediante el método de ensayo de la NTE INEN 2324, como parte de una línea de proceso para la producción de cerveza artesanal que funcionará en el Laboratorio de Procesos Industriales con fines didácticos y de producción. Se tomarán en consideración en cuenta los aspectos ingenieriles necesarios para modelar apropiadamente el equipo, de manera que resulte eficiente y de bajo costo (Lopez, 2017, p.35).

1.3. Beneficiarios directos e indirectos

1.3.1. Beneficiarios directos

La línea de proceso para la elaboración de cerveza artesanal beneficiará directamente al Laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH. El laboratorio y la facultad

dispondrán de un proceso industrial novedoso que consiste de varias operaciones unitarias cuya finalidad es didáctica puesto que se integran los principios básicos de transferencia de calor, transferencia de masa, transferencia de momento, biotecnología e ingeniería de reacciones, y, productiva puesto que se espera ofrecer un producto como lo es la cerveza artesanal.

1.3.2. Beneficiarios indirectos

Los estudiantes de la facultad de ciencias y, sobre todo, los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química que realicen sus prácticas de clases en el laboratorio de Procesos Industriales, puesto que adquirirán conocimientos básicos en procesos industriales, fenómenos de transporte y biotecnología.

1.4. Localización del proyecto

Este proyecto técnico se localizará en el laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias del campus principal de la ESPOCH, ubicada en Av. Panamericana Sur km 1 1/2 en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo, Ecuador.

Tabla 1-1: Coordenadas de la línea de proceso para cerveza artesanal

Latitud	1°39'15''S
Longitud	78°40'47''W
Altitud	2815 m.s.n.m
Temperatura promedio	18 °C

Fuente: (Google Earth, 2021).

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.



Figura 1-1. Localización del proyecto

Fuente: (Google Earth, 2021).

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Diseñar y construir un carbonatador de inyección como parte de una línea de proceso para la producción de cerveza artesanal

1.5.2. Objetivos específicos

Determinar los rangos de las relaciones de presión y temperatura adecuados para el funcionamiento del sistema de carbonatación de cerveza

Diseñar y construir el tanque de carbonatación

Verificar el cumplimiento del parámetro carbonatación de la norma INEN 2262 Cerveza mediante el método de ensayo de la INEN 2324 para validar el diseño del sistema de carbonatación

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Antecedentes de la investigación

Durante los últimos años en Ecuador se ha visto un despunte impresionante en la cervecería artesanal. “Se ha abierto terreno desde el año 2010, cuando aparecieron los primeros emprendimientos y desde entonces este mercado ha madurado y ha crecido poco a poco” (El Telégrafo, 2015).

Según Jaramillo (2015) este no es un fenómeno aislado, pues en otros países esta oportunidad de negocio no ha hecho más que crecer y crecer; es el caso de España, en donde en 2015 se produjeron 85000 hectolitros de cerveza artesanal, lo que representó un incremento del 70% con respecto a 2014. Es así que, en Ecuador desde el año 2011 hasta el año 2015 se registró un crecimiento de este sector de aproximadamente 20 veces por año (Ramirez, 2015).

Dado el auge del mercado y la expansión de este, en el año 2013 se regularizaron e incluyeron estándares de calidad para la producción, dando inicio a las pymes y a las microempresas de cervecería artesanal.

En 2016, según la Asociación de Cervecerías Artesanales, la actividad dio empleo a 540 personas de forma directa y el volumen de producción respecto al nacional fue del 0.52%. Para 2017, este sector generó en total unos USD 13 millones en ventas y en 2018 la producción fue de 30730 hectolitros de cerveza frente a los 5200000 hectolitros totales, lo cual representó un incremento hasta el 0.59 % frente al 0.52 % de 2016. En 2018 el crecimiento respecto al año anterior fue del 20 % y el sector generó empleo para unas 1243 personas (Asocerv, 2018).

En 2020, según la Superintendencia de compañías existen 1300 productores de bebidas alcohólicas, de los cuales 282 elaboran cerveza artesanal. La particularidad es que esta cantidad de microempresarios demandan de equipos listos para la producción; empero, se enfrentan a lo que a palabras de la Asociación de Cervecerías Artesanales es uno de los principales problemas en esta actividad: la falta de equipos locales para producir la bebida puesto que es complicado encontrarlos. Dado que en Ecuador no existe una definición legal que limite el alcance de la industrialización del sector cervecero artesanal es lógico pensar que se pueden proponer soluciones altamente tecnificadas para cada uno de los aspectos de la elaboración de este producto. Por ende, este trabajo, como parte de una línea de proceso integrada por dos tesis más que abordan la maceración y la fermentación, abordará el diseño y construcción de un carbonatador de inyección (Jaramillo, 2015).

Este equipo tiene la finalidad de reducir los dilatados tiempos de la fermentación secundaria (también llamada carbonatación natural) y forzar la carbonatación en un espacio de tiempo muy reducido (horas). Se pretende sustituir a los tanques “kegs” que se usan ampliamente para este proceso y que son ineficientes y complicados de usar (Jorge Gordón, Cerveceros artesanales, 2020) y presentar un equipo carbonatador óptimo, eficiente y que opere bajo la Norma NTE INEN 2262 Cerveza. Requisitos (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013).

2.2. Estado del arte: carbonatación

En las sucesivas revisiones bibliográficas realizadas existe muy poca información referente a procesos de carbonatación y, sobre todo, al diseño de tanques de carbonatación por inyección. En este sentido, la mención más antigua, y que constituye una recopilación muy extensa de la industria del dióxido de carbono y sus aplicaciones en la carbonatación de bebidas es la de (Goosman, 1906).

En este punto ya estaba claro que una relación apropiada de presión y temperatura para absorber dióxido de carbono en un líquido debía ser totalmente entendida para obtener resultados satisfactorios. Es así que, para carbonatar no basta con la reducción de temperatura para incrementar la solubilidad del dióxido de carbono, sino que es necesario forzar el incremento de la presión dentro del sistema de carbonatación.

Sin embargo, no estaba nada claro como la absorción de dióxido de carbono se daba en agua. En este aspecto, Bunsen y Pauli hicieron las primeras investigaciones referentes a la saturación de agua con dióxido de carbono y establecieron las siguientes relaciones:

-1 pie cúbico de agua a 32 °F y presión atmosférica absorbe 1.7967 pies cúbicos de dióxido de carbono a presión atmosférica.

-1 pie cúbico de agua a 50 °F y presión atmosférica absorbe 1.1847 pies cúbicos de dióxido de carbono a presión atmosférica.

-1 pie cúbico de agua a 68 °F y presión atmosférica absorbe 0.9014 pies cúbicos de dióxido de carbono a presión atmosférica.

Posteriormente Wroblewski estableció con datos confiables la absorción de dióxido de carbono en agua a varias presiones. Las conclusiones que obtuvo fueron las siguientes:

-Si la temperatura permanece constante y la presión se incrementa, el coeficiente de saturación se incrementa a una tasa mucho más baja que la presión

-Si la presión permanece constante y la temperatura decrece, el coeficiente de saturación se incrementa mucho más rápido en comparación con la reducción gradual de temperatura

La tabla de saturación establecida fue la siguiente para las temperaturas de 32°F, 40°F, 45°F, y 53°F.

Tabla 2-1: Saturación de un pie cúbico de agua con dióxido de carbono

Presión (psi)	Un pie cúbico de agua absorbe tantas libras de CO ₂			
	A 32 F	A 40 F	A 45 F	A 53 F
0	0,25	0,20	0,20	0,12
5	0,35	0,27	0,27	0,17
10	0,43	0,34	0,29	0,22
15	0,50	0,40	0,34	0,26
20	0,57	0,45	0,39	0,31
25	0,64	0,50	0,44	0,35
30	0,69	0,55	0,49	0,39
35	0,74	0,60	0,53	0,42
40	0,79	0,64	0,57	0,45
45	0,84	0,69	0,61	0,49
50	0,89	0,72	0,65	0,52
55	0,93	0,76	0,66	0,55
60	0,97	0,80	0,72	0,58
65	1,02	0,84	0,75	0,60
70	1,05	0,87	0,78	0,63
75	1,10	0,90	0,82	0,66
80	1,14	0,94	0,85	0,68
85	1,18	0,98	0,89	0,71
90	1,24	1,02	0,92	0,74
95	1,27	1,05	0,95	0,76
100	1,31	1,10	1	0,78

Fuente:(Goosman, 1906).

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

A pesar de que la absorción de dióxido de carbono en agua es un fenómeno bien conocido, poco se conoce de la absorción del dióxido de carbono en la cerveza y apenas existen reportes o artículos acerca del tema. (Speers y MacIntosh, 2013).

Esto se debe a la variabilidad que existe en los distintos tipos de cervezas que se producen alrededor del mundo. Sin embargo, esto no quiere decir que no se hayan establecido las relaciones necesarias para conocer cómo afectan la presión y la temperatura a estos procesos. En este sentido, el método

más ampliamente usado por tradición es el de la ASBC (American Society of Brewing Chemist) basado en que la absorción de dióxido de carbono está gobernada por la ley de Henry. Así, el nivel de carbonatación se reporta en volúmenes de dióxido de carbono disuelto por volúmenes de cerveza (v/v) y existen tablas para la solubilidad del dióxido de carbono (en v/v) en función de la temperatura y la presión. Es importante notar que, se asume que la presión es debida solamente al dióxido de carbono y que el espacio gaseoso está libre de cualquier impureza (como nitrógeno, aire u otros gases). Los aparatos más antiguos de carbonatación incluyen generadores de dióxido de carbono de lo más variados. En la actualidad esto ya no es necesario pues se puede obtener tanque de dióxido de carbono envasados a altísimas presiones (sobre los 600 psi).

2.3. Marco conceptual o glosario

2.3.1 Brewing

El proceso general de la elaboración de cerveza o Brewing consiste en utilizar cebadas malteadas o cereales, lúpulo, levadura y agua a través de diferentes procesos para llegar a la producción de cerveza. La variación de parámetros así como de materias primas ocupadas nos dan la gran variedad de cervezas artesanales que tenemos hoy en día (Galitsky, Martin y Worrell, 2003).

El proceso de elaboración de cerveza consta de varios pasos que dependen del tipo de cerveza a hacer, el siguiente diagrama muestra el proceso para la elaboración de cerveza en general, usando carbonatación forzada:



Figura 2-1. Flujo de proceso del brewing

FUENTE: (Carvajal e Insuasti, 2010).

2.3.1.1. Malteado

El malteado es el proceso en el cual los granos de cebada se someten a remojo hasta que adquieran la humedad óptima y germinen. La germinación se da en un lapso de 3 a 5 días, procurando que los brotes tengan igual longitud al del grano. La finalidad del malteado es conseguir que el almidón sea soluble (Carvajal y Insuasti, 2010).

2.3.1.2. Secado y tostado

Al secar se busca que el grano elimine agua, hasta llegar a una humedad próxima al 5%, con el fin de extender el tiempo de vida útil del grano y poder almacenarlo. Con respecto al tostado, hay que tomar en cuenta que esta operación persigue el darle ciertas propiedades organolépticas, con el fin de tener el sabor y color deseados; entre mayor es el nivel de tostado se consigue un color más oscuro y un sabor más amargo, y si el nivel de tostado es mínimo el color será más claro y el sabor no cambiará al propio del grano (Gisbert, 2016).

2.3.1.3. Molienda

Lo que se busca en la molienda es triturar en seco el grano previamente deshidratado, hasta un tamaño de partícula óptimo, sin llegar a nivel de harina. Se evita desintegrar la cascarilla. Para la molienda se puede triturar el grano en seco o en húmedo, siendo el más utilizado y el recomendable por vía seca (González, 2019).

2.3.1.4. Maceración

Durante la maceración ocurren cambios de importantes con respecto a la molienda, pues esta se pone Por medio de un macerado de agua con el producto de la molienda, se puede solubilizar algunos de los componentes insolubles del molido del grano, esto se lo hace con la finalidad de aprovechar mayormente el producto para abaratar costo de la materia prima. Uno de los aspectos más importantes de la maceración es la degradación de las cadenas de almidón por acción de la α -amilasa, esta última corta las cadenas de almidón a dextrinas más pequeñas, al no degradarse el almidón puede causar enturbiamiento de la cerveza. Para el control de la degradación de azúcares se usa tintura de yodo, en un examen llamado tintura de yodo, al colocar yodo en una muestra de macerado, si esta adquiere una tonalidad de azul a rojo, significa que no se ha degradado aún el almidón, en cambio, si se tiene en la muestra dextrinas menores la coloración será amarillo - marrón (propio del yodo) (Sancho, 2015).

2.3.1.5. Cocción

Al cocinar el mosto se inhibe las enzimas y proteínas y se esteriliza. Usualmente se agregan plantas o productos como el lúpulo para darle características específicas al sabor del mosto. Es aquí donde converge la mayor parte de la formulación propia de la cerveza a fin que adquiera características deseadas en el producto final y en donde se puede agregar sabores adicionales (Suárez, 2013).

2.3.1.6. Fermentación

Después de la cocción, al mosto filtrado a temperatura ambiente se le añade levadura, la cual consumirá los azúcares presentes, transformando estos en alcohol y dióxido de carbono (en iguales proporciones), la fermentación se realiza en medio anaerobio. Se puede emplear diferentes temperaturas a fin de conseguir una fermentación rápida. En la fermentación existen dos fases, en la primera las levaduras se multiplican por consumo del oxígeno, y en la segunda se produce alcohol.

Considerando las fases de fermentación se procura la mayor concentración de oxígeno en la primera fase a fin que las levaduras alcancen su número máximo posible, esto ayudará a acortar el tiempo de fermentación (De Mesones, 2016).

2.3.1.7. Carbonatación

Existen dos vías posibles para la carbonatación; carbonatación natural y carbonatación forzada. En la carbonatación natural, se espera a que la acción de las levaduras carbonate la cerveza, esta carbonatación es pobre a comparación de la carbonatación forzada, donde por medio de CO₂ de grado alimenticio inyectado dentro de un recipiente que contenga la cerveza. Este es el paso más importante para este documento, el cual se va a desarrollar a lo largo del mismo (Balaguer, 2017).

2.3.1.8. Envasado

En el envasado se toma en cuenta el envase al cual se va a conservar la cerveza, para asegurar inocuidad del envase a este se lo somete a un lavado con agua a temperatura alta y posterior enjuague con agua a 10°C, con esto se busca esterilizar el envase el cual al final de la esterilización tendrá una temperatura de 12-15°C. Se puede ocupar diversos agentes para esterilizar los envases, como el CO₂, siempre y cuando estos no afecten a la cerveza. Los envases preferidos y recomendados para el envasado y comercialización de la cerveza son de plástico oscuro o de vidrio oscuro o ámbar (Sancho, 2015).

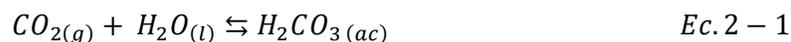
2.3.2. Carbonatación

La carbonatación es la saturación de un líquido con dióxido de carbono gaseoso (Abu-Reidah, 2019). Es un término usado para definir la disolución de este gas en agua o una bebida usando presiones y temperaturas determinadas. Generalmente, estas condiciones son bajas presiones y altas temperaturas. En la práctica, la adición de dióxido de carbono constituye una acción preservativa cuya efectividad se incrementa a medida que el nivel de carbonatación aumenta puesto que, este gas es capaz de destruir e inhibir el crecimiento de bacterias (Ryan, 2014).

El CO₂ adicionado es efectivo como anti levaduras porque tiende a suprimir el CO₂ que es subproducto de la fermentación de sacarosa a etanol. Además, desplaza al oxígeno el cual es necesario para el crecimiento de las bacterias.

Por otra parte, la adición de dióxido de carbono a la cerveza le aporta un sabor ácido y picante, contribuye al cuerpo de esta, a la formación de espuma, y la hace efervescente (Abu-Reidah, 2019).

La acidez se debe principalmente a la formación de pequeñas cantidades de ácido carbónico tras la disolución del dióxido de carbono en el agua, tal y como ilustra la siguiente reacción (Girardon, 2019b).



Esta es una reacción reversible puesto que el equilibrio que favorece la aparición del ácido carbónico se establece a elevadas presiones y bajas temperaturas. En condiciones atmosféricas el equilibrio se desplaza hacia la izquierda, pues se favorece la formación de dióxido de carbono gaseoso. Este fenómeno se puede observar en la cerveza como la aparición de burbujas o gas (dióxido de carbono) una vez que se destapa y el equilibrio previo se rompe. Es de notar que, este proceso constituye el penúltimo paso antes de obtener una cerveza carbonatada.

2.3.3. Dióxido de carbono

Compuesto de carbono y oxígeno en un ratio en peso de 27 a 73 por ciento respectivamente, el dióxido de carbono es un gas en condiciones atmosféricas de presión y temperatura («Handb. Compress. Gases», 1999).

Es inerte, no tóxico, sin olor, sin sabor, con un peso de 1.5 veces el del aire, ligeramente ácido, relativamente fácil de encontrar y de bajo costo. En condiciones atmosféricas es muy poco soluble en el agua y etanol, aunque esta propiedad se incrementa a medida que disminuye la temperatura (Girardon, 2019a).

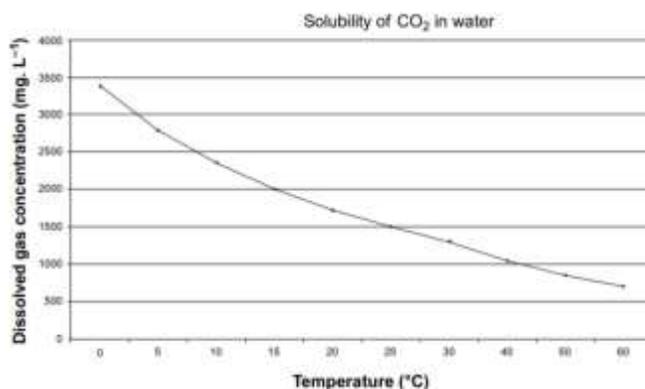
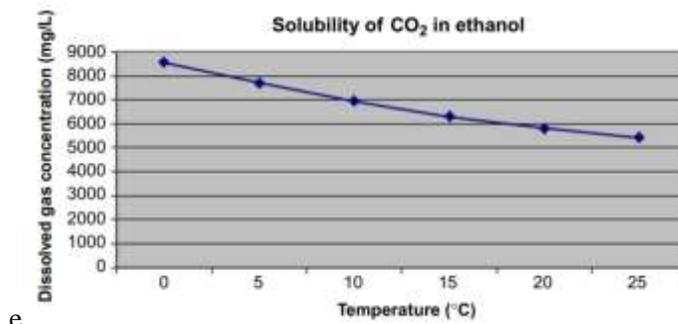


Gráfico 2-1: Solubilidad del CO₂ en agua

Fuente: (Girardon, 2019a).



e

Gráfico 2-2: Solubilidad del CO₂ en etanol

Fuente: (Girardon, 2019a).

La máxima cantidad de dióxido de carbono que se puede disolver en agua es de 8g/L. Cualquier exceso solo se mantendría en solución si la bebida está bajo presión.

2.3.4. Diagrama de fases del dióxido de carbono

La ilustración a continuación muestra los efectos de la presión y la temperatura sobre los tres estados del dióxido de carbono. El punto triple (en donde coexisten los tres) está en 5.11 bares de presión y -56.6 °C. A partir de una temperatura superior a los 31 °C (el cual es el punto crítico) es prácticamente imposible licuar este gas incrementando la presión.

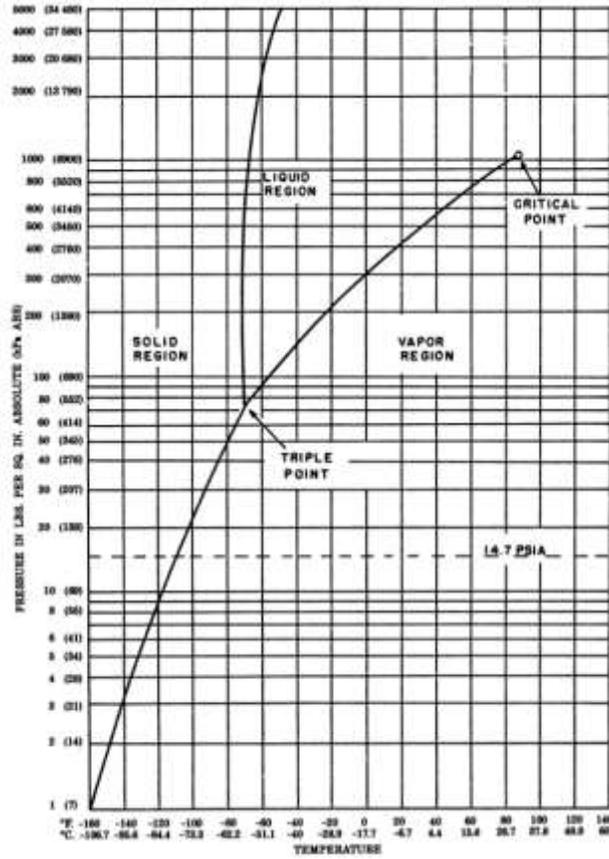


Gráfico 2-3: Diagrama de fases del CO₂

Fuente: (Abu-Reidah, 2019).

Así, el CO₂ se licua cerca del punto crítico o cerca del punto triple (Abu-Reidah 2019).

2.3.5. Fuentes de dióxido de carbono

Usualmente, el CO₂ comercial usado para carbonatación se deriva de tres fuentes principales (Ryan 2014).

- Como subproducto de la misma fermentación
- Del calentamiento de caliza
- De la quema de carbón

También se puede obtener de la reacción entre el bicarbonato de sodio y el ácido sulfúrico, de la quema de combustibles, de la destilación de alcohol, o como subproducto de la manufactura de fertilizantes. Es importante mencionar que, antes de ser usado en la carbonatación, el CO₂ debe ser depurado y purificado hasta alcanzar el grado de uso alimenticio (Abu-Reidah, 2019).

2.3.6. Nivel de carbonatación

El nivel de carbonatación de una bebida se puede medir en “volúmenes” o en gramos por litro. En este sentido, un volumen significa 1L de CO₂ gaseoso en 1 L de bebida (Ashurst, Hargitt y Palmer, 2017). La equivalencia es la siguiente:

$$1 \text{ vol} = \frac{1 \text{ L } CO_2}{1 \text{ L bebida}} = 1,96g \frac{CO_2}{L} \approx 2g \frac{CO_2}{L} \quad \text{Ec. 2 - 2}$$

2.3.7. Estilos de cerveza en función del nivel de carbonatación

En general, un estilo de cerveza está definido en parte por el nivel de carbonatación que contiene. Así, los volúmenes de CO₂ disueltos impactan considerablemente en la percepción que se tiene de un tipo de cerveza.

Tabla 2-1: Estilos de cerveza y sus niveles de carbonatación

Estilo de cerveza	Volúmenes de CO ₂
Ales británicas	1,5 – 2,0
Porter, stout	1,7 – 2,3
Ales belgas	1,9 – 2,4
Lager europea	2,2 – 2,7
Ales y lager americanas	2,2 – 2,7
Lambic	2,4 – 2,8
Lambic de frutas	3,0 – 4,5
Cerveza de trigo alemana	3,3 – 4,5

Fuente: (Fix, 1999).

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

2.3.8. Instrumentación para medir el nivel de carbonatación

Usualmente, el nivel de carbonatación se determina midiendo la presión y la temperatura dentro del contenedor de la bebida. Dado que la presión dentro del contenedor es dependiente de la cantidad de CO₂ disuelto y la temperatura, se puede establecer una relación entre estas dos variables para determinar los volúmenes de CO₂ (Ashurst, Hargitt y Palmer, 2017).

El instrumento estándar empleado para este fin en la industria es un testador de CO₂ Zahm. Consiste de una aguja hueca muy resistente y un empaque de caucho conectado a un manómetro. La aguja se usa para perforar el contenedor de la bebida, se agita el contenedor vigorosamente para maximizar la presión y la máxima presión alcanzada se registra. También se mide la temperatura de la bebida. Luego, los valores obtenidos de presión y temperatura se comparan en un gráfico estandarizado que fue derivado usando CO₂ disuelto en agua. Aunque la presencia de sólidos disueltos y las diferencias de pH afectan al resultado, para propósitos de control la precisión es la suficiente



Figura 2-1. Testador de CO₂ de Zahm
Nagel

Fuente: (Google Images, 2021).

2.3.9. Condiciones que afectan a la eficiencia del proceso de carbonatación

La carbonatación de una bebida se ve afectada por una serie de parámetros del líquido a tratar y las condiciones del sistema en donde se da el proceso (Girardon, 2019b).

Entre ellas tenemos:

- Temperatura: una reducción en la temperatura incrementa la solubilidad del CO₂
- Concentración de sustancias disueltas: a mayor concentración de sustancias disueltas, menor solubilidad de CO₂
- Presión del sistema gas/líquido: un incremento de la presión incrementa la solubilidad del CO₂

-Nivel de oxígeno disuelto en el líquido: se recomiendan bajas concentraciones de oxígeno disuelto en el líquido previo al proceso de carbonatación.

2.3.10. Carbonatación natural o acondicionamiento en la botella

Es el método clásico y más antiguo mediante el cual se carbonata una cerveza. La carbonatación natural o acondicionamiento en la botella es básicamente un proceso adicional que consiste en añadir una determinada cantidad de levadura y carbohidratos fermentables a la cerveza para que se dé un nuevo proceso de fermentación tras el primero (Štulíková et al., 2020).

Esto se hace con la finalidad de carbonatar la bebida tras embotellarla y asegurar la aparición de ciertos aromas, sabores característicos que se consideran propios del proceso de maduración y carbonatación en la botella.

Es de notar que este procedimiento es muy largo y puede tardar varias semanas o incluso meses hasta obtener la cerveza final. Por esta razón, a escala industrial, la forma de saturar de dióxido de carbono a la cerveza es mediante la carbonatación forzada en condiciones especiales de presión y temperatura.

2.3.11. Carbonatación forzada

Son los procesos de carbonatación que fuerzan la saturación con dióxido de carbono de una bebida en condiciones de presión elevada y baja temperatura. La mayoría de los cerveceros artesanales fuerzan la carbonatación de cerveza por medio de un tanque llamado “keg”. En este tanque se introduce la bebida y seguidamente se agrega dióxido de carbono gaseoso hasta conseguir una presión elevada (aproximadamente 15 psi) y se espera a que el dióxido se disuelva en la bebida mientras esta se mantiene en un ambiente refrigerado. Este procedimiento puede tomar desde unas horas hasta un par de días y requiere de agitación constante por parte del operario (Osborn y Dalaeli, 2017).

Industrialmente, el proceso de carbonatación forzada se realiza añadiendo el dióxido durante el enfriamiento post fermentación, usualmente en los intercambiadores de calor, en flujo continuo. TAMBIÉN se suele inyectar el dióxido en las largas tuberías que transportan la cerveza desde los procesos de enfriamiento hasta el empaçado.

Adicionalmente existe otro método para forzar la carbonatación conocido como “batch carbonation 17tone method” o método de la carbonatación por lotes con piedras difusoras (Osborn y Dalaeli, 2017). Este consiste en armar un tanque presurizado y burbujear dióxido de carbono en la cerveza, que previamente ha sido filtrada y enfriada en un intercambiador de calor. Este método es el de interés de esta tesis.

2.3.12. Carbonatador tipo batch

Un carbonatador tipo batch, también conocido como tanque de acondicionamiento, es el equipo que se emplea para saturar de CO₂ una bebida. Este equipo consiste de un tanque con chaquetas para controlar la temperatura de la cerveza, válvulas de alivio, manómetros, sensores de caudal y temperatura, un difusor o piedra de carbonatación, un puerto de llenado ubicado en el fondo y un puerto de vaciado ubicado en uno de los costados del tanque (Mosher y Trantham, 2017).

Generalmente, el fondo de un carbonatador es mucho más plano que el fondo de un fermentador, aunque debe ser cóncavo con la finalidad de retirar cualquier precipitado o la cerveza en su totalidad. La parte más importante del carbonatador es quizá la piedra de difusión. La principal función de esta parte es lograr que las burbujas de CO₂ sean muy pequeñas con el fin de incrementar el área superficial de contacto entre el gas y el líquido para facilitar absorción del CO₂ en la cerveza (Abu-Reidah, 2019). La eficiencia de la carbonatación depende directamente de este proceso y una selección incorrecta del tamaño de poro en la piedra difusora y el flujo en esta, puede llevar a pérdidas considerables de CO₂ hacia la atmósfera, pérdidas económicas, contaminación del área circundante y a un elevado riesgo de intoxicación por CO₂ para quienes operan cerca del equipo, pues concentraciones de tan solo el 10% pueden ser mortales («Handb. Compress. Gases», 1999).

2.4. Ley de Henry

En toda la bibliografía revisada hay un consenso general: la carbonatación es un proceso gobernado por la ley de Henry para las condiciones dadas del proceso (Speers y MacIntosh, 2013).

La ley enuncia lo siguiente:

“A temperatura constante, la cantidad de un gas que se disuelve en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial de ese gas en equilibrio con el líquido” (Bergman et al., 2011).

Dado que, si una especie A (en este caso dióxido de carbono) es débilmente soluble en un líquido (en este caso cerveza), la ley de Henry se debe usar para relacionar la fracción molar del dióxido de carbono (A) en la cerveza a la presión parcial del gas A. Así, esta relación permite a los cerveceros determinar la cantidad de dióxido de carbono disuelto en la bebida, en el punto de saturación, basados simplemente en la presión y la temperatura:

$$x_A = \frac{p_A}{H} \quad \text{Ec. 2 - 3}$$

Donde:

p_A = presión parcial del gas A

H = constante de Henry

x_A = fracción molar de A

El coeficiente H es conocido como constante de Henry, es un valor dependiente de la temperatura y la presión, aunque para la presión la dependencia se ignora, generalmente, hasta los 5 bares.

De acuerdo a (Osborn y Dalaeli 2017) la ecuación anterior puede ser reescrita como:

$$C_s = \frac{p_{CO_2}}{H} \quad Ec. 2 - 4$$

Donde:

p_{CO_2} = presión parcial del CO_2 (presión absoluta en el espacio superior)

H = constante de solubilidad de Henry ($Pa \text{ mg L}^{-1}$)

C_s = concentración del dióxido de carbono en el líquida en el punto de saturación ($mg \text{ L}^{-1}$)

La constante de solubilidad es dependiente de la temperatura, y su valor se puede obtener de tablas. Generalmente, en la industria, la solubilidad del dióxido de carbono en la cerveza se estima a partir de la carta de solubilidad de la *American Society of Brewing Chemist*. Esta carta está basada en observaciones empíricas aplicando la ley de Henry y se ha usado durante más de 50 años.

Existe otra expresión y más compleja para estimar la concentración de dióxido de carbono en la cerveza, tomando en cuenta la constante de solubilidad de Henry y otras variables de proceso, elaborada por VitalSensors Technologies:

$$vol \text{ CO}_2 = \frac{5,16 * (Pm + Pa)}{(T + 12,4) * gs * \left(1 + \frac{E}{0,789}\right)} \quad Ec. 2 - 5$$

Donde:

$vol \text{ CO}_2$ = volúmenes de CO_2

Pv = presión manométrica en el tanque

Pa = presión atmosférica

T = temperatura en F de la cerveza

gs = gravedad específica de la cerveza

E = concentración de etanol en peso/peso

5.16 = constante de solubilidad de Henry para el agua

0.789 = densidad del etanol

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo de estudio

El diseño de un equipo de carbonatación para cerveza, es un proyecto de tipo técnico. El trabajo se desarrolló mediante la investigación exploratoria de la carbonatación y los fenómenos físico químicos detrás de este proceso, y el método experimental para diseñar y validar el equipo.

3.1.1. Investigación exploratoria

Aunque la carbonatación es un proceso de amplio uso a nivel industrial, no está científicamente bien documentada. En este sentido, se exploró a profundidad los pocos artículos y la poca información científica que se pudo recopilar acerca de la carbonatación de bebidas, sobre todo cerveza para determinar los principales fenómenos físico químicos que afectan al proceso. La investigación realizada arrojó ciertos consensos entre autores: la carbonatación está ligada, principalmente, a la ley de Henry para la absorción gas-líquido, la disolución del dióxido de carbono en cerveza está muy poco documentada, la determinación de un coeficiente de transferencia de masa entre el CO₂ y la cerveza es un procedimiento tedioso debido a la variabilidad, el proceso depende del área interfacial de contacto entre el CO₂ y la cerveza. El diseño del equipo implica la implementación de todas estas consideraciones.

3.1.2. Investigación experimental

Determinados los principales fenómenos que afectan al proceso, se obtuvieron las variables necesarias para diseñar el equipo. Puesto que es, en esencia, un recipiente sometido a presión, se siguieron los lineamientos del código ASME para el diseño estructural. La validación de la integridad estructural se realizó mediante una simulación en software y la validación experimental del equipo se realizó mediante varios test de carbonatación basados en la norma NTE INEN 2324 Determinación de dióxido de carbono “CO₂” y aire.

3.2. Experimentación

3.2.1. Caracterización de la materia prima

La materia prima a caracterizar es la cerveza “plana” sin carbonatar obtenida después del proceso de fermentación. Los parámetros a determinar están indicados en la Norma NTE INEN 2262 Bebidas alcohólicas. Cerveza. Requisitos.

3.2.2. Parámetros físico químicos

3.2.2.1. Contenido alcohólico

De acuerdo a la norma INEN 2322 Bebidas alcohólicas. Cerveza. Determinación de alcohol existen distintos métodos de ensayo para realizar esta determinación, entre ellos están los siguientes:

- Método volumétrico
- Método gravimétrico
- Método refractométrico
- Método por cromatografía de gases
- Método instrumental con un equipo específico para análisis de cerveza

Se seleccionó el método volumétrico (ver anexo E).

3.2.2.2. Acidez total

De acuerdo a la norma INEN 2323 Bebidas alcohólicas. Cerveza. Determinación de la acidez total existen distintos métodos de ensayo para realizar esta determinación, entre ellos están los siguientes:

- Método por titulación potenciométrica
- Método por titulación con fenolftaleína

Se seleccionó el método por titulación con fenolftaleína (ver anexo F).

3.2.2.3. Ph

De acuerdo a la norma INEN 2325 Bebidas alcohólicas. Cerveza. Determinación del pH, este parámetro se determina mediante un potenciómetro, así que se realizó mediante uno (ver anexo G).

3.2.2.4. *Contenido de hierro*

De acuerdo a la norma INEN 2326 Bebidas alcohólicas. Cerveza. Determinación de hierro, existen dos métodos de ensayo, entre ellos los siguientes:

- Método colorimétrico
- Método por espectrofotometría de absorción atómica

Se seleccionó el método colorimétrico (ver anexo H).

3.2.2.5. *Contenido de cobre*

De acuerdo a la norma INEN 2327 Bebidas alcohólicas. Cerveza. Determinación de cobre, existen varios métodos de ensayo, entre ellos los siguientes:

- Método de la solución de dibencilditiocarbamato
- Método del cupretol
- Método por espectrofotometría de absorción atómica

Se seleccionó el Método por espectrofotometría de absorción atómica (ver anexo I).

3.2.2.6. *Contenido de zinc*

De acuerdo a la norma INEN 2328 Bebidas alcohólicas. Cerveza. Determinación de zinc, existen varios métodos de ensayo, entre ellos los siguientes:

- Método de la solución de dibencilditiocarbamato
- Método del cupretol
- Método por espectrofotometría de absorción atómica

Se seleccionó el Método por espectrofotometría de absorción atómica (ver anexo J).

3.2.2.7. *Contenido de arsénico*

De acuerdo a la norma INEN 2329 Bebidas alcohólicas. Cerveza. Determinación de arsénico, se determina este elemento por espectrofotometría de absorción atómica

Se seleccionó el Método por espectrofotometría de absorción atómica (ver anexo K).

3.2.2.8. Contenido de plomo

De acuerdo a la norma INEN 2330 Bebidas alcohólicas. Cerveza. Determinación de plomo, se determina este elemento por espectrofotometría de absorción atómica

Se seleccionó el Método por espectrofotometría de absorción atómica (ver anexo L).

3.2.3. Parámetros microbiológicos

3.2.3.1. Microorganismos Anaerobios

Se siguió el método indicado en la norma INEN 1529-17 Control microbiológico de los alimentos. Bacterias anaerobias mesófilas. Recuentos en tubo por siembra en masa (ver anexo M).

3.2.3.2. Mohos y levaduras

Se siguió el método indicado en la norma INEN 1529-10 Control microbiológico de los alimentos. Mohos y levaduras viables. Recuentos en placa por siembra en profundidad (ver anexo N).

3.2.4. Test de carbonatación

La metodología para la determinación del nivel de carbonatación usada aquí es una ligera modificación de la metodología presentada en la norma INEN 2324 Determinación de dióxido de carbono “CO₂” y aire. Esta modificación simplemente elimina la parte de determinar el aire en la cerveza.

Se diseñó el aparato para realizar el test, este consta de un recipiente hermético de aproximadamente 500 ml que tiene acoplado un manómetro con una lectura de hasta 60 psi, de acuerdo a lo indicado en el punto 3.2.1 Aparato de perforación con manómetro de la misma norma, y un termómetro con una lectura de hasta 100 °C.

El procedimiento para realizar el test es el siguiente:

1. Se trasvasa aproximadamente 400 ml de cerveza directo desde el tanque de carbonatación al aparato.
2. Se cierra la tapa hermética del aparato
3. Se agita el aparato durante 60 segundos
4. Se toma las lecturas de presión y temperatura en el manómetro y termómetro.

5. Posteriormente, con la tabla 1 de la norma mencionada se cuadran la presión y temperatura obtenidas, y se obtiene el nivel de carbonatación de la cerveza producida.



Figura 3-1. Aparato de perforación para medición de volúmenes de CO₂

Fuente: (Google Images, 2021).

3.3. Establecimiento de las variables de proceso

Puesto que la carbonatación es un proceso gobernado por la ley de Henry, la absorción del dióxido de carbono en la cerveza es dependiente principalmente de la presión y la temperatura dentro del tanque. Así, estas son las dos principales variables de proceso a controlar. El tiempo de residencia está fuera del objeto de este estudio puesto que no existe información referente a esta variable en toda la bibliografía revisada.

Tabla 3-1: Variables de proceso

Variable	Rango o valor
Temperatura (°C)	
Presión (psi)	

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

3.4. Cálculos de ingeniería

Puesto que el equipo diseñado fue un recipiente que soporta presión, el diseño estructural del tanque de carbonatación se realizó siguiendo las indicaciones del código ASME para calderas y recipientes a presión edición 2019

-Para la selección del material se siguió la Sección II Materiales Parte D Propiedades del mismo código

-Para el diseño del cascarón y los cabezales se siguió la Sección VIII Reglas para la construcción de recipientes a presión División I del mismo código

Como referencia auxiliar se empleó el estándar API 620 Diseño y construcción de grandes tanques de acero, soldados y de baja presión

3.4.1. Diseño del tanque de carbonatación

El tanque de carbonatación diseñado es de tipo batch o por lotes. Este consta de un sistema de refrigeración con un serpentín interno, dosificación de dióxido de carbono por piedras difusoras y control de temperatura y presión.

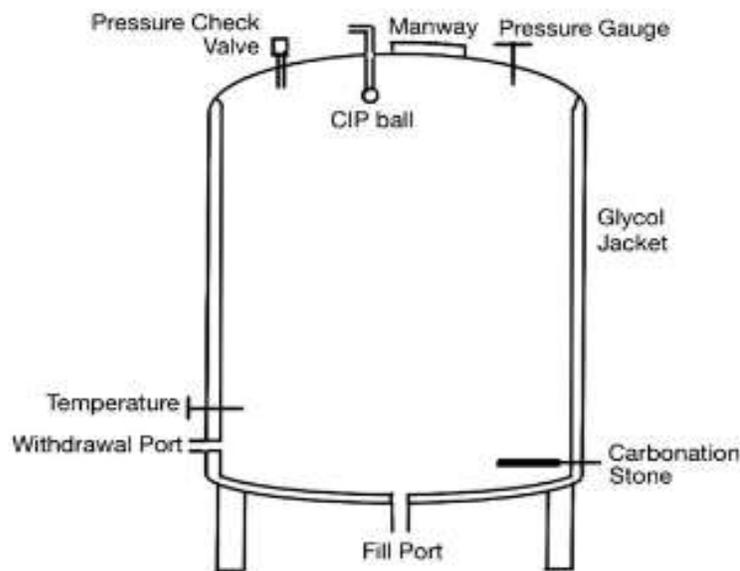


Figura 3-2. Esquema de un carbonatador tipo batch

Fuente: (Mosher y Trantham, 2017).

3.4.1.1. Selección del material de construcción

El material de construcción del equipo tiene que ser acero inoxidable. Como sugiere Conolly (1970), existen dos tipos de acero que son los de uso más común para procesos que involucran cerveza: acero inoxidable AISI tipo 304 L o AISI tipo 316 L. Los dos tipos de acero resisten muy bien la corrosión

debida al contacto con la cerveza, aunque el segundo tiene un mejor desempeño. Así, la selección entre los dos tipos se limita al aspecto económico, puesto que el primer tipo de acero resulta más atractivo desde este punto de vista.

3.4.1.2. Cálculo del headspace y volumen total del tanque

El *headspace* es el espacio vacío que queda en la parte superior del tanque, por encima del nivel del líquido (cerveza), una vez que el tanque está sellado. La determinación del volumen de este espacio es muy importante puesto que aquí se aloja el dióxido de carbono que se disolverá poco a poco en la cerveza en función de la presión parcial que este ejerza sobre el tanque. Idealmente, la presión parcial del dióxido de carbono es la presión medida por el manómetro, pues se asume que no existen otros gases.

Fix (1999) da una pauta para la determinación del volumen de este espacio y corresponde al 20% del volumen total del tanque. Al hacer una simple regla de tres se obtiene la siguiente ecuación:

$$V_h = \frac{100 V_c}{80} - V_c \quad \text{Ec. 3 - 1}$$

Donde:

V_h = volumen del *headspace* (m³)

V_c = volumen del lote de cerveza a carbonatar (m³)

El volumen total del tanque es entonces la suma de los dos volúmenes:

$$V_t = V_c + V_h \quad \text{Ec. 3 - 2}$$

Donde:

V_t = volumen total del tanque carbonatación (m³)

V_h = volumen del *headspace* (m³)

V_c = volumen del lote de cerveza a carbonatar (m³)

Relación diámetro/altura

No existe consenso científico en este aspecto del diseño, es más bien empírico. El código ASME ni lo define ni lo sugiere en ninguno de sus apartados. Así, las relaciones diámetro/altura aquí presentadas están basadas en una extensa revisión de fichas técnicas de *brite tanks* comerciales producidos por la empresa SSBrewtech (*Ss Brite Tank - Ss Brewtech*, n.d.).

Esta relación es variada y presenta los siguientes valores:

$$R = \frac{h}{\varnothing} \approx 1,5 \quad \text{Ec. 3 - 3}$$

$$R = \frac{h}{\varnothing} \approx 2 \quad \text{Ec. 3 - 4}$$

$$R = \frac{h}{\varnothing} \approx 2,5 \quad \text{Ec. 3 - 5}$$

Donde:

R = relación altura/diámetro (adimensional)

h = altura del tanque de carbonatación (m)

\varnothing = diámetro del tanque de carbonatación (m)

La selección de este apartado depende únicamente de la experiencia y necesidad del diseñador.

3.4.1.3. Cálculo del diámetro y la altura

Se parte de asumir que el tanque de carbonatación es un cilindro perfecto y se obtiene una buena aproximación mediante la ecuación del volumen de un cilindro dado el diámetro y su altura:

$$V_t = \frac{\pi h \varnothing^2}{4} \quad \text{Ec. 3 - 6}$$

Donde:

V_t = volumen total del tanque carbonatación (m³)

h = altura del tanque de carbonatación (m)

\varnothing = diámetro del tanque de carbonatación (m)

Si en esta ecuación se sustituye la altura por alguna de las relaciones diámetro/alturas anteriores se tiene:

$$\varnothing = \sqrt[3]{\frac{4 V_t}{R \pi}} \quad \text{Ec. 3 - 7}$$

Donde:

V_t = volumen total del tanque carbonatación (m³)

h = altura del tanque de carbonatación (m)

R = relación altura/diámetro (adimensional)

La altura del tanque es simplemente el despeje de la relación altura/diámetro empleado:

$$h = R \varnothing \quad \text{Ec. 3 - 8}$$

Donde:

h = altura del tanque de carbonatación (m)

R = relación altura/diámetro (adimensional)

\varnothing = diámetro del tanque de carbonatación (m)

3.4.1.4. Tolerancia de corrosión

La Sección VIII Reglas para la construcción de recipientes a presión División I del código ASME no sugiera una tolerancia mínima a la corrosión. La revisión bibliográfica respecto a los efectos corrosivos de la cerveza sobre el acero no dio resultado, así que se siguió las indicaciones del Apéndice G Consideraciones respecto a la tolerancia de corrosión y el cracking inducido por hidrógeno del estándar API 620

3.4.1.5. Selección del tipo de cabezal

El cabezal es la parte superior o inferior, cóncava, de un recipiente. Estas partes del tanque son curvas para resistir la presión, disminuir el ancho de pared necesario y reducir los costos de fabricación (Yahya et al., 2018).

Según la Subsección A, parte UG-32 Cabezales y secciones bajo presión en el lado cóncavo del código ASME, existen cabezales elipsoidales, torisféricos, hemisféricos, cónicos y toricónicos

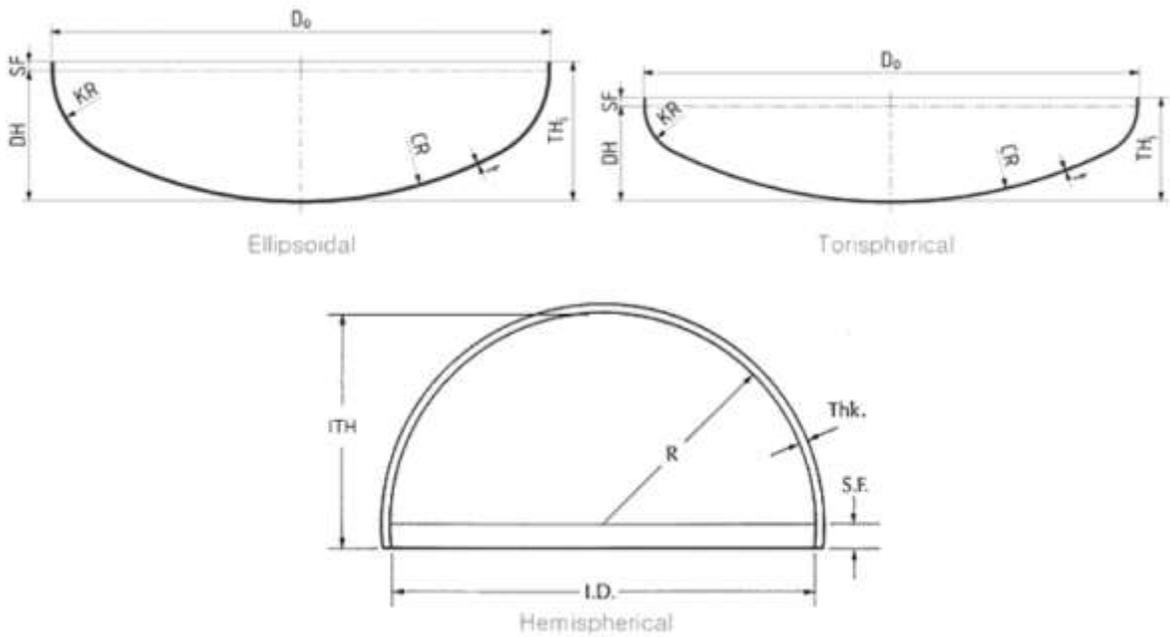


Figura 3-3. Tipos de cabezales para tanques presurizados

Fuente:(«Pressure Vessels, Spherical Pressure vessels (Pressure Spheres), Cylindrical Pressure Vessels», [sin fecha]).

La selección del tipo de cabezal es una cuestión de delicado equilibrio entre funcionalidad y costo, puesto que se los puede diseñar para resistir un rango muy amplio de presiones.

3.4.1.6. Cálculo del ancho de pared y otros parámetros del cabezal

La Subsección A, parte UG-32 Cabezales y secciones bajo presión en el lado cóncavo del código ASME da las pautas necesarias para determinar el ancho de pared y otros parámetros de los cabezales en función del tipo. Así, se tiene:

Para un cabezal elipsoidal:

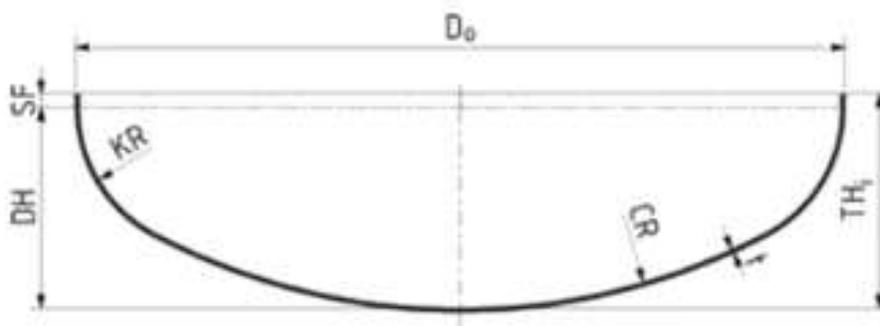


Figura 3-4. Cabezal elipsoidal

Fuente:(«Pressure Vessels, Spherical Pressure vessels (Pressure Spheres), Cylindrical Pressure Vessels», [sin fecha]).

$$t_c = \frac{PR}{SE - 0,6P} + ca \quad \text{Ec. 3 - 9}$$

$$CR = 0,9 \phi \quad \text{Ec. 3 - 10}$$

$$KR = 0,17 \phi \quad \text{Ec. 3 - 11}$$

$$DH = 0,25 \phi \quad \text{Ec. 3 - 12}$$

$$V = 3,611 \left(\frac{\phi}{10 * 30,48} \right)^3 \quad \text{Ec. 3 - 13}$$

Donde:

t_c = ancho de pared del cabezal (mm)

P = presión de diseño (mPa)

ϕ = diámetro del tanque (mm)

S = valor máximo de estrés permisible (mPa)

E = eficiencia de las soldaduras (adimensional)

ca = tolerancia de corrosión (mm)

CR = radio esférico interno (mm)

KR = radio del *knukle* (mm)

DH = altura del cabezal (mm)

V = volumen (l)

Para un cabezal torisférico:

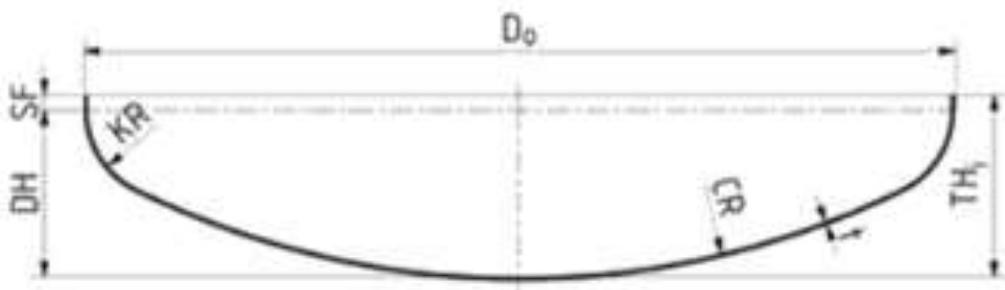


Figura 3-5. Cabezal torisférico

Fuente:(«Pressure Vessels, Spherical Pressure vessels (Pressure Spheres), Cylindrical Pressure Vessels», [sin fecha]).

$$t_c = \frac{0,885 P * CR}{SE - 0,1P} + ca \quad Ec. 3 - 14$$

$$CR = \emptyset \quad Ec. 3 - 15$$

$$KR = \frac{\emptyset}{10} \quad Ec. 3 - 16$$

$$DH = 0,194 \emptyset \quad Ec. 3 - 17$$

$$V = 2,202 \left(\frac{\emptyset}{10 * 30,48} \right)^3 \quad Ec. 3 - 18$$

Donde:

t_c = ancho de pared del cabezal (mm)

P = presión de diseño (mPa)

\emptyset = diámetro del tanque (mm)

S = valor máximo de estrés permisible (mPa)

E = eficiencia de las soldaduras (adimensional)

ca = tolerancia de corrosión (mm)

CR = radio esférico interno (mm)

KR = radio del *knukle* (mm)

DH = altura del cabezal (mm)

V = volumen (l)

Para un cabezal hemisférico:

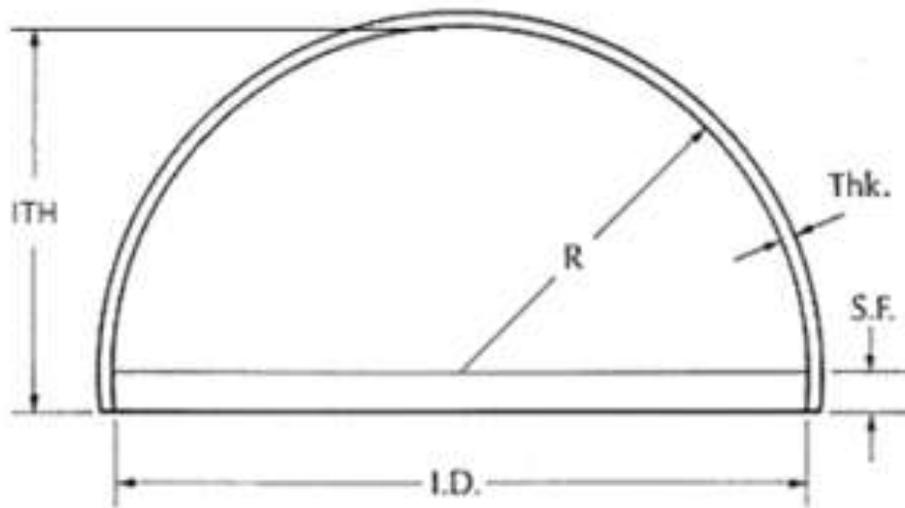


Figura 3-6. Cabezal hemisférico

Fuente: («Pressure Vessels, Spherical Pressure vessels (Pressure Spheres), Cylindrical Pressure Vessels», [sin fecha]).

$$t_c = \frac{P R}{2SE - 0,2P} + ca \quad \text{Ec. 3 - 19}$$

$$R = \frac{\emptyset}{2} \quad \text{Ec. 3 - 20}$$

$$ITH = \frac{\emptyset}{2} \quad \text{Ec. 3 - 21}$$

$$V = 7,411 \left(\frac{\emptyset}{10 * 30,48} \right)^3 \quad \text{Ec. 3 - 22}$$

Donde:

t_c = ancho de pared del cabezal (mm)

P = presión de diseño (mPa)

R = radio esférico interno (mm)

S = valor máximo de estrés permisible (mPa)

E = eficiencia de las soldaduras (adimensional)

ca = tolerancia de corrosión (mm)

ITH = altura del cabezal (mm)

V = volumen (l)

Para un cabezal cónico:

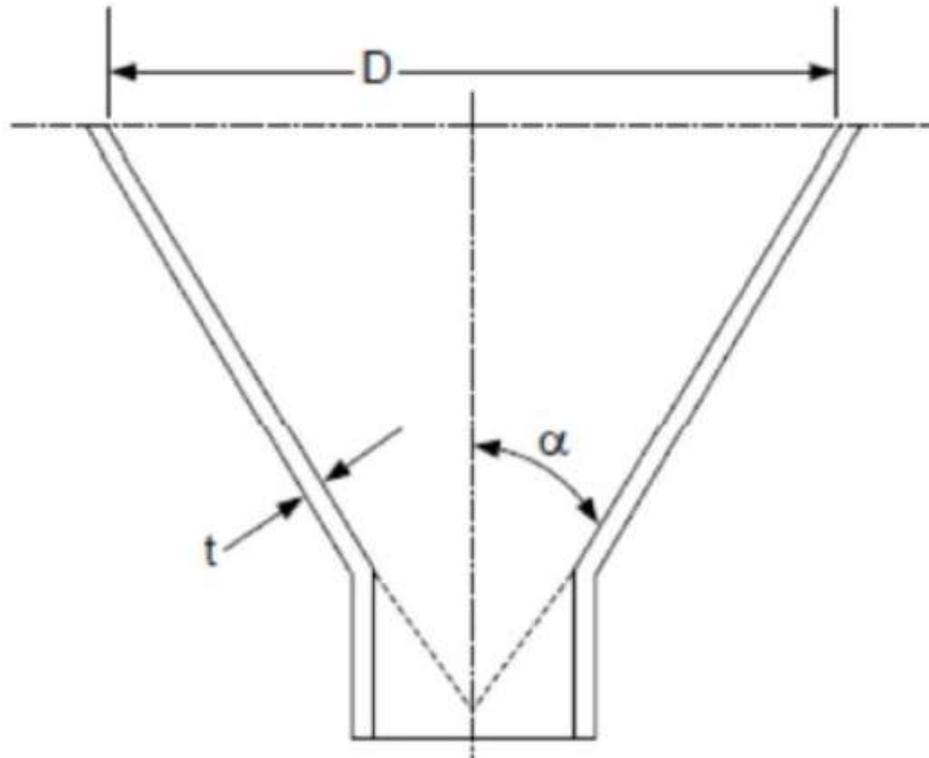


Figura 3-7. Cabezal cónico

Fuente:(«Pressure Vessels, Spherical Pressure vessels (Pressure Spheres), Cylindrical Pressure Vessels», [sin fecha]).

$$t_c = \frac{P\phi}{2 \cos \alpha (SE - 0,6P)} + ca \quad \text{Ec. 3 - 23}$$

Donde:

t_c = ancho de pared del cabezal (mm)

P = presión de diseño (mPa)

ϕ = diámetro del tanque (mm)

S = valor máximo de estrés permisible (mPa)

E = eficiencia de las soldaduras (adimensional)

ca = tolerancia de corrosión (mm)

α = la mitad del ángulo del cono ubicado en la línea central del cabezal (adimensional)

Los valores de L son dependientes del tipo de cabezal y se calculan de diferentes formas en función de ello.

3.4.1.7. Cálculo del ancho de pared del cascarón

El cascarón es la parte de un tanque sometido a presión que no está conformada por los cabezales y que tiene un solo eje de rotación. En general, el cascarón tiene forma cilíndrica, aunque también puede ser esférico y cónico

La Subsección A, parte UG-27 Ancho de pared para cascarones bajo presión interna da las pautas necesarias para determinar el ancho de pared del cascarón en función del tipo. Así, se tiene:

Para cascarones cilíndricos existen dos posibilidades de cálculo del ancho de pared en función de una condición dada:

Si P no excede $0.385 SE$, se aplica la siguiente ecuación:

$$t_s = \frac{PR}{SE - 0,6P} + ca \quad \text{Ec. 3 - 24}$$

Si P no excede $1.25 SE$, se aplica la siguiente ecuación:

$$t_s = \frac{PR}{2SE + 0,4P} + ca \quad \text{Ec. 3 - 25}$$

Para cascarones esféricos:

$$t_s = \frac{PR}{2SE - 0,2P} + ca \quad \text{Ec. 3 - 26}$$

Donde:

t_s = ancho de pared del cascarón (mm)

P = presión de diseño (mPa)

R = radio interno del tanque (mm)

S = valor máximo de estrés permisible (mPa)

E = eficiencia de las soldaduras (adimensional)

ca = tolerancia de corrosión (mm)

3.4.1.8. Determinación de los valores de S (valor máximo de estrés permisible) y E (eficiencia de las soldaduras)

Los valores de S se obtienen de la tabla 1ª de la Sección II Materiales Parte D Propiedades del código ASME. Esta tabla provee los valores de estrés permisible para materiales ferrosos usados en la Sección VII División 1 del mismo código. El valor de S se obtiene en función de la composición química porcentual por elemento del acero y el tipo de acero seleccionado para la fabricación del tanque.

Los valores de E se obtienen de la Subsección B, parte UW-12 Eficiencia de las juntas, Tabla UW-12 Eficiencias máximas permisibles para juntas soldadas a gas o por arco.

3.4.2. Diseño del sistema de alimentación y difusión de dióxido de carbono

3.4.2.1. Tanque de almacenamiento y distribución de dióxido de carbono

El dióxido de carbono usado para carbonatar debe cumplir las especificaciones exigidas por el Reglamento (UE) N° 231/2012 para aditivos alimentarios

Tabla 3-2: Aditivo alimenticio dióxido de carbono: especificaciones

Especificaciones	Valor
Contenido	No inferior al 99% v/v
Monóxido de carbono	No más de 10 µl/l
Contenido de aceite	No más de 5 mg/kg

Fuente: (Unión Europea, 2013).

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

Las presentaciones comerciales más comunes son en envases de acero inoxidable de 10 kg , 25 kg, 29 kg, 32 kg y 35 kg de capacidad.

Tabla 3-3: Propiedades de llenado de los tanques de dióxido de carbono

Contenido del cilindro (kg)	Volumen (L)	Presión de llenado a 15 °C (psi)
10	5400	724
25	13400	724
29	15500	724
32	17100	724
35	18700	724

Fuente:(Indura Ecuador, 2020).

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

La selección del tanque de almacenamiento está relacionada estrictamente a la demanda total de dióxido de carbono por cada batch de cerveza a carbonatar y el costo de adquisición e instalación.

La instalación debe realizarse en base a las recomendaciones de la CGA para evitar problemas de salud («Handb. Compress. Gases», 1999).

Determinación de la demanda de dióxido de carbono por cada lote de cerveza

Considerando una pérdida de 0.2 volúmenes en el llenado, y que el sistema se encuentra en equilibrio, la expresión para determinar la cantidad de dióxido de carbono a disolver en la cerveza es la siguiente (Fix, 1999).

$$kg CO_{2c} = \frac{(Vol + 0,2) * 1,96 \frac{g}{l} * V_c}{1000} \quad Ec. 3 - 27$$

Donde:

$kg CO_{2c}$ = kg de dióxido de carbono necesarios para carbonatar un volumen V_c de cerveza (kg)

Vol = volúmenes de carbonatación requeridos (l CO_2 / l de cerveza)

1.96 g/l = densidad del dióxido de carbono a temperatura y presión estándar

V_c = volumen del batch de cerveza (l)

Por otra parte, es necesario determinar, la cantidad de dióxido de carbono que se alojará en el *headspace* del tanque de carbonatación, puesto que la presión parcial del dióxido de carbono en equilibrio en este espacio afecta a la cantidad disuelta del gas en la cerveza según la ley de Henry (Bergman et al., 2011).

Para un nivel de carbonatación definido, la presión parcial de CO_2 en equilibrio a una temperatura dada del tanque de carbonatación puede encontrarse en la tabla 1 de la norma INEN 2324 Determinación de dióxido de carbono “ CO_2 ” y aire. La ecuación que da la los volúmenes en el *headspace* es la siguiente:

$$Vol_h = 22,45 \frac{P}{RT} \quad Ec. 3 - 28$$

Donde:

Vol_h = volúmenes de CO_2 en el *headspace* del tanque (l CO_2 / l de cerveza)

P = presión parcial de equilibrio del CO_2 (atm)

R = constante de gases ideales (l atm / K mol)

T = temperatura a la presión parcial de equilibrio (K)

La cantidad de CO_2 en el *headspace* viene dada por la siguiente ecuación:

$$kg CO_{2h} = \frac{Vol_h * 1,96 \frac{g}{l} * V_h}{1000} \quad Ec. 3 - 29$$

Donde:

$kg CO_{2h}$ = kg de dióxido de carbono presentes en el *headspace* (kg)

Vol_h = volúmenes de CO₂ en el *headspace* del tanque (l CO₂/l de cerveza)

La demanda total de dióxido de carbono para todo el sistema se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$kg CO_{2t} = kg CO_{2c} + kg CO_{2h} \quad Ec. 3 - 30$$

Donde:

$kg CO_{2t}$ = kg totales de dióxido de carbono necesarios por cada batch carbonatado (kg)

$kg CO_{2c}$ = kg de dióxido de carbono necesarios para carbonatar un volumen V_c de cerveza (kg)

$kg CO_{2h}$ = kg de dióxido de carbono presentes en el *headspace* (kg)

Si es de interés conocer el volumen de una determinada cantidad de CO₂, el factor de conversión de 1 kilogramo de dióxido de carbono a litros de dióxido de carbono se expresa mediante la ley de los gases ideales a las condiciones requeridas mediante la siguiente ecuación:

$$PV = nRT \quad Ec. 3 - 31$$

$$V = \frac{1000}{44,01} \frac{RT}{P} \quad Ec. 3 - 32$$

Donde:

V = volumen de 1 kg de CO₂ (L)

R = constante de gases ideales (l atm / K mol)

T = temperatura a las condiciones dadas (K)

P = presión a las condiciones dadas (atm)

Con esta expresión es posible conocer el volumen ocupado por la cantidad de CO₂ demandada por el tanque de carbonatación, y se puede calcular el gasto volumétrico del gas durante la carbonatación de un batch de cerveza. Adicionalmente, con este valor se puede decidir sobre la capacidad necesaria del tanque de almacenamiento de CO₂

3.4.2.2. Regulador de presión de dióxido de carbono

Este elemento es muy importante pues permite conocer la presión dentro del tanque de almacenamiento de CO₂ y permite regular la presión de alimentación de CO₂ hacia el tanque de carbonatación.

Existen reguladores comerciales en tres presentaciones distintas en función del número de salidas de CO₂ que se requieran, como se nota en la siguiente imagen



Figura 3-8. Reguladores de presión de dióxido de carbono

Fuente: (Beerland Store, [sin fecha]).

La selección del regulador se hace en base a tres elementos:

- La presión a la cual está envasado el CO₂ en el tanque de almacenamiento.
- La presión a la cual se va a carbonatar la cerveza.
- El número de piedras difusoras de las que dispone el tanque de carbonatación.

Una adecuada selección comprende elegir reguladores que soporten la presión del tanque de almacenamiento, es decir el manómetro de alta presión debe soportar una presión superior a la del tanque, y que permitan la selección de la presión adecuada para carbonatar.

3.4.2.3. Sistema de difusión en el tanque de carbonatación

Puesto que la carbonatación de cerveza es un proceso de contacto gas-líquido, el área interfacial de contacto entre estas sustancias es un parámetro muy importante del diseño. Por ende, se requiere de un sistema que actúe en favor de esta propiedad que depende de las propiedades físico químicas del

líquido, la geometría del equipo, los parámetros de operación del equipo, el tamaño de burbuja del gas a absorber y la velocidad superficial del gas (Bouaifi et al., 2001).

Así, la principal función de este sistema es incrementar el área superficial de contacto entre el CO₂ y la cerveza. Generalmente, la forma más común de lograrlo es forzar al gas a fluir a través de un sistema que produzca burbujas muy pequeñas de este dentro del líquido. Una gran cantidad de burbujas pequeñas liberadas a una velocidad considerable arroja una buena área interfacial de contacto (Dursun y Akosman, 2006).

En la carbonatación de cervezas el sistema más usado para este fin son las piedras difusoras o piedras de carbonatación. Son elementos de acero inoxidable que tienen un cuerpo poroso, con poros muy pequeños para producir burbujas de CO₂ muy pequeñas (Stout Tanks and Kettles, [sin fecha]).

Generalmente, se instalan en la parte inferior de los tanques de carbonatación, aunque, no existe una forma técnica, registrada y evaluada de hacerlo. En los tanques comerciales, se suelen ubicar entre 10 a 20 cm del fondo del tanque o se colocan directamente en la parte más baja de estos



Figura 3-9. Piedra de carbonatación comercial

Fuente: (BrewMasters, [sin fecha]).

Las piedras de carbonatación comerciales más comunes tienen diámetros de poro de entre 2 a 5 micras. Las más comunes son las de 5 micras, son muy fáciles de conseguir y de bajo costo. Así, la selección es una cuestión de costos más que de funcionalidad.

Diseño del sistema de difusión

Una vez seleccionada la piedra de carbonatación, es necesario determinar la presión en húmedo P_h . (Stout Tanks and Kettles, [sin fecha]).

Esta es la presión necesaria para impulsar el CO₂ a través de los poros de piedra.

-Se conecta la piedra al sistema de alimentación de CO₂

-Se coloca la piedra de forma vertical en un recipiente lleno de agua

-Se abre la válvula de paso del CO₂ lentamente hasta ver las primeras burbujas aparecer sobre la piedra

-Se toma la lectura de la presión en el manómetro del regulador de CO₂ en este punto

De aquí, se debe determinar la presión hidrostática P_t que ejerce la columna de cerveza sobre la piedra.

Una regla general para esto es que 71 cm de líquido ejercen 1 psi de presión sobre la piedra.

La presión total a aplicar sobre la piedra viene dada por la siguiente ecuación:

$$P = P_h + P_t + P_e \quad \text{Ec. 3 - 33}$$

Donde:

P = presión total a aplicar sobre la piedra (psi)

P_h = presión húmeda (psi)

P_t = presión hidrostática que ejerce la cerveza sobre la piedra (psi)

P_e = presión de equilibrio para alcanzar un determinado volumen de carbonatación, obtenida de la tabla 1 de la INEN 2324 (psi)

Existen dos métodos muy conocidos para carbonatar cerveza (Stout Tanks and Kettles, [sin fecha]).

La selección de cualquiera de estos métodos depende del tiempo que se disponga y del control que se tenga sobre el tanque de carbonatación

- Comenzar con 0 presión en el *headspace* del tanque y llegar lentamente hasta la presión de equilibrio

Se comienza con una presión sobre la piedra de entre 2-3 psi por encima de la presión húmeda. Cada media hora se incrementa en 1 psi la presión hasta alcanzar la presión total P . Este método puede tomar desde algunas horas hasta 1 día, en función de la temperatura de la cerveza.

La ventaja de este método es que se evita la formación excesiva de espuma, lo cual puede alterar los aromas y la retención de espuma de la cerveza

- Comenzar con una presión 1psi por debajo de la presión de equilibrio en el *headspace*

Se presuriza el *headspace* del tanque 1 psi por debajo de la presión de equilibrio, y se sitúa la presión de la piedra a la presión total P . Cuando el manómetro del *headspace* ha alcanzado la presión P y se ha alcanzado el equilibrio (esto se puede verificar con un rotámetro instalada en la alimentación de CO₂) la cerveza está carbonatada

La ventaja de este método es que es más rápido, pues evita que el CO₂ tenga que fluir a través de la cerveza para llenar el *headspace*.

3.4.2.4. Balance de masa del sistema

Puesto que el análisis de la difusión del dióxido de carbono en la cerveza está más allá del alcance de este trabajo, se ha realizará el balance de masa en el estado de equilibrio del sistema. La razón es que en este estado las condiciones ya no son dinámicas y se puede asumir el estado estacionario para el tanque, entendiéndose como dinámica la difusión del dióxido en la cerveza antes del punto de equilibrio (este es un proceso que depende del tiempo y una fuerza motriz, que en este caso es la diferencia de concentraciones de dióxido entre la cerveza y la burbuja de gas) es decir, cuando las presiones del tanque de alimentación y el tanque de carbonatación se han igualado.

El balance, a rasgos generales, se puede resumir de la siguiente manera:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas}$$

$$M_{\text{cerveza}} + M_{\text{CO}_2} = M_{\text{cerveza carbonatada}} + M_{\text{CO}_2 \text{ atmósfera}}$$

3.4.3. Diseño del sistema de refrigeración

El problema consiste en diseñar un intercambiador de calor para para llevar a cabo el enfriamiento de un lote de aproximadamente 40 litros de cerveza, empleando agua fría a 5°C que es suministrada por un chiller propiedad del laboratorio de Procesos Industriales de la facultad de Ciencias de la ESPOCH.

3.4.3.1. Selección del sistema de refrigeración

La selección del sistema de refrigeración depende en gran medida de la necesidad energética para disminuir la temperatura de la cerveza. En este sentido, existen dos posibilidades de diseño para un recipiente de tipo batch:

- Implementar camisas o chaquetas al tanque de carbonatación, para que el intercambio de calor se de a través de las paredes de este o
- Implementar un serpentín de un diámetro y área determinados dentro del tanque de carbonatación, para que el intercambio de calor se de en contacto directo con la cerveza.

La principal diferencia entre las dos posibilidades es el costo y la eficiencia en la transferencia de calor.

3.4.3.2. Selección del tipo de serpentín

Los posibles diseños de serpentines son los siguientes

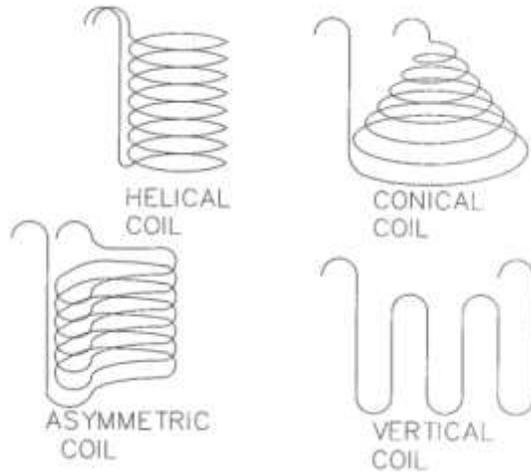


Figura 3-10. Diseños de serpentín

Fuente: (Joye y Smith ,2000).

La selección corresponde a la determinación de cuál es la disposición más eficiente para refrigerar la cerveza hasta una temperatura determinada, en este caso la de diseño del tanque carbonatador.

3.4.3.3. Determinación del coeficiente global de transferencia de calor

El coeficiente global de transferencia de calor está definido de la siguiente manera:

$$UA_{ex} = \left(\frac{1}{h_o * A_o} + \frac{\Delta r}{k * A_{lm}} + \frac{1}{h_i * A_i} \right)^{-1} \quad \text{Ec. 3 - 34}$$

Donde:

U = coeficiente global de transferencia de calor

A_{ex} = área total de intercambio de calor

h_o = coeficiente de convección exterior

A_o = área de la superficie exterior que separa los dos fluídos

Δr = ancho de la pared del serpentín

k = conductividad térmica del

A_{lm} = área logarítmica media del serpentín

h_i = coeficiente de convección interior

A_i = área de la superficie interior que separa los dos fluídos

Según Cengel (2007) para una pared de tubo pequeña, una alta conductividad térmica y superficies interior y exterior del mismo tubo parecidas o aproximadamente iguales, la ecuación anterior se puede simplificar a:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_i}} \quad \text{Ec. 3 - 35}$$

Donde:

U = coeficiente global de transferencia de calor

h_i = coeficiente de convección interior

h_o = coeficiente de convección exterior

El coeficiente de convección interior se puede calcular mediante la correlación de Sieder-Tate para flujo turbulento (Joye y Smith, 2000):

$$h_i = 0,027 \left(\frac{k}{d_i} \right) Re^{0,8} Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ec. 3 - 36}$$

Donde:

h_i = coeficiente de convección interior

k = conductividad térmica del fluido refrigerante

d_i = diámetro interno del serpentín

Re = número de Reynolds

Pr = número de Prandtl

Para un serpentín, los números de Reynolds y Prandtl están definidos de la siguiente manera (Pérez Sánchez et al., 2019):

$$Re = \frac{d_i * v_a * \rho_a}{\mu_a} \quad \text{Ec. 3 - 37}$$

$$Pr = \frac{Cp_a * \mu_a}{k_a} \quad \text{Ec. 3 - 38}$$

Donde:

d_i = diámetro interno del serpentín

v_a = velocidad del refrigerante en el serpentín

ρ_a = densidad del refrigerante en el serpentín a una temperatura media

μ_a = viscosidad dinámica del refrigerante en el serpentín a una temperatura media

Cp_a = calor específico del refrigerante

k_a = conductividad térmica del refrigerante

Los valores del coeficiente de convección exterior se pueden obtener de la siguiente tabla que fue elaborada exclusivamente para un proceso de refrigeración en estado no estacionario, es decir, batch, sin agitación, en función del tipo de serpentín elegido para el proceso.

Tabla 3-4: Coeficientes de convección exterior para diferentes configuraciones de serpentín

Calificación	Configuración del serpentín	h_o a 25°C, W /m ² K	h_o a 40°C, W /m ² K
Mejores	Serpentín asimétrico horizontal, espaciado 1D	761	1000
	Serpentín horizontal, espaciado 2D	727	994
Buenos	Serpentín helicoidal comercial	630	909
	Serpentín cónico hacia abajo	693	892
	Serpentín horizontal, espaciado 1D	676	880
Mediocres	Serpentín helicoidal comercial, descansando en el fondo	505	812
	Serpentín cónico hacia arriba,	545	812
	Serpentín vertical, parte superior en la superficie del líquido	505	750
Malos	Serpentín horizontal, sin espacios	312	528
	Serpentín horizontal, sin espacios, descansando en el fondo	-	227

Fuente:(Joye y Smith, 2000).

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

3.4.3.4. Balance de energía

El intercambio de calor en un recipiente tipo batch es un proceso que se da en estado no estacionario. Puesto que las condiciones del sistema cambian con el tiempo (el flujo de calor y la temperatura), es necesario describir las expresiones de diseño en función de este.

Así, cuando se refrigera un recipiente tipo batch con un serpentín interno y un medio refrigerante no isotérmico (que no cambia de fase), las ecuaciones siguientes pueden aplicarse, que son las descritas en la sección Refrigeración Batch: Medio de refrigeración no isotérmico de (Coker, 2015).

$$\frac{dq}{d\theta} = -M_c \frac{dT}{d\theta} = W_c C_c (t_2 - t_1) = UA\Delta T_{LMTD} \quad Ec. 3 - 39$$

3.4.3.5. Determinación del tiempo de refrigeración del lote de cerveza

Integrando para un tiempo inicial cero y un tiempo final θ se tiene:

$$\ln\left(\frac{T_1-t_1}{T_2-t_1}\right) = \frac{W_C C_C}{M_C} \left(\frac{E-1}{E}\right) \theta \quad \text{Ec. 3 - 40}$$

ordenando para el tiempo θ

$$\theta = \frac{M_t}{W_C C_C} \left(\frac{E}{E-1}\right) \ln\left(\frac{T_1-t_1}{T_2-t_1}\right) \quad \text{Ec. 3 - 41}$$

Donde $E = e^{\frac{UA}{W_C C_C}}$ y $M_t = M_B C_B + M_R C_R$

Variación de la temperatura del lote con el tiempo

La variación de la temperatura del batch con el tiempo está dado por:

$$T_{(\theta)} = t_1 + (T_1 - t_1) e^{\left(\frac{\theta}{M_t B}\right)} \quad \text{Ec. 3 - 42}$$

3.4.3.6. Variación del flujo de calor con el tiempo

La variación del flujo de calor con el tiempo está dada por:

$$q = \frac{T_{(\theta)} - t_1}{B} \quad \text{Ec. 3 - 43}$$

3.4.3.7. Temperatura de salida del líquido refrigerante con el tiempo

La temperatura de salida del fluido refrigerante está dada por:

$$t_2 = t_1 + \frac{q}{W_C C_C} \quad \text{Ec. 3 - 44}$$

Donde $B = \frac{E}{W_C C_C (E-1)}$ y $E = e^{\left(\frac{UA}{W_C C_C}\right)}$

Donde:

A = área de transferencia de calor

C_C = calor específico del refrigerante

M_t = masa térmica de todo el sistema

M_B = masa del batch

C_B = calor específico del batch
 M_R = masa del recipiente
 C_R = calor específico del recipiente
 T_1 = temperatura inicial del batch
 T_2 = temperatura final del batch
 t_1 = temperatura inicial del refrigerante
 U = coeficiente global de transferencia de calor
 W_C = flujo másico de refrigerante
 θ = tiempo
 $T_{(\theta)}$ = temperatura del batch en función del tiempo
 q = variación de la temperatura con el tiempo
 t_2 = temperatura de salida del refrigerante
Longitud del serpentín

Para un área de transferencia de calor dada, la longitud del serpentín se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$L = \frac{4A}{\pi D_o} \quad \text{Ec. 3 - 45}$$

Donde:

L = longitud del serpentín
 A = área de transferencia de calor
 D_o = diámetro externo del tubo

3.4.3.8. Parámetros de diseño del sistema

Son los siguientes:

Tabla 3-5: Parámetros de diseño del serpentín

VARIABLE	RANGO O VALOR
Material	Acero inoxidable
Diámetro interno serpentín (mm)	0,0090

Diámetro externo serpentín(mm)	0,0095
Conductividad térmica serpentín (W/mK)	314
Temperatura de entrada refrigerante (°C)	5
Temperatura inicial del lote (°C)	22
Temperatura final del lote (°C)	7
Coefficiente global de transferencia de calor (W/m K)	503
Flujo másico de refrigerante (kg/s)	0,067
Calor específico del refrigerante (KJ/kg K)	4180
Calor específico del lote (KJ/kg K)	4000
Masa del lote (kg)	40,4
Calor específico del tanque ((KJ/kg K)	500
Masa del tanque (kg)	16

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

3.4.3.9. Iteraciones para determinar el largo del serpentín

Para todas las ecuaciones anteriores, se obtienen todos los datos a partir de la parte experimental. Sin embargo, es deseable asumir el área de transferencia de calor A e iterar matemáticamente, alterando esta variable y el diámetro del serpentín, hasta obtener un largo de serpentín deseable, que quepa en el tanque de carbonatación para obtener un tiempo de refrigeración moderado y adecuado.

Los parámetros a iterar son los siguientes:

Tabla 3-6: Esquema de iteraciones para la elección del largo de serpentín

A (m ²)	E	B	θ (s)	L (m)
0.01	-	-	-	-
0.02	-	-	-	-
0.03	-	-	-	-
0.04...	-	-	-	-
0.2	-	-	-	-

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

3.4.3.10. Número de vueltas y volumen del serpentín

Dada la longitud determinada por las iteraciones consecutivas previas, las ecuaciones para determinar el número de vueltas y la altura del serpentín son las dadas por Patil, Shende y Ghosh (1982) y Pérez Sánchez et al. (2019) y son las siguientes:

$$N = \frac{L}{\sqrt{(\pi D_s)^2 + p^2}} \quad \text{Ec. 3 - 46}$$

Si el valor de N es un número decimal, se redondea al siguiente número entero.

Donde $p = 1.25D_o$

El volumen ocupado por el serpentín está dado por:

$$V_s = \left(\frac{\pi}{4}\right) D_o^2 L \quad \text{Ec. 3 - 47}$$

Donde:

N = número de vueltas del serpentín

L = longitud del serpentín

D_s = diámetro de hélice del serpentín

p = paso

D_o = diámetro externo del tubo que conforma el serpentín

V_s = volumen del serpentín

3.4.3.11. Altura del serpentín

Según Pérez (2019) se calcula de la siguiente manera:

$$H = Np + D_o \quad \text{Ec. 3 - 48}$$

Donde:

H = altura del serpentín

N = número de vueltas del serpentín

p = paso

D_o = diámetro externo del tubo que conforma el serpentín

3.5. Accesorios del tanque de carbonatación

3.5.1. Válvulas

3.5.1.1. Válvula check



Figura 3-11: Válvula check utilizada

Fuente: (GENEBRE, 2020).

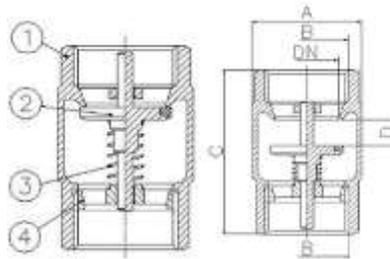


Figura 3-12: Partes de la válvula check

Fuente: (GENEBRE, 2020).

Las válvulas check tienen como función controlar el paso del fluido dependiendo de la corriente o de la presión. Mediante un disco interno, hace que la válvula permita el paso del flujo a cierta dirección, si la presión o el flujo disminuyen, el disco se cierra, haciendo imposible el retorno del líquido. La construcción es simple, sus piezas son el cuerpo, asiento, disco y cubierta (QUIMA, 2018).

Las dos válvulas check utilizadas en el equipo tienen las siguientes características:

- Válvula retención mono cuerpo desmontable PN-25/12
- Construcción en latón forjado según DIN 17660
- Extremos rosca gas hembra s/ISO 228/1
- Temperatura máxima funcionamiento:
- Aire: -20° C a 110 ° C
- Gas: -20° C a 60 ° C

- Agua: 0° C a 90° C
- Presión Mínima de apertura 0.04 bar
- Apta para todo tipo de instalaciones (Industriales, neumáticas e hidráulicas).
- Montaje multiposicional (horizontal, vertical y oblicuo)
- Junta de clapeta vulcanizada de NB

3.5.1.2. Válvula de bola



Figura 3-13: Válvula de bola utilizada

Fuente: (AMAZON 2017).

La válvula de bola usa una bola hueca, perforada y pivotante, de flujo controlable. Abierto cuando el agujero de la pelota está en línea con el flujo y se cierra cuando se gira 90 grados por el mango de la válvula.

- Material: acero inoxidable 304
- Tipo de rosca: Hembra x Hembra
- Norma del hilo: BSP (British Standard Pipe)
- Tamaño de rosca: 1/4 ", 3/8 ", 3/4 ", 1", 1-1/4 ", 1-1/2 "
- Max. Presión: 1000 PSI

3.5.1.3. Válvula mariposa



Figura 3-14: Válvula mariposa utilizada

Fuente: (KMX INDUSTRIAL EQUIPMENT 2019).

Una válvula de mariposa se puede accionar mediante un palanca para abrir o cerrar el flujo que pasa a través de la clamp mediante un disco que gira 90° (MAINCO, 2020).

-Máxima Presión: 145 Psi ~ 10 Bar

-Temperatura: -48 a 135 °C ~ -54 a 275 °F

-Temperatura de Esterilización: 150 °C ~ 302 °F (Máx. 20 min.)

-Material: Acero Inoxidable 304 o 316L

-Empaques EPDM: Agua, Vapor y Acidos diluidos

-Empaques Vitón: Aceite, Químicos, Solventes, Ozono

-Ajuste: Palanca con 3 posiciones, 45° c/u

3.5.1.3. Válvula de alivio de presión



Figura 3-15: Válvula de alivio utilizada

Fuente: (Swagelok 2021).



Figura 3-16: Partes de una válvula de alivio

Fuente: (Swagelok 2020).

Las válvulas de alivio de presión proporcional que se abren gradualmente a medida que la presión aumenta. Las válvulas de alivio de la serie se abren cuando la presión del sistema llega a la presión de disparo y se cierran cuando la presión del sistema desciende por debajo de la presión de disparo (Swagelok, 2020).

La válvula de alivio usada tiene las siguientes especificaciones:

- Presiones de servicio hasta 150 psi, modificada para funcionar a 20 psi.
- Un solo muelle para el rango completo de presión de disparo
- Conexiones finales de 12 mm y 1/2 pulgada—Serie RL4

3.5.2. Accesorios metálicos

3.5.2.1 Codos



Figura 3-17: Codos utilizados

Fuente: (ACORSA PERÚ 2019).

La función del codo de 90° dentro del tanque de carbonatación es el de redirigir el flujo hacia un ángulo determinado. Está fabricado en acero inoxidable roscado (ACORSA PERÚ, 2019).

3.5.2.2. Espigas



Figura 3-18: Espiga utilizada

Fuente: (Brass Fittings 2018).

Estos sirven para pasar el flujo de líquido o gas a través de una manguera, principalmente hechos de latón CA360, CA345 y CA377. Su diseño le permite resistir a las vibraciones además de su acople manual a cualquier sistema (Brass Fittings, 2018)

3.5.2.3. Adaptadores



Figura 3-19: Adaptadores utilizados

Fuente: (Brass Fittings 2018).

Los adaptadores sirven para disminuir o aumentar el diámetro de unión para una tubería, a fin de disminuir o aumentar el área de flujo. Comúnmente se usan para ajustar a dispositivos de medición como termómetros o manómetros. Las roscas por lo general son NPT, son compactas y fáciles de instalar y resistente a vibraciones (Brass Fittings, 2018).

3.5.2.4. *Neplos*



Figura 3-20: Neplos utilizados

Fuente: (CIFUNSA 2019).

Son extensiones cortas, roscables, de acero inoxidable o de bronce, sirven para acoplar codos, adaptadores y otros accesorios. Los neplos se fabrican a partir de tubo de acero soldado por el método de soldadura por resistencia eléctrica (BRW) de alta frecuencia sin material de aporte, cumpliendo con la norma ASTM A-53 para tubos cédula 40 y cédula 80, presentan rosca cónica NPT de acuerdo a la norma ANSI/ASME B1.20.1 (CIFUNSA, 2019).

3.5.2.5. *Tubería de plástico*



Figura 3-21: Manguera para alta presión utilizada

Fuente: (indiamart 2015).

Las tuberías de plásticos son usadas en el transporte de fluidos, tienen una conductividad térmica baja y alto poder aislante. Pueden ser translúcidas u opacas, de diferentes colores y tipos de polímero, para el equipo se utilizó tuberías de plástico flexible, resistente a la presión alta. Además, estos materiales de gran durabilidad permanecen inalterables ante el contacto con los químicos (sales, ácidos, oxidantes, etc.) (JUNTA DE ANDALUCÍA, 2020).

3.5.2.6. Abrazaderas



Figura 3-22: Modelo de abrazadera utilizada

Fuente: (GRAINGER 2021).

Las abrazaderas sirven para fijar las mangueras de plástico a las espigas, a través de un diámetro ajustable. Elaboradas en latón o acero inoxidable.

3.5.2.7. Acoples rápidos



Figura 3-23: Acoples rápidos utilizados

Fuente: (FERROTIENDA.COM 2021).

Los acoples rápidos están hechos de latón, constan de 4 piezas de $\frac{1}{4}$ de pulgada de rosca tipo NTP y una pieza de acoplamiento de rosca rápida. Los acoplamientos rápidos para mangueras de gas son utilizados en la industria y trabajos manuales para conectar aparato de trabajo rápido y sin herramientas, su diseño y materiales son fuertes y duraderos (IBEDA, 2021).

3.5.3. Instrumentos

3.5.3.1. Manómetros



Figura 3-24: Manómetro utilizado

Fuente: (WINTERS 2021).

Los manómetros son dispositivos para medir la presión de un sistema, en nuestro caso medirá la presión del tanque. Las características del manómetro utilizado son:

- Caja acero pintada de negro
- Internos de latón o acero inoxidable 316
- Rangos desde 15'' H₂O en vacío hasta 10psi/bar
- Usados para medición de baja presión de líquidos y gases, sean corrosivos o no
- Ideal para indicadores de flujo de aire, nivel de líquido, gas natural y quemadores de gas (WINTERS, 2021)

3.5.3.2. Termómetro



Figura 3-25: Termómetro utilizado

Fuente: (Genebre S A 2017).

El termómetro acoplado al equipo sirve para medir la temperatura dentro del tanque a fin de controlar la carbonatación del líquido. El termómetro utilizado tiene las siguientes características:

- Conexión a proceso: rosca macho G 1/2", salida posterior.
- Longitud bulbo: 50 mm (ref. 8032) ó 100 mm (ref. 8034).
- Material del bulbo: latón
- Diámetro del bulbo: 11 mm.
- Dimensiones de la caja: 63 mm
- Material de la caja: Acero zincado y plateado
- Aro material: Acero inoxidable
- Visor: cristal
- Doble escala °C y °F
- Escalas: -10°C a 100°C
- Precisión: ± 2,5% (Genebre S A, 2017).

3.6. Prueba hidrostática estándar

Una prueba hidrostática debe ser aplicada en todo recipiente presurizado una vez que su fabricación se ha completado y los accesorios se han colocado. El código ASME en la subsección A Parte UG-99, da los lineamientos para este procedimiento puesto que, en el caso del tanque de carbonatación, es la prueba más factible a realizar, al ser un recipiente sometido a presión interna

Para validar un recipiente presurizado internamente, este debe pasar la prueba hidrostática a una presión de 1.3 veces la presión de diseño, y se debe realizar inspecciones visuales de todas las juntas y conexiones del recipiente. No están permitidas las fugas de ningún tipo.

$$P_{prueba} = 1,3 * P_{diseño}$$

Puesto que el código ASME en la subsección A Parte UG-99 no da mayores lineamientos, la prueba se realizará sometiendo el tanque a la presión sugerida por el código durante un tiempo determinado.

Tabla 3-7: Prueba hidrostática estándar

Tiempo (h)	Presión del test (psi)
1	
2	
3	
4	
5	
6	

7	
8	
9	
10	
11	
12	

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

Durante este tiempo se debe verificar que no existan caídas de presión, y se debe realizar la inspección visual de las juntas y conexiones.

Tabla 3-8: Inspección visual de fugas en el tanque

Conexión	Fugas	
	Sí	No
Válvula de alivio		
Válvula de bola		
Codo superior		
Codo inferior		
Manómetro		
Válvula check superior		
Termómetro		
Tapa del tanque		
Válvula mariposa		

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Caracterización de la materia prima

4.1.1. Parámetros físico químicos

Los resultados de los análisis son los siguientes:

Tabla 4-1: Resultados de los análisis físico químicos

Requisito	Unidad	Resultado	Método de ensayo
Contenido alcohólico a 20 °C	%(v/v)	8,70	NTE INEN 2322
Acidez total	%(m/m)	0,31	NTE INEN 2323
pH		4,41	NTE INEN 2325
Contenido de hierro	mg/dm ³	0,10	NTE INEN 2326
Contenido de zinc	mg/dm ³	0,33	NTE INEN 2328
Contenido de arsénico	mg/dm ³	<0,40	NTE INEN 2329
Contenido de plomo	mg/dm ³	0,016	NTE INEN 2330
Contenido de cobre	mg/dm ³	0,10	NTE INEN 2327

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

4.1.2. Parámetros microbiológicos

Los resultados de los análisis son los siguientes:

Tabla 4-2: Resultados de los análisis microbiológicos

Requisito	Unidad	Resultado	Método de ensayo
Microorganismos anaerobios	ufc/cm ³	8	NTE INEN 1529-17
Mohos y levaduras	up/dm ³	9	NTE INEN 1529-10

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

4.2. Test de carbonatación

4.2.1. Parámetros de diseño del tester de carbonatación

El equipo para realizar el test de carbonatación fue diseñado y construido en base a los requerimientos exigidos por la norma INEN 2324 Bebidas alcohólicas Cerveza Determinación de dióxido de carbono y aire

Tabla 4-3: Dimensiones del tester de carbonatación

Dimensión	Valor
Material	Duralón
Diámetro externo (m)	0,10
Diámetro interno (m)	0,08
Ancho de pared (m)	0,01
Altura (m)	0,12
Volumen (cm ³)	500

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

Tabla 4-4: Accesorios del tester de carbonatación

Accesorios	Rango o valor
Manómetro Genebre ¼ NPT (psi)	0-60

Termómetro Genebre ½ NPT (°C)	0-120
----------------------------------	-------

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

4.2.2. Tester de carbonatación

A continuación de muestran algunas imágenes del tester diseñado



Figura 4-1. Tester de carbonatación

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

4.2.3. Resultados

Se realizaron mediciones de los volúmenes de CO₂ cada hora hasta que se alcanzó los volúmenes necesarios para entrar en el rango pedido por la norma NTE INEN 2262. La carbonatación se realizó a 15 °C y 25 psi de presión:

Tabla 4-5: Resultado de carbonatación de la cerveza

Requisito	Unidad	Resultado	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Carbonatación	Volúmenes de CO ₂	2,45	2,2	3,5	NTE INEN 2324

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

Tabla 4-6: Volúmenes de CO₂ experimentales en función del tiempo

Tiempo (horas)	Temperatura (°C)	Presión (psi)	Volúmenes de CO ₂
0	15	0	0
0,5	15	13	1,83
1	15	17	2,12
1,5	15	18	2,18
2	15	20	2,31
3	15	22	2,45
4	15	22	2,45
5	15	22	2,45
21	15	22	2,45

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

4.3. Establecimiento de las variables de proceso

Una correcta selección de los valores de las variables de operación del tanque de carbonatación se realizó a partir de los valores mínimos y máximos permitidos para la carbonatación en la *Norma NTE INEN 2262 Bebidas alcohólicas. Cerveza. Requisitos.*

Tabla 4-7: Rango de carbonatación según la INEN 2262 Bebidas Alcohólicas Cerveza Requisitos

REQUISITO	UNIDAD	MÍNIMO	MÁXIMO
Carbonatación	Volúmenes de CO ₂	2,2	3,5

Fuente: (INEN, 2020).

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

A partir de la tabla 1 de la misma norma, se estableció los siguientes rangos que permiten cumplir el requisito exigido.

Tabla 4-8: Variables de proceso

Variable	Rango o valor	Obtenido con base en:
Temperatura (°C)	5-25	Tabla 1, INEN 2324
Presión (psi)	0-30	Tabla 1, INEN 2324

Fuente: (INEN, 2020).

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

4.4. Cálculos de ingeniería

4.4.1. Tanque de carbonatación

Las condiciones de operación del tanque propuesto son las siguientes:

Tabla 4-9: Parámetros de operación del tanque de carbonatación

Parámetro	Rango o valor	Obtenido con base en:
Volumen de cerveza (L)	40	Propuesto
Volumen <i>headspace</i> (L)	10	Calculado
Volumen total (L)	50	Calculado
Temperatura (°C)	5-25	Tabla 1, INEN 2324
Presión máxima (psi)	30	Tabla 1, INEN 2324

Fuente: (INEN, 2020).

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

El volumen del *headspace* se calcula como:

$$V_h = \frac{100 V_c}{80} - V_c$$
$$V_h = \frac{100 * 40}{80} - 40$$
$$V_h = 10$$

Donde:

V_h = volumen del *headspace* (m³)

V_c = volumen del lote de cerveza a carbonatar (m³)

El volumen total del tanque es entonces la suma del volumen del *headspace* y el volumen del lote de cerveza:

$$V_t = V_c + V_h$$

$$V_t = 40 + 10$$

$$V_t = 50$$

Donde:

V_t = volumen total del tanque carbonatación (m^3)

V_h = volumen del *headspace* (m^3)

V_c = volumen del lote de cerveza a carbonatar (m^3)

Las dimensiones físicas calculadas para el tanque, dado un volumen total de 50 litros son las siguientes:

Tabla 4-10: Dimensiones del tanque

Dimensión	Rango o valor	Obtenido con base en:
Relación diámetro/altura	2,5	(<i>Ss Brite Tank - Ss Brewtech, n.d.</i>)
Diámetro interno (m)	0,30	Calculado
Altura (m)	0,75	Calculado

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

Elegida la relación diámetro/altura del tanque, el diámetro se calcula de la siguiente manera:

$$\phi = \sqrt[3]{\frac{4 V_t}{R \pi}}$$

$$\phi = \sqrt[3]{\frac{4 * 0,05 m^3}{2,5 * \pi}}$$

$$\phi = 0,30 m$$

Donde:

V_t = volumen total del tanque carbonatación (m^3)

h = altura del tanque de carbonatación (m)

R = relación altura/diámetro (adimensional)

La altura del tanque es simplemente el despeje de la relación altura/diámetro empleado:

$$h = R \varnothing$$

$$h = 2,5 * 0,30 \text{ m}$$

$$h = 0,75 \text{ m}$$

Donde:

h = altura del tanque de carbonatación (m)

R = relación altura/diámetro (adimensional)

\varnothing = diámetro del tanque de carbonatación (m)

4.4.2. Selección del material

Se seleccionó el acero AISI Tipo 304 L debido a su costo inferior y a ofrecer la misma funcionalidad que el Tipo 316 L. Aunque su resistencia a la corrosión es inferior, las condiciones de operación del tanque de carbonatación no exigen mayor grado de resistencia.

Tabla 4-11: Propiedades del acero AISI 304 L

Propiedad	Rango o valor	Obtenido con base en:
Composición	18 % Cr, 8% Ni	Tabla 1 A, Sección II Materiales Parte D, Código ASME
Resistencia máxima a la tracción (psi)	75 000	Tabla 1 A, Sección II Materiales Parte D, Código ASME
Estrés máximo permisible (psi)	20 000	Tabla 1 A, Sección II Materiales Parte D, Código ASME

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

4.4.3. Tolerancia de corrosión

Tabla 4-12: Tolerancia de corrosión

Dimensión	Rango o valor	Obtenido con base en:
------------------	----------------------	------------------------------

Tolerancia de corrosión (mm)	1,6	Apéndice G, API 620
------------------------------	-----	---------------------

Realizado por: Juan Raúl Venegas Ortiz, 2021

4.4.4. Diseño de los cabezales

El tanque de carbonatación tiene dos cabezales, uno superior y uno inferior. Los dos son similares en sus propiedades.

Tabla 4-13: Propiedades y dimensiones del cabezal

Dimensión	Rango, valor o cualidad	Obtenido con base en:
Tipo de cabezal	Elipsoidal	Propuesto
Tipo de acero	AISI 304 L	Tabla 1 A, Sección II Materiales Parte D, Código ASME
Estrés máximo permisible (psi)	20 000	Tabla 1 A, Sección II Materiales Parte D, Código ASME
Eficiencia de las soldaduras	0,7	Tabla UW-12, Subsección B, parte UW-12 Eficiencia de las juntas, Código ASME
Tolerancia de corrosión (mm)	2	Propuesto en base al apéndice G, Api 260
Diámetro del cabezal (mm)	300	Tabla 10, dimensiones del tanque
Radio esférico interno (mm)	270	Subsección A, parte UG-32 Cabezales y secciones bajo presión en el lado cóncavo, Código ASME
Altura del cabezal (mm)	75	Subsección A, parte UG-32 Cabezales y secciones bajo presión en el lado cóncavo, Código ASME
Radio del <i>knuckle</i> (mm)	51	Subsección A, parte UG-32 Cabezales y secciones bajo presión en el lado cóncavo, Código ASME

Volumen del cabezal (L)	3,5	Subsección A, parte UG-32 Cabezales y secciones bajo presión en el lado cóncavo, Código ASME
Volumen total de los cabezales (L)	7	Subsección A, parte UG-32 Cabezales y secciones bajo presión en el lado cóncavo, Código ASME
Ancho de pared (mm)	3	Subsección A, parte UG-32 Cabezales y secciones bajo presión en el lado cóncavo, Código ASME

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021

Los cálculos son los siguientes:

$$t_c = \frac{P\phi}{2SE - 0,2P} + ca$$

$$t_c = \frac{0,206 \text{ mPa} * 300 \text{ mm}}{2(0,7)(137,8 \text{ mPa}) - 0,2(0,206 \text{ mPa})} + 2 \text{ mm}$$

$$t_c = 2,32 \text{ mm}$$

$$t_c = 3 \text{ mm}$$

Los parámetros para el diseño del cabezal elipsoidal se calculan así:

$$CR = 0,9 \phi$$

$$CR = 0,9 * 300 \text{ mm}$$

$$CR = 270 \text{ mm}$$

$$CR = 27,0 \text{ cm}$$

$$KR = 0,17 \phi$$

$$KR = 0,17 * 300 \text{ mm}$$

$$KR = 51 \text{ mm}$$

$$KR = 5,1 \text{ cm}$$

$$DH = 0,25 \phi$$

$$DH = 0,25 * 300 \text{ mm}$$

$$DH = 75 \text{ mm}$$

$$DH = 7,5 \text{ cm}$$

$$V = 3,611 \left(\frac{\varnothing}{10 * 30,48} \right)^3$$

$$V = 3,611 \left(\frac{300 \text{ mm}}{10 * 30,48} \right)^3$$

$$V = 3,50 \text{ L}$$

Donde:

t_c = ancho de pared del cabezal (mm)

P = presión de diseño (mPa)

\varnothing = diámetro del tanque (mm)

S = valor máximo de estrés permisible (mPa)

E = eficiencia de las soldaduras (adimensional)

ca = tolerancia de corrosión (mm)

CR = radio esférico interno (mm)

KR = radio del *knukle* (mm)

DH = altura del cabezal (mm)

V = volumen (l)

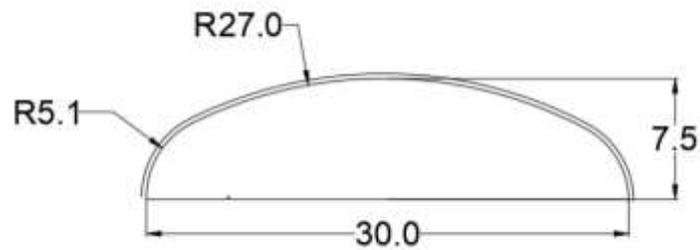
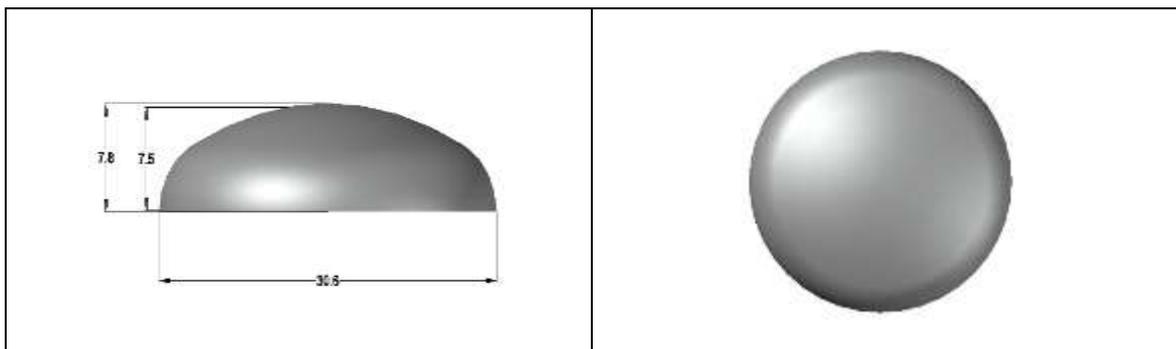


Figura 4-2. Vista bidimensional del cabezal diseñado

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.



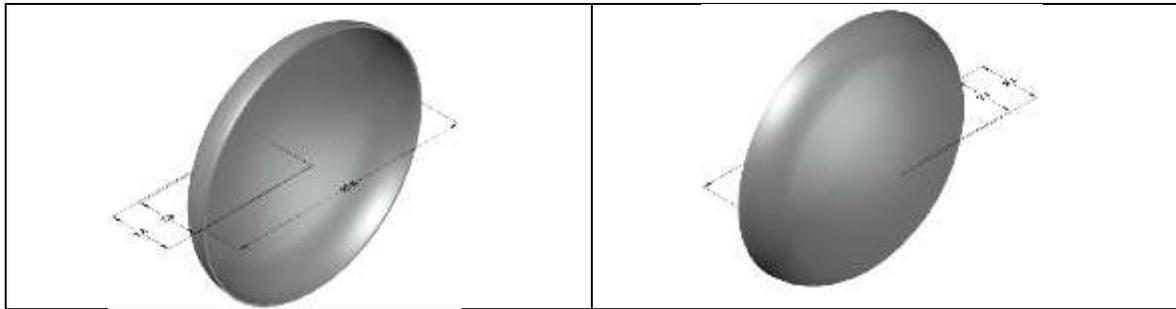


Figura 4-3. Vistas tridimensionales de los cabezales del tanque

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

4.4.5. Diseño del cascarón

Tabla 4-14: Propiedades y dimensiones del cascarón

Dimensión	Rango, valor o cualidad	Obtenido con base en:
Tipo de acero	AISI 304 L	Tabla 1 A, Sección II Materiales Parte D, Código ASME
Estrés máximo permisible (psi)	20 000	Tabla 1 A, Sección II Materiales Parte D, Código ASME
Eficiencia de las soldaduras	0,7	Tabla UW-12, Subsección B, parte UW-12 Eficiencia de las juntas, Código ASME
Tolerancia de corrosión (mm)	2	Propuesto en base al apéndice G, Api 260
Diámetro del cascarón (mm)	300	Tabla 10, dimensiones del tanque
Volumen del cascarón (L)	43	Subsección A, parte UG-32 Cabezales y secciones bajo presión en el lado cóncavo, Código ASME
Ancho de pared (mm)	3	Subsección A, parte UG-32 Cabezales y secciones bajo presión en el lado cóncavo, Código ASME

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

Los cálculos son los siguientes:

Puesto que $P < 0,385 SE$, se aplican las fórmulas para el *circunferential stress*:

$$t_s = \frac{PR}{SE - 0.6P} + ca$$

$$t_s = \frac{0,206 \text{ mPa} * 150 \text{ mm}}{(0,7)(137,8 \text{ mPa}) - 0,6(0,206 \text{ mPa})} + 2 \text{ mm}$$

$$t_s = 2,32 \text{ mm}$$

$$t_s = 3 \text{ mm}$$

$$V = \frac{\pi \phi^2}{4} h$$

$$V = \frac{\pi * (0,3 \text{ m})^2}{4} (0,6 \text{ m})$$

$$V = 0,043 \text{ m}^3$$

$$V = 43 \text{ L}$$

Donde:

t_s = ancho de pared del cascarón (mm)

P = presión de diseño (mPa)

R = radio interno del tanque (mm)

S = valor máximo de estrés permisible (mPa)

E = eficiencia de las soldaduras (adimensional)

h = altura del cascarón (m)

ca = tolerancia de corrosión (mm)

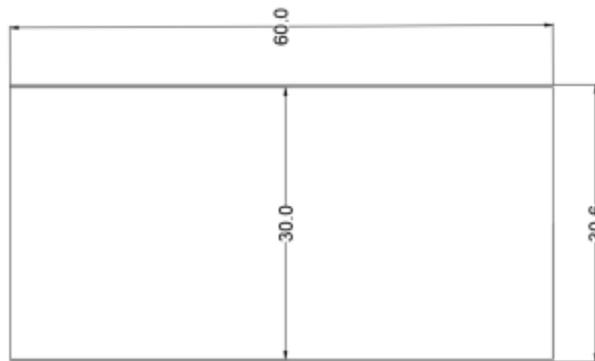


Figura 4-4. Vista bidimensional del cascarón diseñado

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

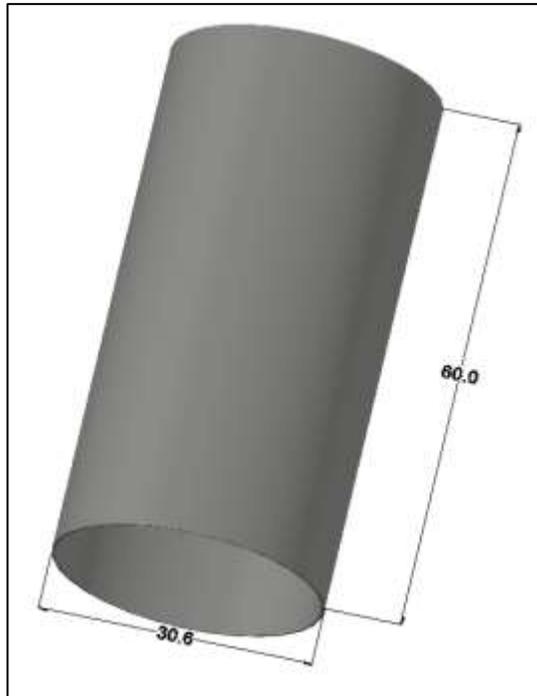


Figura 4-5. Vista tridimensional del cascarón

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

4.4.6. Diseño del sistema de alimentación y difusión de dióxido de carbono

4.4.6.1. Demanda de CO₂ por lote de cerveza

Suponiendo que se quiere carbonatar la cerveza hasta 2.85 volúmenes a 7°C:

Tabla 4-15: Demanda de CO₂ del tanque de carbonatación

Propiedad	Valor o rango
Volúmenes de CO ₂ objetivos (vol CO ₂ /vol cerveza)	2,85
Temperatura de la cerveza (°C)	7
Volumen de cerveza por lote (l)	40
Volumen <i>headspace</i>	10
CO ₂ demandado por la cerveza (kg)	0,239
CO ₂ demandado por el <i>headspace</i> (kg)	0,027

Demanda de CO ₂ total del tanque de carbonatación por lote (kg)	0,268
--	-------

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

Partiendo de que el tanque de CO₂ contiene 10 kg de gas, se pueden carbonatar aproximadamente 35 lotes de cerveza de 40 litros

4.4.6.2. Tanque de almacenamiento de CO₂ y regulador de presión

Se eligió un tanque de CO₂ de acero inoxidable de 10 kg de la marca Linde. La ficha técnica se encuentra en el anexo X y se cumple con los requisitos exigidos por el Reglamento (UE) N° 231/2012 para aditivos alimentarios como el dióxido de carbono

Tabla 4-16: Propiedades del tanque de CO₂

Propiedad	Valor o rango
Marca comercial	Linde
Pureza (%)	99,995
Presión de llenado (psi)	730
Capacidad a 20° (L CO ₂)	5459
Capacidad (kg CO ₂)	10
Monóxido de carbono (ppm)	≤1
Contenido de aceite (ppm)	≤2

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

Se seleccionó un regulador de presión de doble espiga de la marca Talos. Este regulador permite conocer la presión dentro del tanque de almacenamiento de CO₂ y permite regular la presión dentro del tanque de carbonatación., mediante un tornillo. Este instrumento está fabricado exclusivamente para carbonatar cerveza.

Tabla 4-17: Propiedades del regulador de presión

Propiedad	Valor o rango
Marca comercial	Talos
Material	Acero inoxidable
Manómetro de alta presión (psi)	3500

Manómetro de baja presión (psi)	85
Válvula de alivio	Sí
Diámetro de las espigas (pulgadas)	5/16

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

4.4.6.3. Sistema de difusión de CO₂ y método de carbonatación

Se eligió 2 piedras difusoras para promover la absorción más eficiente del CO₂ en la cerveza, con un largo efectivo de difusión de aproximadamente 5 cm.

Tabla 4-18: Propiedades de la piedra de difusión

Propiedad	Valor o rango
Material	Acero inoxidable
Diámetro de poro (µm)	5
Largo (mm)	48
Largo efectivo de difusión por piedra (mm)	26
Diámetro de la espiga (pulgadas)	1/4
Presión en húmedo (psi)	1

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

Se eligió el segundo método de carbonatación pues es más rápido que el primero:

La presión hidrostática a vencer por la piedra al colocarla a 10 cm del fondo del tanque y para una columna de cerveza de 41.6 cm, es la siguiente:

$$41,6 \text{ cm} \times \frac{1 \text{ psi}}{71 \text{ cm}} = 0,6 \text{ psi}$$

Suponiendo que se quiere alcanzar un nivel de carbonatación intermedio en el rango sugerido por la NTE INEN 2324, es decir 2.85 volúmenes a 7°C, se necesita una presión de equilibrio de 19 psi (obtenido mediante la tabla 1 de la misma norma)

La presión total de alimentación de CO₂ es:

$$P = P_h + P_t + P_e$$

$$P = 1 \text{ psi} + 0,6 \text{ psi} + 19 \text{ psi}$$

$$P = 22 \text{ psi}$$

Tabla 4-19: Parámetros de operación del primer método de carbonatación para alcanzar 2.85 vol

Variable	Valor o rango
Método	Headspace presurizado
Volúmenes de CO ₂ objetivos (vol CO ₂ / vol cerveza)	2,85
Presión en el headspace (psi)	21
Presión en la piedra de difusión (psi)	22
Temperatura de la cerveza (°T)	7

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

4.4.6.4. Balance de masa

El balance de masa resultante para el sistema en equilibrio es el siguiente:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas}$$

$$M_{\text{cerveza}} + M_{\text{CO}_2} = M_{\text{cerveza carbonatada}} + M_{\text{CO}_2 \text{ atmósfera}}$$

$$40,400 \text{ kg} + 0,268 \text{ kg} = 40,641 \text{ kg} + 0,027 \text{ kg}$$

$$40,668 \text{ kg} = 40,668 \text{ kg}$$



Figura 4-6. Balance de masa y diagrama de flujo del proceso de carbonatación

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

Diseño del sistema de refrigeración

4.4.7. Selección del sistema de refrigeración

Se optó por un sistema de refrigeración mediante un serpentín puesto que es más atractivo dese un punto de vista económico e ingenieril.

4.4.7.1. Selección del tipo de serpentín

Se seleccionó una disposición de serpentín helicoidal.

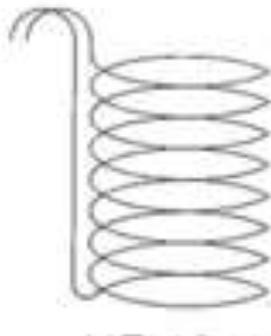


Figura 4-7. Serpentín helicoidal

Fuente: (Joye y Smith 2000).

La razón tras la selección es que esta disposición es fácil de diseñar, fabricar y adicionalmente, presenta un coeficiente convectivo exterior bueno respecto a las otras disposiciones posibles como indican Joye y Smith (2000) para un sistema de refrigeración por lotes sin agitación.

Tabla 4-20: coeficientes de convección exteriores para ciertas configuraciones de serpentín

Calificación	Configuración del serpentín	h_o a 25°C, W /m ² K	h_o a 40°C, W /m ² K
Mejores	Serpentín asimétrico horizontal, espaciado 1D	761	1000
	Serpentín horizontal, espaciado 2D	727	994
Buenos	Serpentín helicoidal comercial	630	909
	Serpentín cónico hacia abajo	693	892
	Serpentín horizontal, espaciado 1D	676	880
Mediocres	Serpentín helicoidal comercial, descansando en el fondo	505	812
	Serpentín cónico hacia arriba,	545	812
	Serpentín vertical, parte superior en la superficie del líquido	505	750
Malos	Serpentín horizontal, sin espacios	312	528
	Serpentín horizontal, sin espacios, descansando en el fondo	-	227

Fuente:(Joye y Smith, 2000).

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

4.4.7.2. Determinación del coeficiente global de transferencia de calor

Se determina el número de Reynolds para una temperatura media de 14 °C:

$$Re = \frac{d_i * v_a * \rho_a}{\mu_a}$$

$$Re = \frac{0,013 \text{ m} * 0,502 \text{ m/s} * 999,3 \text{ kg/m}^3}{0,001170 \text{ kg/ms}}$$

$$Re = 5573.73$$

Se determina el número de Prandtl para una temperatura media de 14 °C:

$$Pr = \frac{Cp_a * \mu_a}{k_a}$$

$$Pr = \frac{4180 \text{ J/kg K} * 0,001170 \text{ kg/ms}}{0,58 \text{ W/K m}}$$

$$Pr = 8,43$$

El coeficiente de convección interior se puede calcular mediante la correlación de Sieder-Tate:

$$h_i = 0,027 \left(\frac{0,58 \text{ W/K m}}{d_i} \right) Re^{0,8} Pr^{1/3}$$

$$h_i = 0,027 \left(\frac{0,58 \text{ W/K m}}{0,013 \text{ m}} \right) (5573,73)^{0,8} (8,43)^{1/3}$$

$$h_i = 2434,30 \text{ W/K m}^2$$

Según la figura 12, para el serpentín helicoidal elegido $h_o = 630 \text{ W/K m}^2$

Según (Cengel 2007), el coeficiente global de transferencia de calor se puede calcular como:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_i}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{630 \text{ W/K m}^2} + \frac{1}{2434,30 \text{ W/K m}^2}}$$

$$U = 500,47 \text{ W/K m}^2$$

4.4.7.3. Balance de energía

Puesto que se trata de un sistema dinámico (en estado no estacionario) el balance se puede expresar como:

$$\frac{dq}{d\theta} = -M_c \frac{dT}{d\theta} = W_c C_c (t_2 - t_1) = UA\Delta T_{LMTD}$$

En donde, la variación del calor cedido por el lote de cerveza en función del tiempo es igual al calor absorbido por el agua de refrigeración que pasa a través del serpentín.

4.4.7.4. Iteraciones para determinar el largo del serpentín

Se realizó iteraciones para áreas de transferencia de calor desde 0.010 m^2 hasta 0.2 m^2 . El principal propósito fue determinar un largo y altura de serpentín que estén de acuerdo a las dimensiones del tanque de carbonatación diseñado previamente.

Los datos empleados para las iteraciones son los siguientes:

Tabla 4-21: Datos para realizar las iteraciones

Datos	Valor o rango
Temperatura de entrada de refrigerante (°C)	5
Flujo másico del refrigerante (kg/s)	0,067
Temperatura inicial de la cerveza(°C)	22

Temperatura final de la cerveza (°C)	7
Calor específico de la cerveza (J/kg k)	4000
Masa del lote de cerveza (kg)	40.4
Calor específico del recipiente (J/kg k)	500
Masa del recipiente (kg)	16,78
Coefficiente global de transferencia de calor (W/ m ² K)	500,47
Diámetro externo del tubo del serpentín (m)	0,0095
Diámetro del serpentín (m)	0,12

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

Suponiendo un área de transferencia de calor para el serpentín de 0.010 m² el cálculo procede de la siguiente manera:

Se calcula el valor de E

$$E = e^{\left(\frac{UA}{W_C C_C}\right)}$$

$$E = e^{\left(\frac{500,47 \text{ W/K m}^2 * 0,010 \text{ m}^2}{0,067 \text{ kg/s} * 4000 \text{ J/kg K}}\right)}$$

$$E = 1,019$$

Se procede a calcular el valor de B

$$B = \frac{E}{W_C C_C (E - 1)}$$

$$B = \frac{1,019}{0,067 \text{ kg/s} * 4000 \text{ J/kg K} (1,019 - 1)}$$

$$B = 0,202 \text{ K/W}$$

Se calcula el tiempo que se tarde en enfriar totalmente el lote de cerveza:

$$\theta = \frac{M_t}{W_C C_C} \left(\frac{E}{E - 1}\right) \ln\left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_1}\right)$$

$$\theta = \frac{M_B C_B + M_R C_R}{W_C C_C} \left(\frac{E}{E - 1}\right) \ln\left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_1}\right)$$

$$\theta = \frac{40,4 \text{ kg} * 4000 \text{ J/kg K} + 16,78 \text{ kg} * 500 \text{ J/kg K}}{0,067 \text{ kg/s} * 4000 \text{ J/kg K}} \left(\frac{1,019}{1,019 - 1} \right) \ln \left(\frac{22 - 5}{7 - 5} \right)$$

$$\theta = 73370 \text{ s}$$

$$\theta = 20,38 \text{ h}$$

Se calcula longitud del serpentín:

$$L = \frac{4A}{\pi D_o}$$

$$L = \frac{4 * 0,12 \text{ m}^2}{\pi * 0,0095 \text{ m}}$$

$$L = 16,08 \text{ m}$$

Para calcular el número de vueltas para un serpentín de 0.849 metros y 0.12 m de diámetro, primero se determina el paso:

$$p = 1,25 D_o$$

$$p = 1,25 * 0,0095 \text{ m}$$

$$p = 0,0118 \text{ m}$$

$$N = \frac{L}{\sqrt{(\pi D_s)^2 + p^2}}$$

$$N = \frac{16,08 \text{ m}}{\sqrt{(\pi * 0,12 \text{ m})^2 + (0,0118 \text{ m})^2}}$$

$$N = 41 \text{ vueltas}$$

El volumen ocupado por el serpentín es:

$$V_s = \left(\frac{\pi}{4} \right) D_o^2 L$$

$$V_s = \left(\frac{\pi}{4} \right) (0,015 \text{ m})^2 * 16,08 \text{ m}$$

$$V_s = 0,00114 \text{ m}^3$$

$$V_s = 1,14 \text{ L}$$

La altura ocupada por el serpentín se determina con:

$$H = Np + D_o$$

$$H = 41 * 0,0118 \text{ m} + 0,0095 \text{ m}$$

$$H = 0,50 \text{ m}$$

El procedimiento anterior se repite para todas las áreas de transferencia de calor propuestas.

Tabla 4-22: Resultado de las iteraciones para determinar el largo del serpentín

A (m ²)	E	B	Tiempo (h)	Longitud (m)	Número de vueltas	Volumen (L)	Altura del serpentín (m)
0,010	1,019	0,202	73370,466	20,381	1,340	4,0	0,10
0,020	1,038	0,102	37027,758	10,285	2,681	7,0	0,19
0,030	1,058	0,068	24914,930	6,921	4,021	11,0	0,29
0,040	1,078	0,052	18859,572	5,239	5,361	14,0	0,38
0,050	1,098	0,042	15227,201	4,230	6,701	18,0	0,48
0,090	1,183	0,024	8774,342	2,437	12,062	31,0	0,86
0,100	1,205	0,022	7968,788	2,214	13,403	35,0	0,95
0,110	1,228	0,020	7310,082	2,031	14,743	38,0	1,05
0,120	1,251	0,019	6761,510	1,878	16,083	41,0	1,14
0,130	1,275	0,017	6297,658	1,749	17,423	45,0	1,24
0,140	1,299	0,016	5900,370	1,639	18,764	48,0	1,33
0,150	1,323	0,015	5556,333	1,543	20,104	52,0	1,43
0,160	1,348	0,014	5255,563	1,460	21,444	55,0	1,52
0,170	1,374	0,014	4990,424	1,386	22,784	59,0	1,62
0,180	1,400	0,013	4754,978	1,321	24,125	62,0	1,71
0,190	1,426	0,012	4544,535	1,262	25,465	65,0	1,81
0,200	1,453	0,012	4355,345	1,210	26,805	69,0	1,90
0,220	1,508	0,011	4029,130	1,119	29,486	76,0	2,09

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

Los resultados señalados en la fila de color amarillo de la tabla previa, son los escogidos para el diseño del serpentín. El parámetro decisivo es la altura del serpentín puesto que este debe acoplarse dentro del tanque de carbonatación. El siguiente parámetro de decisión es el tiempo de refrigeración. Se espera que el tiempo de refrigeración del lote sea moderado. Así, un tiempo de 2 horas es más que adecuado para un lote de 40 litros.

4.4.7.5. Variación de la temperatura del lote en función del tiempo

Para el largo de serpentín seleccionado, al aplicar

$$T_{(\theta)} = t_1 + (T_1 - t_1)e^{\left(\frac{\theta}{M_t B}\right)}$$

Desde un tiempo inicial de cero hasta un tiempo final de 1.85 horas se tiene:

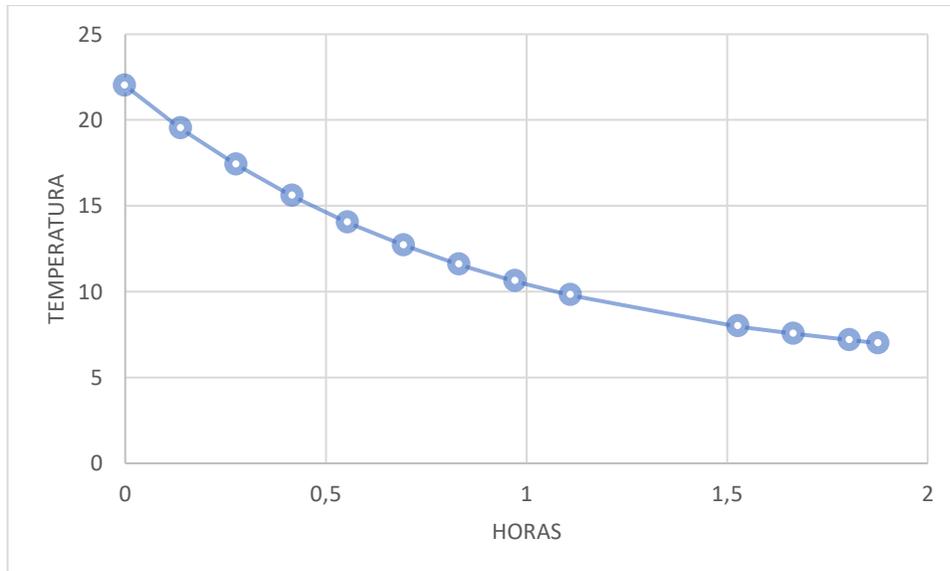


Gráfico 4-1: Temperatura del lote de cerveza en función del tiempo

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

4.4.7.6. Variación del flujo de calor del lote en función del tiempo

Para el largo de serpentín seleccionado, al aplicar

$$q = \frac{T_{(\theta)} - t_1}{B}$$

Desde un tiempo inicial de cero hasta un tiempo final de 1,87 horas se tiene:

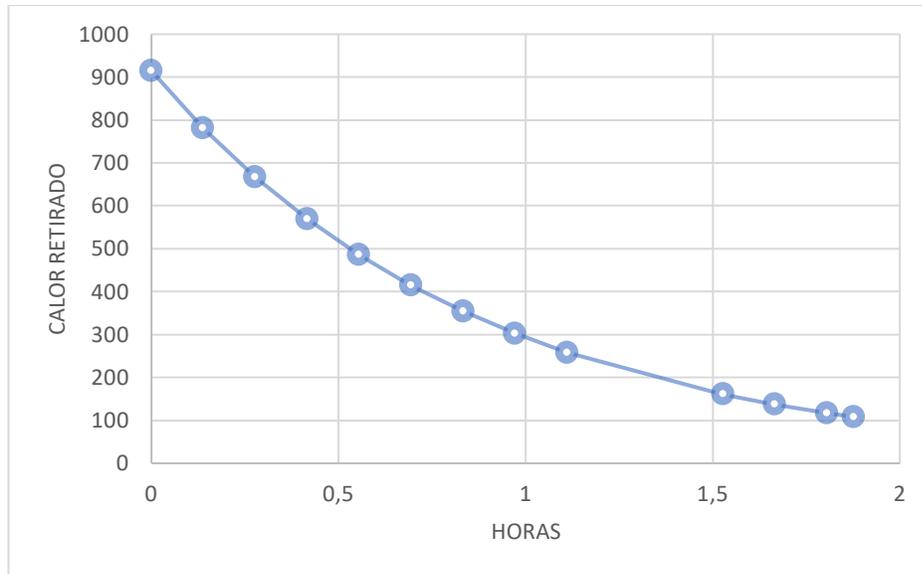


Gráfico 4-2: Calor retirado del lote de cerveza en función del tiempo

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

4.4.7.7. Temperatura de salida del líquido refrigerante en función del tiempo

Para el largo de serpentín seleccionado, al aplicar

$$t_2 = t_1 + \frac{q}{W_C C_C}$$

Desde un tiempo inicial de cero hasta un tiempo final de 1,87 horas se tiene:

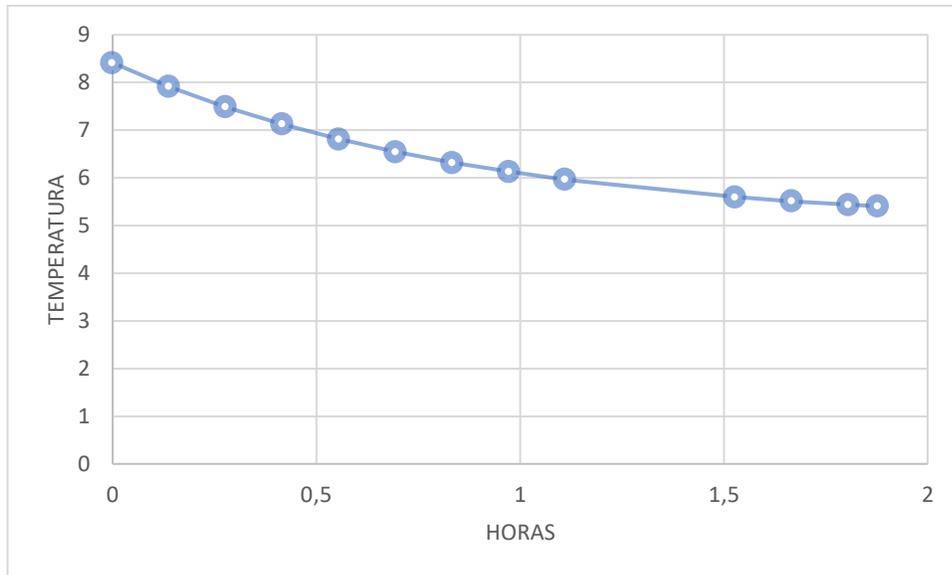


Gráfico 4-3: Temperatura de salida del refrigerante en función del tiempo

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

4.5. Prueba hidrostática estándar

La presión para realizar la prueba hidrostática es la siguiente:

$$P_{prueba} = 1,3 * P_{diseño}$$

$$P_{prueba} = 1,3 * 30 \text{ psi}$$

$$P_{prueba} = 39 \text{ psi}$$

Se probó el tanque a esta presión durante 12 horas, los resultados son los siguientes:

Tabla 4-23: Resultados de la prueba hidrostática estándar

Tiempo (h)	Presión del test (psi)
1	39
2	39
3	39
4	39
5	39
6	39
7	39
8	39

9	39
10	39
11	39
12	39

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

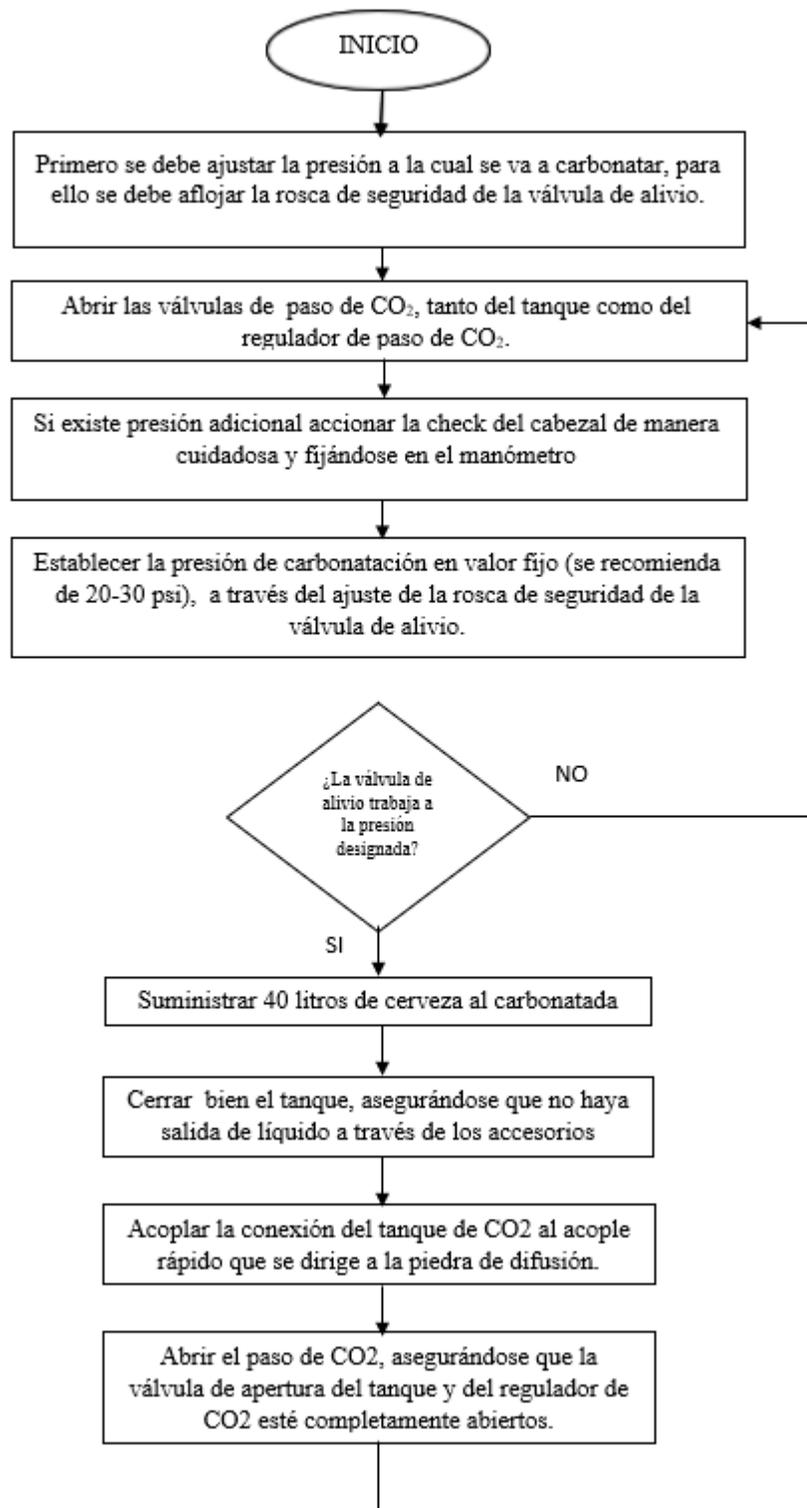
Durante las 12 horas de la prueba, se inspeccionó periódicamente la presencia de fugas en el tanque. Se usó agua en la parte líquida y CO₂ en la parte gaseosa. Los resultados son los siguientes:

Tabla 4-24: Inspección visual de fugas en el tanque

Conexión	Fugas	
	Sí	No
Válvula de alivio		X
Válvula de bola		X
Codo superior		X
Codo inferior		X
Manómetro		X
Válvula check superior		X
Termómetro		X
Tapa del tanque		X
Válvula mariposa		X

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

4.6. Diagrama de flujo del proceso



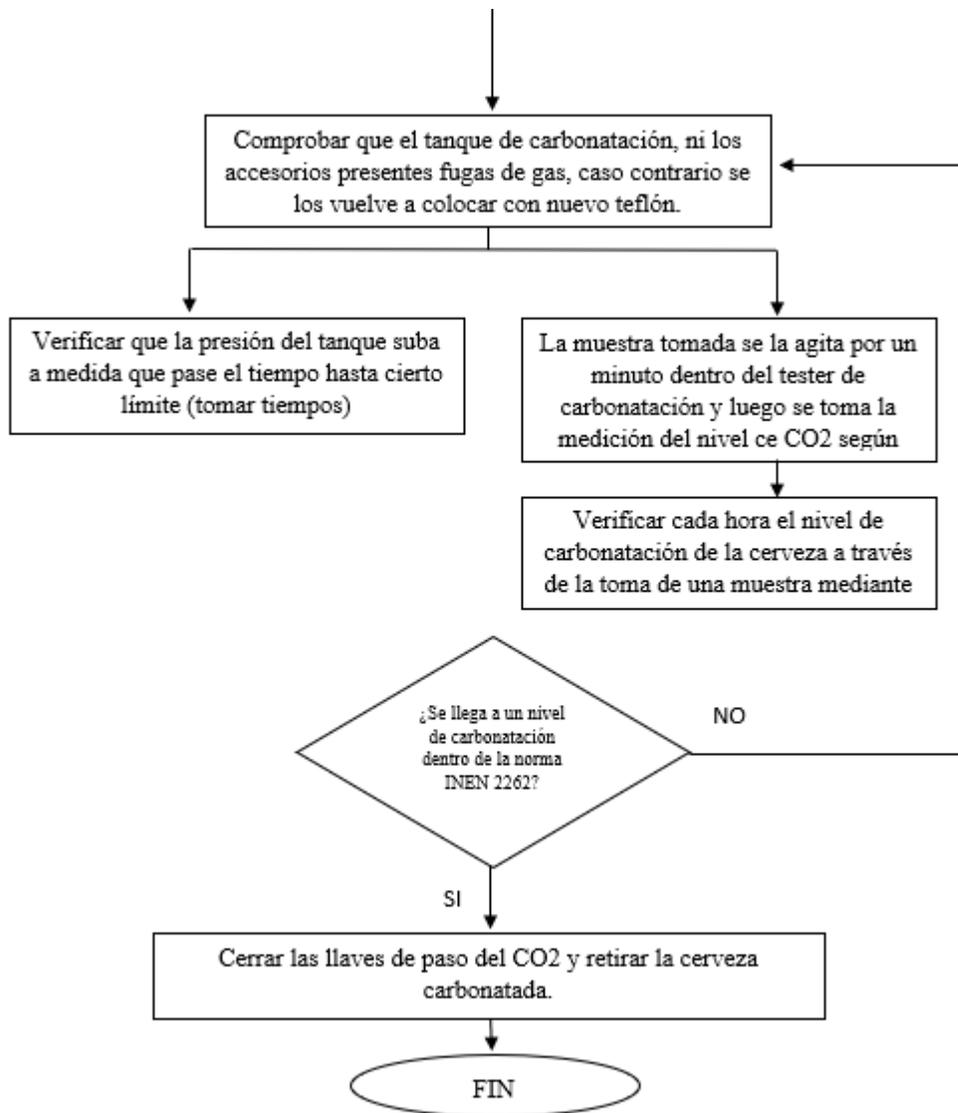


Figura 4-8: Diagrama de flujo del proceso de carbonatación de cerveza
 Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

4.7. Discusión de resultados

4.7.1. Prueba hidrostática estándar

Los resultados de la prueba realizada demuestran que la integridad del tanque está intacta. No se observaron deformaciones en el cuerpo durante el transcurso de la prueba y la presión interna de 39 psi se mantuvo desde el inicio hasta el final de las 12 horas de prueba en ese valor. No se detectaron fugas de CO₂ ni fugas de líquido a través de las conexiones y juntas del tanque en las inspecciones periódicas que se realizaron.

De acuerdo a la subsección A Parte UG-99 del código ASME, el tanque se encuentra apto para operar hasta una presión máxima recomendada de 30 psi, que es la presión para la cual fue diseñado. La temperatura bajo la cual se puede usar el tanque está dentro de los rangos de 5 a 25 °C. Es posible someter el tanque a presiones más altas, pues estructuralmente está sobredimensionado debido a que no existen planchas de acero inoxidable del ancho calculado (2,32 mm) y se redondeó este valor al ancho comercial más cercano (3 mm). Se deben realizar pruebas por encima de los 39 psi, para verificar la integridad estructural del tanque, sin embargo, aquello está más allá de las intenciones de este trabajo.

4.7.2. Pruebas físicas, químicas y microbiológicas de la cerveza

Las pruebas físicas y químicas realizadas en la cerveza demuestran que los parámetros exigidos por la norma NTE INEN 2262 se cumplen, pues están dentro de los rangos permitidos. Los contenidos de metales están por debajo del rango máximo permisible, lo cual indica que no existe contaminación del producto durante la línea de proceso, ni el tanque de carbonatación. El contenido alcohólico es elevado, pero está dentro del rango. La acidez total de la cerveza indica un producto fresco. El pH está dentro del rango.

Tabla 4-24: Comparación de resultados físico químicos

Requisito	Unidad	Resultado	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Contenido alcohólico a 20 °C	%(v/v)	8,70	1,0	10,0	NTE INEN 2322
Acidez total	%(m/m)	0,30	-	0,3	NTE INEN 2323

pH		4,41	3,5	4,8	NTE INEN 2325
Contenido de hierro	mg/dm ³	0,10	-	0,2	NTE INEN 2326
Contenido de zinc	mg/dm ³	0,33	-	1,0	NTE INEN 2328
Contenido de arsénico	mg/dm ³	<0,40	-	0,1	NTE INEN 2329
Contenido de plomo	mg/dm ³	0,016	-	0,1	NTE INEN 2330
Contenido de cobre	mg/dm ³	0,10	-	1,0	NTE INEN 2327

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

Las pruebas microbiológicas para microorganismos anaerobios, mohos y levaduras también están dentro de rango.

Tabla 4-25: Comparación de resultados microbiológicos

Requisito	Unidad	Resultado	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Microorganismos anaerobios	ufc/cm ³	8	-	10	NTE INEN 1529-17
Mohos y levaduras	up/dm ³	9	-	10	NTE INEN 1529-10

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

Los resultados indican que la cerveza obtenida tras la línea de proceso es una cerveza apta para el consumo pues cumple todos los parámetros exigidos por la norma INEN NTE 2262 Cerveza Requisitos.

4.7.3. Test de carbonatación

En las pruebas de carbonatación realizadas se obtuvo un valor de 2,45 vol. de CO₂ por cada litro de cerveza. Este valor se obtuvo luego de mantener en funcionamiento el sistema durante al menos 3

horas, con el lote carbonatado a 15 °C y el sistema sometido a una presión de 25 psi. En esta relación de temperatura y presión se esperaría un valor de 2,64 vol. de CO₂ según la tabla 1 de la norma NTE INEN 2324. Sin embargo, la lectura del tester de carbonatación se mantuvo en 22 psi incluso después de 21 horas de prueba.

El desfase de 3 psi se podría explicar debido al trasvase del líquido carbonatado hacia el mismo tester. Puesto que este procedimiento se realiza en condiciones atmosféricas, una pequeña cantidad de CO₂ sale de disolución con la cerveza y se escapa al ambiente, hasta que se ha cerrado completamente la tapa hermética del tester de carbonatación.

Por otra parte, con el resultado obtenido se cumple el parámetro carbonatación de la norma NTE INEN 2262, puesto que el valor de 2,45 se encuentra dentro del rango permitido, tal y como se indica en la tabla inferior.

Tabla 4-26: Carbonatación

Requisito	Unidad	Resultado	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Carbonatación	Volúmenes de CO ₂	2,45	2,2	3,5	NTE INEN 2324

Realizado por: Calva, C; Venegas, J. 2021.

CONCLUSIONES

En función del valor mínimo y máximo del parámetro carbonatación de la tabla 1 de la INEN 2262 Bebidas Alcohólicas Cerveza Requisitos (2,2 y 3,5 vol. CO₂ respectivamente), se determinó que la relación adecuada de temperatura y presión para el correcto funcionamiento del tanque de carbonatación se encuentra entre los rangos de 5 °C a 25 °C y 0 psi a 30 psi. Estos rangos, aseguran que los niveles de carbonatación obtenidos en el tanque diseñado cumplan con la norma mencionada. Se diseñó y construyó el tanque de carbonatación en base a los lineamientos del código ASME. Los principales parámetros de diseño fueron 30 psi, 25°C y 50 L.

El material de construcción fue elegido en base a los lineamientos de la Sección II Materiales Parte D Propiedades del mismo código y las consideraciones sanitarias del proceso. Puesto que se trata de un alimento, se seleccionó acero AISI 304 L para los cabezales, cascarón y soporte del tanque. Este acero fue seleccionado debido a que es resistente a la corrosión, es más económico que otros aceros como el 316, y su uso está muy extendido en el procesamiento de alimentos.

El tipo de cabezal diseñado fue elipsoidal, pues, son los más comunes en recipientes presurizados y se seleccionó debido a la facilidad de diseño y construcción. El ancho de la pared de acero inoxidable es de 3 mm, determinados mediante los lineamientos de la Subsección A, parte UG-32 Cabezales y secciones bajo presión en el lado cóncavo, del código ASME

El ancho de pared para el cascarón es de 3 mm, determinados de igual forma que en el punto anterior. El diámetro del tanque es de 300 mm, y la altura es de 620 mm

El soporte fue diseñado en una disposición triangular de 3 vigas de 40 cm de largo, con una inclinación de 75 ° respecto al suelo.

Por otra parte, la válvula de alivio fue seleccionada en base a los lineamientos de la subsección A, parte UG-126. Se colocó una válvula de alivio de marca Swagelok cuya presión de desfogue puede regularse entre 20 y 150 psi.

El control de la presión y temperatura dentro del tanque se realiza mediante un manómetro de 0 a 60 psi de marca Winters, y un termómetro radial de -10°C a 100 °C de marca Genebre.

Finalmente, el CO₂ se ingresa al tanque mediante una piedra de difusión colocada a 10 cm de la base de este, para evitar que se obstruya con las proteínas que precipitan de la cerveza. Esta piedra de difusión está acoplada a una conexión rápida y una válvula check para alimentar fácilmente el CO₂, e impedir que la cerveza retorne hacia el tanque de dióxido.

Se verificó el cumplimiento del parámetro carbonatación de la norma INEN 2262 Cerveza mediante el método de ensayo de la norma INEN 2324 Bebidas alcohólicas. cerveza. determinación de dióxido

de carbono “CO₂” y aire. Para ello se diseñó un tester de carbonatación en función de los lineamientos de la INEN 2324. Los resultados obtenidos demuestran que, para el lote de cerveza trabajado, en un tiempo de 3 horas se alcanza un nivel de carbonatación de 2,45 vol. de CO₂. El valor mínimo exigido por la norma es de 2,2 vol. de CO₂. Por lo tanto, el tanque cumple con su funcionamiento.

RECOMENDACIONES

Para ampliación, mejora y profundización de la investigación realizada:

Se recomienda estudiar la integración de un sistema de agitación en la superficie del líquido dentro del tanque, pues es posible que esto tenga implicaciones positivas en la difusión del CO₂ en la cerveza. Se recomienda estudiar la implementación de un sistema de control automático basado en la ecuación descrita en la sección 2.2 de este trabajo.

Se recomienda el uso del tanque de carbonatación en diferentes tipos de bebidas carbonatadas, para evaluar el desempeño del equipo en bebidas diferentes a la cerveza. Este estudio es relevante puesto que, tal como se indica en la sección 2.1.3, la difusión del CO₂ difiere entre en presencia o ausencia de etanol.

Se recomienda estudiar desde el punto de vista de los fenómenos de transferencia de masa la difusión del CO₂ en la cerveza. El fenómeno es muy conocido en el agua, pero los estudios son incipientes y empíricos en bebidas.

Para manejo del equipo:

Evitar que la presión dentro del equipo supere la presión máxima para la cual fue diseñado, es decir 30 psi. Sobrepasar este valor implica poner en riesgo la integridad de las personas que estén cerca del tanque.

Recargar siempre el tanque de almacenamiento con CO₂ de grado alimenticio, o semejantes que cumplan los requisitos exigidos por Reglamento (UE) N° 231/2012 para aditivos alimentarios.

Durante la carbonatación de cerveza, aunque se alcancen los volúmenes dentro del rango exigido por la norma, se recomienda dejar reposar el producto durante al menos un día. Los maestros cerveceros realizan este procedimiento para asegurar el mejor sabor posible en la cerveza.

Asegurar que la válvula de alivio está configurada para funcionar a 30 psi, o en su defecto, a presiones por debajo de esta que sean establecidas. La principal función de esta válvula es evitar sobrepresiones dentro del tanque y desfogar el exceso de presión. Si la válvula de alivio no está funcionando, por ningún motivo se debe usar el tanque hasta que la válvula sea reparada o reemplazada.

BIBLIOGRAFÍA

SS BRITE TANK. 10 gal | Ss Brite Tank - Ss Brewtech, [sin fecha] [en línea]. [Consulta: 17 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.ssbrewtech.com/products/brite-tank-10-gallon>.

ABU-REIDAH, I.M. Carbonated beverages. *Trends in Non-alcoholic Beverages*, 2019, S.l.: Elsevier, pp. 1-36. ISBN 9780128169384.

AL-ZUHAIR, S., RAMACHANDRAN, K.B., FARID, M., AROUA, M.K., VADLANI, P., RAMAKRISHNAN, S. y GARDOSSI, L., Enzymes in Biofuels Production. *Enzyme Research* [en línea], 2011. vol. 2011. [Consulta: 27 diciembre 2020]. DOI 10.4061/2011/658263. Disponible en: <http://www.hindawi.com>.

ANDRADE, X., PISCO, I., QUINDE, L. y CORONEL, C. El mercado de bebidas alcohólicas en Ecuador. *Revista Industrias* [en línea], 2020. [Consulta: 27 diciembre 2020]. Disponible en: <https://revistaindustrias.com/el-mercado-de-bebidas-alcoholicas-en-ecuador/>.

ASHURST, P.R., HARGITT, R. y PALMER, F. Ingredients in Soft Drinks. *Soft Drink and Fruit Juice Problems Solved*, 2017, S.l.: Elsevier, pp. 29-66.

ASOCERV. Estadísticas. *Revista Asocerv* [en línea] , 2018 [Consulta: 27 diciembre 2020]. Disponible en: <https://asocerv.beer/estadisticas>.

BALAGUER, D. *Diseño de una planta de elaboración de cerveza artesanal. microcervecería.* 2017 S.l.: s.n.

BEERLAND STORE. Reguladores y tanques de CO₂. 2020 [en línea] , [sin fecha] [Consulta: 19 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.beerlandstore.com/en/126-reguladores-y-tanques-de-co2>.

BERGMAN, T., LAVINE, A., INCROPERA, F. y DEWITT, D., *Fundamentals of heat and mass transfer.* 2011. 7th. S.l.: John Wiley and Sons. ISBN 9780470501979.

BOUAIFI, M., HEBRARD, G., BASTOUL, D. y ROUSTAN, M., A comparative study of gas hold-up, bubble size, interfacial area and mass transfer coefficients in stirred gas-liquid reactors and

bubble columns. *Chemical Engineering and Processing* [en línea], 2001. vol. 40, no. 2, pp. 97-111. [Consulta: 19 febrero 2021]. ISSN 02552701. DOI 10.1016/S0255-2701(00)00129-X. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S025527010000129X>.

BREWMASTERS Piedra Difusora . [en línea] , [sin fecha]. [Consulta: 19 febrero 2021]. Disponible en: <https://brewmasters.com.mx/shop/piedra-difusora/>.

CARVAJAL, L.D. y INSUASTI, M.A. «*Elaboración de cerveza artesanal utilizando cebada (*Hordeum vulgare*) y yuca (*Manihot Esculenta Crantz*)*», 2010. S.l.: s.n.

CENGEL, Y., *Transferencia de calor y masa*. 2007. 3. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana. ISBN 9789701061732.

COKER, K., *Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*. 2015. S.l.: Elsevier.

CONNOLLY, B.J., The use of stainless steel and nickel alloys to combat corrosion in the brewing, dairy, wine and food industries. *British Corrosion Journal* [en línea], 1970. vol. 5, no. 5, pp. 209-216. [Consulta: 17 febrero 2021]. ISSN 00070599. DOI 10.1179/000705970798324414. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/000705970798324414>.

DE MESONES, B.. PROCESO de ELABORACIÓN BÁSICO y SIMPLIFICADO.2016, S.l.:

DURSUN, G. y AKOSMAN, C., Gas-liquid interfacial area and mass transfer coefficient in a co-current down flow contacting column. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* [en línea], 2006. vol. 81, no. 12, pp. 1859-1865. [Consulta: 19 febrero 2021]. ISSN 02682575. DOI 10.1002/jctb.1611. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1002/jctb.1611>.

EL TELÉGRAFO. El Telégrafo - En Ecuador existen 70 cervecerías artesanales. *Diario El Telégrafo* [en línea]. 24 noviembre 2014. [Consulta: 27 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.itelegrafo.com.ec/noticias/economia/8/en-ecuador-existen-70-cervecerias-artesanales>.

FIX, G., *Principles of Brewing Science: A Study of Serious Brewing Issues* [en línea]. 1999. Second. S.l.: Brewers Publications. [Consulta: 11 enero 2021]. ISBN 0937381748. Disponible en:

<https://www.brewerspublications.com/products/principles-of-brewing-science-a-study-of-serious-brewing-issues-2nd-edition>.

GALITSKY, C., MARTIN, N. y WORRELL, E., *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Breweries*. 2003. S.l.: s.n. ISBN 8993934401.

GIRARDON, P. Gases in enology. *Gases in Agro-food Processes*. 2019a. S.l.: Elsevier, pp. 433-449. ISBN 9780128124659.

GIRARDON, P. Liquid food stuffs gas treatments: Liquid foodstuffs gas treatments. *Gases in Agro-food Processes*. 2019b. S.l.: Elsevier, pp. 455-477. ISBN 9780128124659.

GISBERT, M. *Diseño del proceso industrial para la elaboración de cerveza*, 2016. S.l.: s.n.

GONZÁLEZ, M.G.. *Diseño y dimensionamiento de una línea de elaboración de cerveza artesanal acondicionada en botella con levadura no-Saccharomyces, con una capacidad de 6000 L/semana en Abanto Ciérvana (Vizcaya)*. 2019. S.l.: s.n.

GOOSMAN, J. The carbonic acid industry; a comprehensive review of the manufacture and uses of CO₂. [en línea] , 1906 [Consulta: 18 enero 2021]. Disponible en: https://www.si.edu/object/siris_sil_118579.

GRAINGER, 2021. Abrazadera de Manguera con Engranaje de Tornillo. . *Handbook of Compressed Gases*, 1999. S.l.: Springer US.

INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, ECUATORIANA NTE INEN 2262. , 2013. pp. 5.

JARAMILLO, P., Cervezas artesanales, un mercado que emerge bien. *Revista Gestión*, 2015. pp. 50-55.

JOYE, D.D. y SMITH, M.A., Evaluation of immersion coil designs for natural convection-driven batch cooling or heating in tanks. *Heat Transfer Engineering* [en línea], 2000. vol. 21, no. 5, pp. 47-

54. [Consulta: 25 febrero 2021]. ISSN 15210537. DOI 10.1080/01457630050127946. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01457630050127946>.

LOPEZ, I. *Diseño construcción y validación de un biorreactor a escala de laboratorio con sistema de control automático* [en línea]. Guayaquil: ESPOL. 2017. [Consulta: 27 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/41584>.

MOSHER, M. y TRANTHAM, K., *Brewing Science: A Multidisciplinary Approach* [en línea]. 2017. Cham: Springer International Publishing. [Consulta: 11 enero 2021]. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-46394-0>.

OSBORN, G.S. y DALAELI, J.N. Testing a prototype for improved carbonation of beer. *2017 ASABE Annual International Meeting* [en línea]. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2017. [Consulta: 11 enero 2021]. DOI 10.13031/aim.201700225. Disponible en: <http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?JID=5&AID=47832&CID=spo2017&T=1>.

PATIL, R.K., SHENDE, B.W. y GHOSH, P.K., Designing a Helical-Coil Heat Exchanger. *Chemical Engineering (New York)*, 1982. vol. 89, no. 25, pp. 85-88. ISSN 00092460.

PÉREZ SÁNCHEZ, A., PÉREZ SÁNCHEZ, E.J., HEREDIA SÁNCHEZ, A. y PAZOS AMAYUELA, L., Diseño de un intercambiador de calor de serpiente para el enfriamiento de acetona. *Nexo Revista Científica* [en línea], 2019. vol. 32, no. 01, pp. 61-74. [Consulta: 26 febrero 2021]. ISSN 1818-6742. DOI 10.5377/nexo.v32i01.7988. Disponible en: <http://revistas.uni.edu.ni/index.php/Nexohttps://doi.org/10.5377/nexo.v32i01.7988>.

PRESSURE VESSELS, Pressure Vessels, Spherical Pressure vessels (Pressure Spheres), Cylindrical Pressure Vessels. [en línea], [sin fecha]. [Consulta: 18 febrero 2021]. Disponible en: <http://www.wermac.org/equipment/pressurevessel.html>.

QAZIZADA, M.E. Design of a batch stirred fermenter for ethanol production. *Procedia Engineering*, 2016. S.l.: Elsevier Ltd, pp. 389-403. DOI 10.1016/j.proeng.2016.06.684.

RAMIREZ, S. La cerveza artesanal vive un ‘boom’ en Ecuador | Revista Líderes. *Revista Líderes* [en línea]. 2015. [Consulta: 27 diciembre 2020]. Disponible en:

<https://www.revistalideres.ec/lideres/cerveza-artesanal-vive-ecuador-negocios.html>.

REVISTA LÍDERES. Las cervecerías artesanales crecen en medio de los desafíos | Revista Líderes. *Revista Líderes* [en línea]. 2019. [Consulta: 27 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.revistalideres.ec/lideres/cervecerias-artesanales-crecimiento-desafios-informe.html>.

RYAN, R. Safety of Food and Beverages: Soft Drinks and Fruit Juices. *Encyclopedia of Food Safety* [en línea]. S.l.: Elsevier, pp. 360-363. , 2014 [Consulta: 4 enero 2021]. ISBN 9780123786128. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123786128002961>.

SANCHO, R. *Diseño de una micro-planta de cerveza y estudio de técnicas y procesos de producción.* , 2015. S.l.: s.n.

SPEERS, R.A. y MACINTOSH, A.J., Carbon dioxide solubility in beer. *Journal of the American Society of Brewing Chemists* [en línea], 2013. vol. 71, no. 4, pp. 242-247. [Consulta: 14 enero 2021]. ISSN 03610470. DOI 10.1094/ASBCJ-2013-1008-01. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1094/ASBCJ-2013-1008-01>.

ŠTULÍKOVÁ, K., NOVÁK, J., VLČEK, J., ŠAVEL, J., KOŠIN, P. y DOSTÁLEK, P., Bottle Conditioning: Technology and Mechanisms Applied in Refermented Beers. *Beverages* [en línea], 2020. vol. 6, no. 3, pp. 56. [Consulta: 11 enero 2021]. ISSN 2306-5710. DOI 10.3390/beverages6030056. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2306-5710/6/3/56>.

UNIÓN EUROPEA. *Reglamento (UE) N° 231/2012* [en línea]. 2013. S.l.: s.n. [Consulta: 19 febrero 2021]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:02012R0231-20200702&from=EN>.

WINTERS, 2021. CATÁLOGO DE PRODUCTOS.

YAHYA, N.A., DAAS, O.M., ALBOUM, N.O.F. y KHALILE, A.H., Design of Vertical Pressure Vessel Using ASME Codes, 2018. S.l.: AIJR Publisher, pp. 653-664. DOI 10.21467/proceedings.4.33.

ANEXOS

ANEXO A: TANQUE DE CARBONATACIÓN CONSTRUÍDO



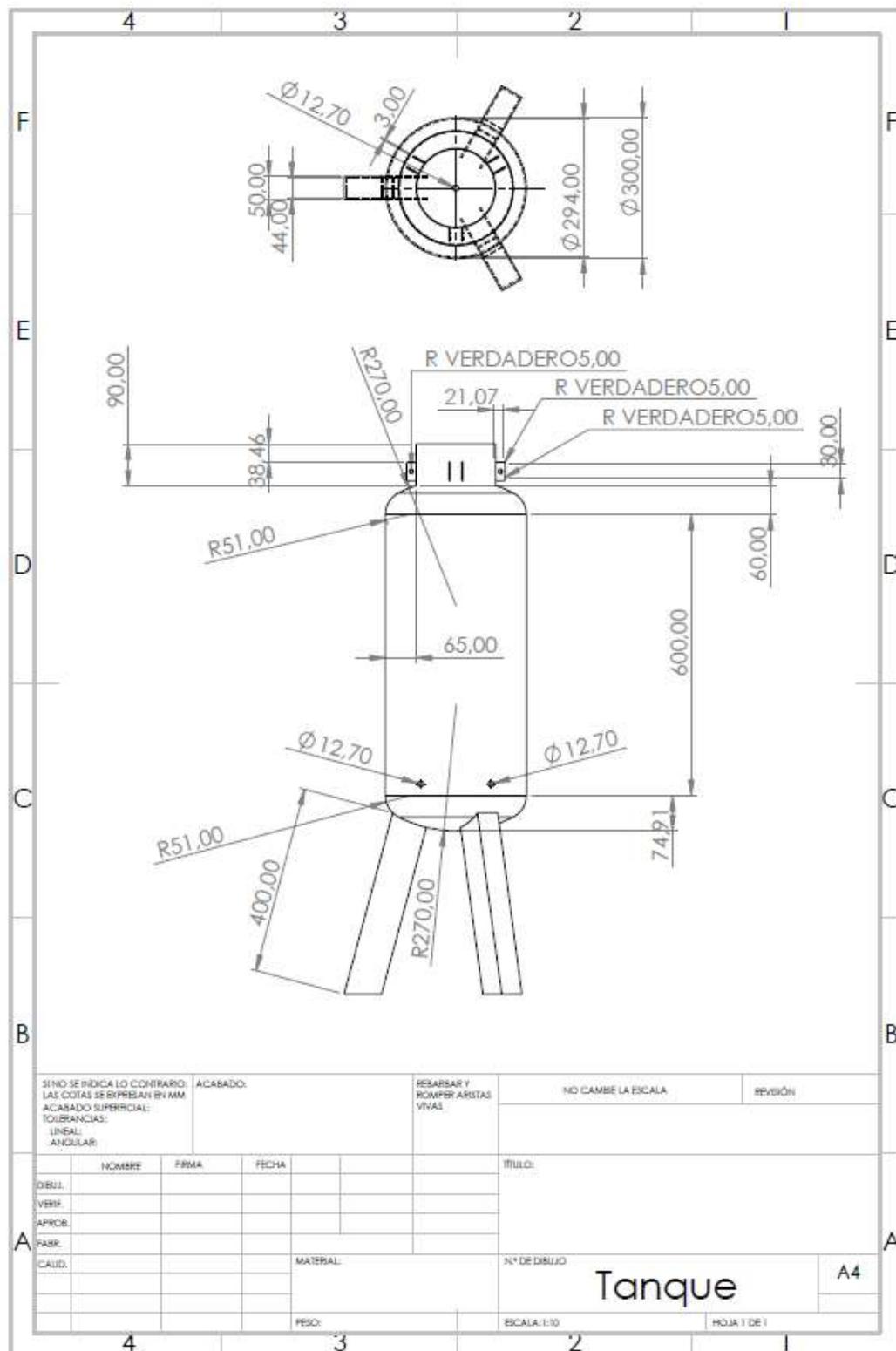
ANEXO A: CONTINUACIÓN



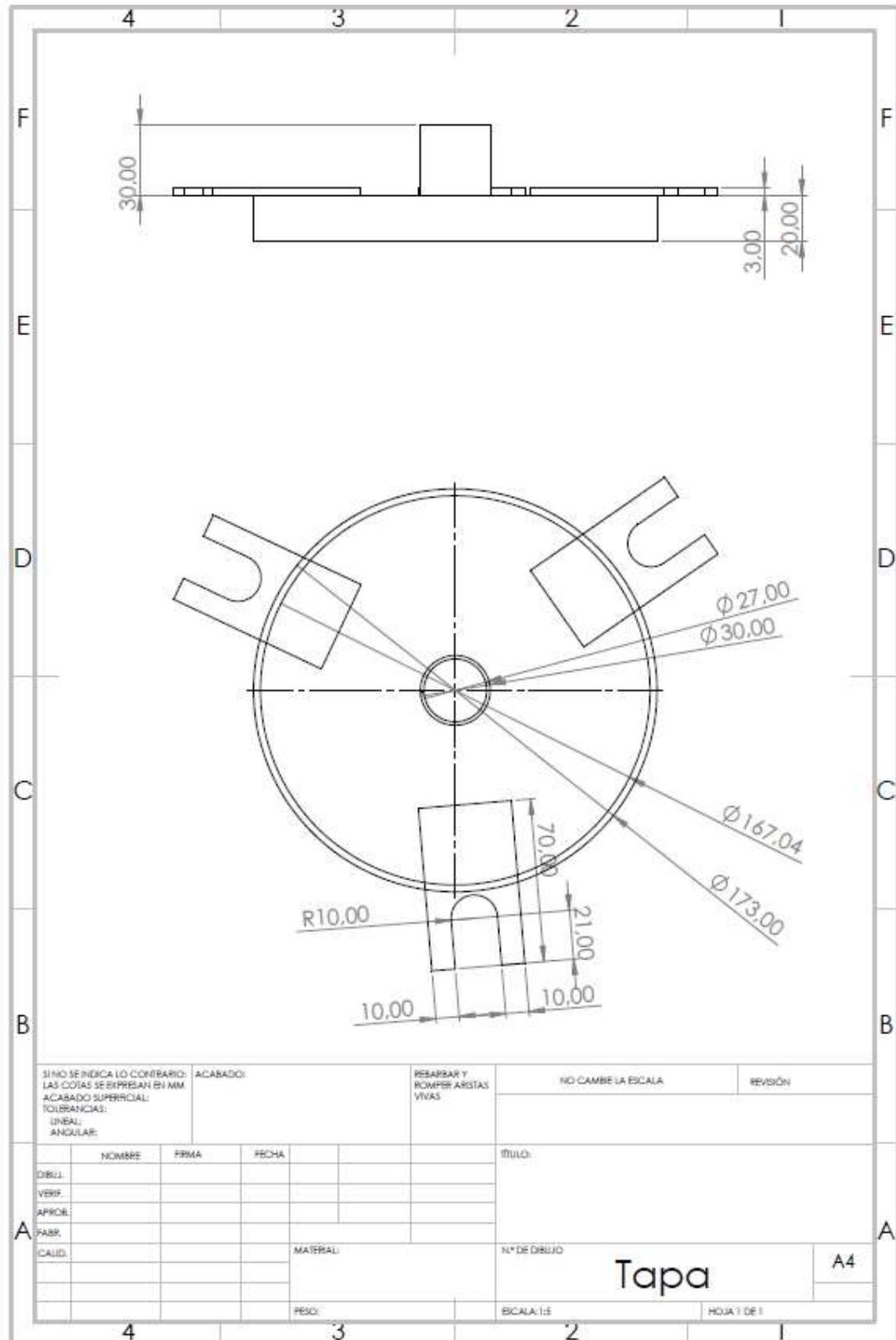
ANEXO A: CONTINUACIÓN



ANEXO B: PLANOS DEL TANQUE DE CARBONATACIÓN

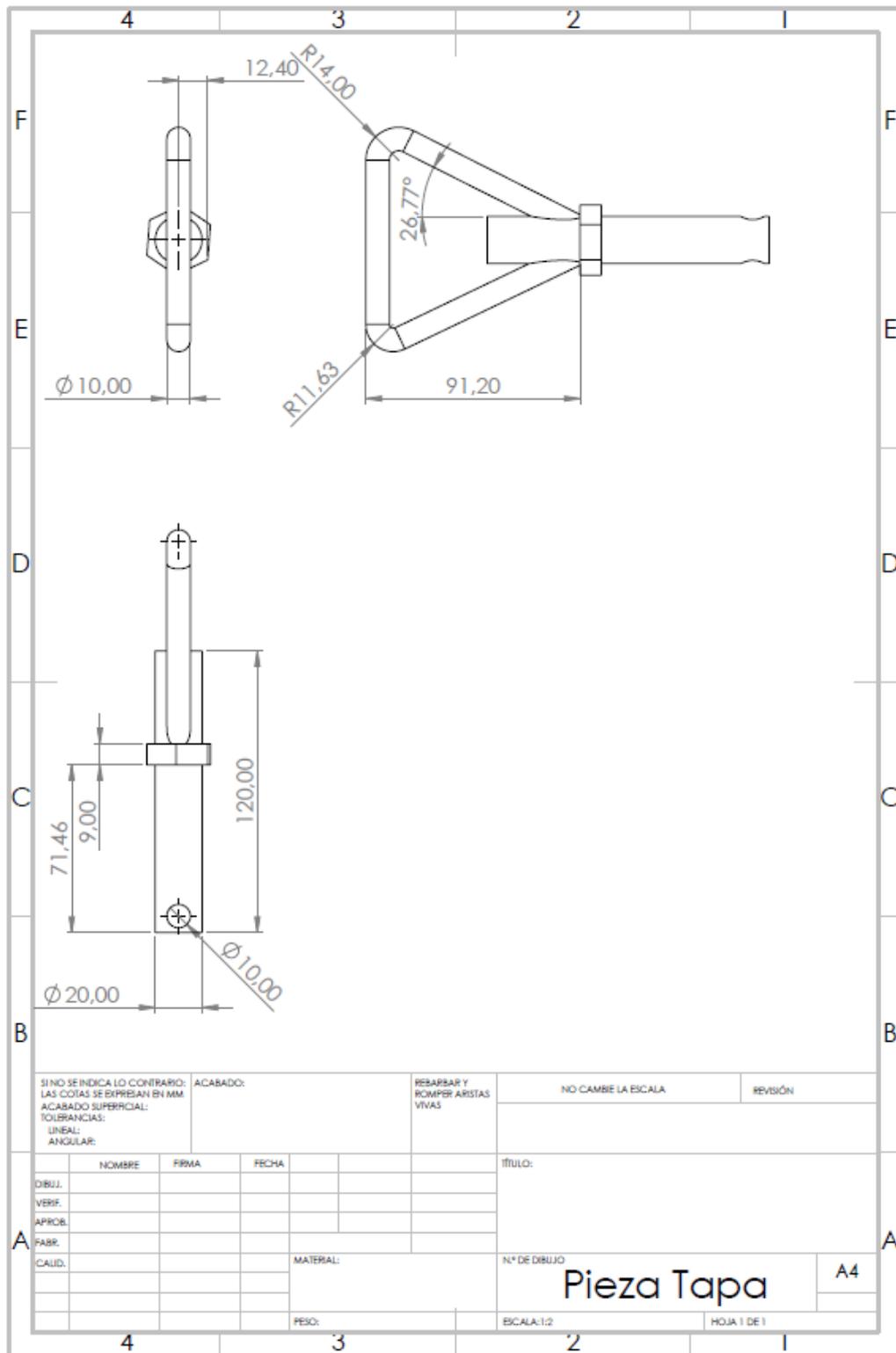


ANEXO B: CONTINUACIÓN, TAPA



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ.		VERIF.		APROB.		N.º DE DIBUJO			
FABR.		MATERIAL:		ESCALA: 1:1		Tapa		A4	
CALID.		PESO:		ESCALA: 1:1		HOJA 1 DE 1			

ANEXO B: CONTINUACIÓN, TAPA



ANEXO C: CONTINUACIÓN

→ Dióxido de Carbono Alta Pureza

2/2

Factores de conversión:	m ³ gas (1 bar y 15 °C)	litros gas licuado (en equilibrio a -56,6°C y 5,2 bar)	kg
	1		1,569
0,637		1	1,178
0,541		0,849	1

Características: El Dióxido de Carbono es un gas incoloro e inodoro, presente en la atmósfera en un 0,03% vol.

El Dióxido de Carbono se suministra licuado a temperatura ambiente bajo su presión de vapor en botellas de acero, o a baja temperatura en cisternas.

Nombre químico:	Dióxido de Carbono o Anhidrido Carbónico.	
Fórmula química:	CO ₂	
Masa molar:	44,01 g/mol	
Punto triple:	Temperatura:	216,58 K (-56,57 °C)
	Presión:	5,19 bar
	Calor latente de fusión:	196,7 kJ/kg
Punto de sublimación a 1013 mbar:	Temperatura:	194,67 K (-78,48 °C)
	Calor latente de sublimación:	573 kJ/kg
Punto crítico:	Temperatura:	304,21 K (31,06 °C)
	Presión:	73,83 bar
	Densidad:	0,466 kg/litro
Estado gaseoso (1 bar, 15 °C):	Densidad relativa al aire:	1,528
Concentración máxima admisible en ambiente de trabajo (TLV/VLA):	5.000 ppm/v	

Aplicaciones: Como gas vector para análisis de gases.
Como gas patrón o de referencia.
Estudios de inertización y refrigeración.
Nitrocarburation de aceros.
Carbonatación de líquidos.
Investigación en respiración biológica.
Cultivos anaerobios.
Técnicas en estado supercrítico.
Investigación y desarrollo.

Otras formas de suministro: - Dióxido de Carbono.
- Dióxido de Carbono 3.0/Sonda.
- Dióxido de Carbono Sonda 4.5.
- Dióxido de Carbono Líquido.
- Dióxido de Carbono Trace Pharma.
- Mezclas: LASERLINE®, BIOGON®, Carbógeno, gases de esterilización y otras.

Sujeto a modificaciones: 33768/05.20

ANEXO D: NORMA INEN NTE 2262 BEBIDAS ALCOHÓLICAS CERVEZA REQUISITOS, TABLA 1 REQUISITOS FÍSICOS Y QUÍMICOS, TABLA 2 REQUISITOS MICROBIOLÓGICOS

NTE INEN 2262

2013-11

TABLA 1. Requisitos físicos y químicos

REQUISITOS	UNIDAD	MINIMO	MAXIMO	METODO DE ENSAYO
Contenido alcohólico a 20° C	% (v/v)	1,0	10,0	NTE INEN 2322
Acidez total, expresado como ácido láctico	% (m/m)	-	0,3	NTE INEN 2323
Carbonatación	Volúmenes de CO ₂	2,2	3,5	NTE INEN 2324
pH	-	3,5	4,8	NTE INEN 2325
Contenido de hierro	mg/dm ³	-	0,2	NTE INEN 2326
Contenido de cobre	mg/dm ³	-	1,0	NTE INEN 2327
Contenido de zinc	mg/dm ³	-	1,0	NTE INEN 2328
Contenido de arsénico	mg/dm ³	-	0,1	NTE INEN 2329
Contenido de plomo	mg/dm ³	-	0,1	NTE INEN 2330

TABLA 2. Requisitos microbiológicos

REQUISITOS	UNIDAD	Cerveza pasteurizada		METODO DE ENSAYO
		MÍNIMO	MÁXIMO	
Microorganismos Anaerobios	ufc/cm ³	-	10	NTE INEN 1 529-17
Mohos y levaduras	up/cm ³	-	10	NTE INEN 1 529-10

**ANEXO E: NORMA NTE INEN 2324 BEBIDAS ALCOHÓLICAS CERVEZA DETERMINACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO
“CO2” Y AIRE, TABLA 1 CONTENIDO DE CO2 (v/v)**

TABLA 1. Contenido de CO₂ (v/v)

Presión (kg/cm ²)	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	
Temperatura (°C)																						
13,5	1,03	1,08	1,13	1,17	1,22	1,27	1,32	1,37	1,42	1,47	1,52	1,57	1,62	1,67	1,72	1,77	1,82	1,87	1,92	1,97	2,02	
14,0	1,01	1,06	1,11	1,16	1,21	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,69	1,74	1,79	1,84	1,89	1,94	1,99	
14,5	1,00	1,04	1,09	1,14	1,19	1,24	1,28	1,33	1,38	1,43	1,48	1,52	1,57	1,62	1,67	1,72	1,77	1,81	1,86	1,91	1,96	
15,0	0,98	1,03	1,08	1,12	1,17	1,22	1,26	1,31	1,36	1,41	1,45	1,50	1,55	1,60	1,64	1,69	1,74	1,79	1,83	1,88	1,93	
15,5	0,97	1,01	1,06	1,11	1,15	1,20	1,25	1,29	1,34	1,39	1,43	1,48	1,53	1,57	1,62	1,67	1,71	1,76	1,81	1,85	1,90	
16,0	0,95	1,00	1,04	1,09	1,14	1,18	1,23	1,27	1,32	1,37	1,41	1,46	1,50	1,55	1,60	1,64	1,69	1,73	1,78	1,83	1,87	
16,5	0,94	0,98	1,03	1,07	1,12	1,16	1,21	1,25	1,30	1,34	1,39	1,44	1,48	1,53	1,57	1,62	1,66	1,71	1,75	1,80	1,84	
17,0	0,92	0,97	1,01	1,06	1,10	1,15	1,19	1,24	1,28	1,43	1,37	1,41	1,46	1,50	1,55	1,59	1,64	1,68	1,73	1,77	1,82	
17,5	0,91	0,95	1,00	1,04	1,09	1,13	1,17	1,22	1,26	1,31	1,35	1,39	1,44	1,48	1,53	1,57	1,61	1,66	1,70	1,75	1,79	
18,0	0,90	0,94	0,98	1,03	1,07	1,11	1,16	1,20	1,24	1,29	1,33	1,37	1,42	1,46	1,50	1,55	1,59	1,63	1,68	1,72	1,76	
18,5	0,88	0,93	0,97	1,01	1,05	1,10	1,14	1,18	1,22	1,27	1,31	1,35	1,40	1,44	1,48	1,52	1,57	1,61	1,65	1,69	1,74	
19,0	0,87	0,91	0,95	1,00	1,04	1,08	1,12	1,16	1,21	1,25	1,29	1,33	1,38	1,42	1,46	1,50	1,54	1,59	1,63	1,67	1,71	
19,5	0,86	0,90	0,94	0,98	1,02	1,06	1,11	1,15	1,19	1,23	1,27	1,31	1,36	1,40	1,44	1,48	1,52	1,56	1,60	1,65	1,69	
20,0	0,85	0,89	0,93	0,97	1,01	1,05	1,09	1,13	1,17	1,21	1,25	1,29	1,34	1,38	1,42	1,46	1,50	1,54	1,58	1,62	1,66	
20,5	0,83	0,87	0,91	0,95	0,99	1,03	1,07	1,11	1,16	1,20	1,24	1,28	1,32	1,36	1,40	1,44	1,48	1,52	1,56	1,60	1,64	
21,0	0,82	0,86	0,90	0,94	0,98	1,02	1,06	1,10	1,14	1,18	1,22	1,26	1,30	1,34	1,38	1,42	1,46	1,50	1,54	1,58	1,62	
21,5	0,81	0,85	0,89	0,93	0,97	1,01	1,04	1,08	1,12	1,16	1,20	1,24	1,28	1,32	1,36	1,40	1,44	1,47	1,51	1,55	1,59	
22,0	0,80	0,84	0,87	0,91	0,95	0,99	1,03	1,07	1,11	1,15	1,18	1,22	1,26	1,30	1,34	1,38	1,42	1,45	1,49	1,53	1,57	
22,5	0,79	0,83	0,86	0,90	0,94	0,98	1,01	1,05	1,09	1,13	1,17	1,21	1,24	1,28	1,32	1,36	1,40	1,43	1,47	1,51	1,55	
23,0	0,78	0,81	0,85	0,89	0,93	0,96	1,00	1,04	1,08	1,11	1,15	1,19	1,23	1,26	1,30	1,34	1,38	1,41	1,45	1,49	1,53	
23,5	0,76	0,80	0,84	0,88	0,91	0,95	0,99	1,02	1,06	1,10	1,13	1,17	1,21	1,25	1,28	1,32	1,36	1,39	1,43	1,47	1,50	
24,0	0,75	0,79	0,83	0,86	0,90	0,94	0,97	1,01	1,05	1,08	1,12	1,16	1,19	1,23	2,26	2,30	1,34	1,37	1,41	1,45	1,48	
24,5	0,74	0,78	0,82	0,85	0,89	0,92	0,96	1,00	1,03	1,07	1,10	1,14	1,18	1,21	1,25	1,28	1,32	1,36	1,39	1,43	1,46	
25,0	0,73	0,77	0,80	0,84	0,88	0,91	0,95	0,98	1,02	1,05	1,09	1,12	1,16	1,19	1,23	1,27	1,30	1,34	1,37	1,41	1,44	
25,5	0,72	0,76	0,79	0,83	0,86	0,90	0,93	0,97	1,00	1,04	1,07	1,11	1,14	1,18	1,21	1,25	1,28	1,32	1,35	1,39	1,42	
26,0	0,71	0,75	0,78	0,82	0,85	0,89	0,92	0,96	0,99	1,02	1,06	1,09	1,13	1,16	1,20	1,23	1,27	1,30	1,3,30	1,37	1,40	
26,5	0,70	0,74	0,77	0,81	0,84	0,87	0,91	0,94	0,98	1,01	1,04	1,08	1,11	1,15	1,18	1,21	1,25	1,28	1,32	1,35	1,38	
27,0	0,69	0,73	0,76	0,80	0,83	0,86	0,90	0,93	0,96	1,00	1,03	1,06	1,10	1,13	1,16	1,20	1,23	1,27	1,30	1,33	1,37	
27,5	0,69	0,72	0,75	0,78	0,82	0,85	0,88	0,92	0,95	0,98	1,02	1,05	1,08	1,12	1,15	1,18	1,22	1,25	1,28	1,32	1,35	
28,0	0,68	0,71	0,74	0,77	0,81	0,84	0,87	0,91	0,94	0,97	1,01	1,04	1,07	1,10	1,13	1,17	1,20	1,23	1,26	1,30	1,33	

ANEXO E: CONTINUACIÓN

TABLA 1. Contenido de CO₂ (v/v)

Presión (kg/cm ²)	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90	0,95
Temperatura (°C)																			
-1,0	3,31	3,39	3,47	3,55	3,63	3,71	3,79	3,87	3,94	4,02	4,10	4,18	4,26	4,34	4,42	4,50	4,58	4,66	4,74
-0,5	3,25	3,33	3,41	3,49	3,57	3,64	3,72	3,80	3,88	3,96	4,03	4,11	4,19	4,27	4,35	4,42	4,50	4,58	4,66
0,0	3,20	3,28	3,35	3,43	3,50	3,58	3,66	3,74	3,81	3,89	3,97	4,04	4,12	4,20	4,27	4,35	4,43	4,50	4,58
0,5	3,14	3,22	3,30	3,37	3,45	3,52	3,60	3,67	3,75	3,82	3,90	3,97	4,05	4,13	4,20	4,28	4,35	4,43	4,50
1,0	3,09	3,17	3,24	3,31	3,39	3,46	3,54	3,61	3,69	3,76	3,83	3,91	3,98	4,06	4,13	4,21	4,28	4,35	4,43
1,5	3,04	3,11	3,19	3,26	3,33	3,41	3,48	3,55	3,62	3,70	3,77	3,84	3,92	3,99	4,06	4,13	4,21	4,28	4,35
2,0	2,99	3,06	3,13	3,21	3,28	3,35	3,42	3,49	3,56	3,64	3,71	3,78	3,85	3,92	3,99	4,07	4,14	4,21	4,28
2,5	2,94	3,01	3,08	3,15	3,22	3,29	3,36	3,43	3,50	3,58	3,65	3,72	3,79	3,86	3,93	4,00	4,07	4,14	4,21
3,0	2,89	2,96	3,03	3,10	3,17	3,24	3,31	3,38	3,45	3,52	3,59	3,66	3,72	3,79	3,86	3,93	4,00	4,07	4,14
3,5	2,84	2,91	2,98	3,05	3,12	3,19	3,25	3,32	3,39	3,46	3,53	3,60	3,66	3,73	3,80	3,87	3,94	4,00	4,07
4,0	2,80	2,86	2,93	3,00	3,07	3,13	3,20	3,27	3,33	3,40	3,47	3,54	3,60	3,67	3,74	3,80	3,87	3,94	4,01
4,5	2,75	2,82	2,88	2,95	3,02	3,08	3,15	3,21	3,28	3,35	3,41	3,48	3,54	3,61	3,68	3,74	3,81	3,88	3,94
5,0	2,71	2,77	2,84	2,90	2,97	3,03	3,10	3,16	3,23	3,29	3,36	3,42	3,49	3,55	3,62	3,68	3,75	3,81	3,88
5,5	2,66	2,73	2,79	2,86	2,92	2,98	3,05	3,11	3,17	3,24	3,30	3,37	3,43	3,49	3,56	3,62	3,69	3,75	3,81
6,0	2,62	2,68	2,75	2,81	2,87	2,94	3,00	3,06	3,12	3,19	3,25	3,31	3,38	3,44	3,50	3,56	3,63	3,69	3,75
6,5	2,58	2,64	2,70	2,76	2,83	2,89	2,95	3,01	3,07	3,14	3,20	3,26	3,32	3,38	3,44	3,51	3,57	3,63	3,69
7,0	2,54	2,60	2,66	2,72	2,78	2,84	2,90	2,96	3,02	3,09	3,15	3,21	3,27	3,33	3,39	3,45	3,51	3,57	3,63
7,5	2,50	2,56	2,62	2,68	2,74	2,80	2,86	2,92	2,98	3,04	3,10	3,16	3,22	3,28	3,34	3,40	3,46	3,52	3,58
8,0	2,46	2,52	2,58	2,63	2,69	2,75	2,81	2,87	2,93	2,99	3,05	3,11	3,16	3,22	3,28	3,34	3,40	3,46	3,52
8,5	2,42	2,48	2,53	2,59	2,65	2,71	2,77	2,82	2,88	2,94	3,00	3,06	3,11	3,17	3,23	3,29	3,35	3,40	3,46
9,0	2,38	2,44	2,49	2,55	2,61	2,67	2,72	2,78	2,84	2,89	2,95	3,01	3,07	3,01	3,18	3,24	3,29	3,35	3,41
9,5	2,34	2,40	2,46	2,51	2,57	2,62	2,68	2,74	2,79	2,85	2,90	2,96	3,02	3,07	3,13	3,19	3,24	3,30	3,35
10,0	2,31	2,36	2,42	2,47	2,53	2,58	2,64	2,69	2,75	2,80	2,86	2,91	2,97	3,03	3,08	3,14	3,19	3,25	3,30
10,5	2,27	2,32	2,38	2,43	2,49	2,54	2,60	2,65	2,71	2,76	2,81	2,87	2,92	2,98	3,03	3,09	3,14	3,20	3,25
11,0	2,23	2,29	2,34	2,40	2,45	2,50	2,56	2,61	2,66	2,72	2,77	2,82	2,88	2,93	2,99	3,04	3,09	3,15	3,20
11,5	2,20	2,25	2,31	2,36	2,41	2,46	2,52	2,57	2,62	2,68	2,73	2,78	2,83	2,89	2,94	2,99	3,05	3,10	3,15
12,0	2,17	2,22	2,27	2,32	2,37	2,43	2,48	2,53	2,58	2,63	2,69	2,74	2,79	2,84	2,89	2,95	3,00	3,05	3,10
12,5	2,13	2,18	2,24	2,29	2,34	2,39	2,44	2,49	2,54	2,59	2,65	2,70	2,75	2,80	2,85	2,90	2,95	3,00	3,05
13,0	2,10	2,15	2,20	2,25	2,30	2,35	2,40	2,45	2,50	2,55	2,60	2,65	2,71	2,76	2,81	2,86	2,91	2,96	3,01

ANEXO E: CONTINUACIÓN

TABLA 1. Contenido de CO₂ (v/v)

Presión (kg/cm ²)	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90	0,95	
Temperatura (°C)																				
13,5	2,07	2,12	2,17	2,22	2,27	2,32	2,37	2,42	2,47	2,52	2,56	2,61	2,66	2,71	2,76	2,81	2,86	2,91	2,96	
14,0	2,04	2,09	2,13	2,18	2,23	2,28	2,33	2,38	2,43	2,48	2,53	2,57	2,62	2,67	2,72	2,77	2,82	2,87	2,92	
14,5	2,01	2,05	2,10	2,15	2,20	2,25	2,30	2,34	2,39	2,44	2,49	2,54	2,58	2,63	2,68	2,73	2,78	2,82	2,87	
15,0	1,98	2,02	2,07	2,12	2,17	2,21	2,26	2,31	2,36	2,40	2,45	2,50	2,55	2,59	2,64	2,69	2,73	2,78	2,83	
15,5	1,95	1,99	2,04	2,09	2,13	2,18	2,23	2,27	2,32	2,37	2,41	2,46	2,51	2,55	2,60	2,65	2,69	2,74	2,79	
16,0	1,92	1,96	2,01	2,06	2,10	2,15	2,19	2,24	2,29	2,33	2,38	2,42	2,47	2,52	2,56	2,61	2,65	2,70	2,75	
16,5	1,89	1,93	1,98	2,02	2,07	2,12	2,16	2,21	2,25	2,30	2,34	2,39	2,43	2,48	2,52	2,57	2,61	2,67	2,70	
17,0	1,86	1,89	1,95	1,99	2,04	2,08	2,13	2,17	2,22	2,26	2,31	2,35	2,40	2,44	2,49	2,53	2,58	2,62	2,66	
17,5	1,83	1,88	1,92	1,97	2,01	2,05	2,10	2,14	2,19	2,23	2,27	2,32	2,36	2,41	2,45	2,49	2,54	2,58	2,63	
18,0	1,81	1,85	1,89	1,94	1,98	2,02	2,07	2,11	2,15	2,20	2,24	2,28	2,33	2,37	2,41	2,46	2,50	2,54	2,59	
18,5	1,80	1,82	1,87	1,91	1,95	1,99	2,04	2,08	2,12	2,16	2,21	2,25	2,29	2,34	2,38	2,42	2,46	2,51	2,55	
19,0	1,75	1,80	1,84	1,88	1,92	1,96	2,01	2,05	2,09	2,13	2,18	2,22	2,26	2,30	2,34	2,39	2,43	2,47	2,51	
19,5	1,73	1,77	1,81	1,85	1,89	1,94	1,98	2,02	2,06	2,10	2,14	2,18	2,23	2,27	2,31	2,35	2,39	2,43	2,48	
20,0	1,70	1,74	1,79	1,83	1,87	1,91	1,95	1,99	2,03	2,07	2,11	2,15	2,19	2,24	2,28	2,32	2,36	2,40	2,44	
20,5	1,68	1,72	1,76	1,80	1,84	1,88	1,92	1,96	2,00	2,04	2,08	2,12	2,16	2,20	2,24	2,28	2,32	2,36	2,40	
21,0	1,66	1,69	1,73	1,77	1,81	1,85	1,89	1,93	1,97	2,01	2,05	2,09	2,13	2,17	2,21	2,25	2,29	2,33	2,37	
21,5	1,63	1,67	1,71	1,75	1,79	1,83	1,87	1,91	1,94	1,98	2,02	2,06	2,10	2,14	2,18	2,22	2,26	2,30	2,34	
22,0	1,61	1,65	1,69	1,72	1,76	1,80	1,84	1,88	1,92	1,96	1,99	2,03	2,07	2,11	2,15	2,19	2,23	2,26	2,30	
22,5	1,59	1,62	1,66	1,70	1,74	1,78	1,81	1,85	1,89	1,93	1,97	2,00	2,04	2,08	2,12	2,16	2,19	2,23	2,27	
23,0	1,56	1,60	1,64	1,68	1,71	1,75	1,79	1,83	1,86	1,90	1,94	1,98	2,01	2,05	2,09	2,13	2,16	2,20	2,24	
23,5	1,54	1,58	1,62	1,65	1,69	1,73	1,76	1,80	1,84	1,87	1,91	1,95	1,99	2,02	2,06	2,10	2,13	2,17	2,21	
24,0	1,52	1,56	1,59	1,63	1,67	1,70	1,74	1,78	1,81	1,85	1,88	1,92	1,96	1,99	2,03	2,07	2,10	2,14	2,18	
24,5	1,50	1,53	1,57	1,61	1,64	1,68	1,71	1,75	1,79	1,82	1,86	1,89	1,93	1,97	2,00	2,03	2,07	2,11	2,15	
25,0	1,48	1,51	1,55	1,58	1,62	1,66	1,69	1,73	1,76	1,80	1,83	1,87	1,90	1,94	1,98	2,01	2,05	2,08	2,12	
25,5	1,46	1,49	1,53	1,56	1,60	1,63	1,67	1,70	1,74	1,77	1,81	1,84	1,88	1,91	1,95	1,98	2,02	2,05	2,09	
26,0	1,44	1,47	1,51	1,54	1,58	1,61	1,65	1,68	1,71	1,75	1,78	1,82	1,85	1,89	1,92	1,96	1,99	2,03	2,06	
26,5	1,42	1,45	1,49	1,52	1,56	1,59	1,62	1,66	1,69	1,73	1,76	1,79	1,83	1,86	1,90	1,93	1,96	2,00	2,03	
27,0	1,40	1,43	1,47	1,50	1,53	1,57	1,60	1,64	1,67	1,70	1,74	1,77	1,80	1,84	1,87	1,90	1,94	1,97	2,00	
27,5	1,38	1,41	1,45	1,48	1,51	1,55	1,58	1,61	1,65	1,68	1,71	1,75	1,78	1,81	1,85	1,88	1,91	1,94	1,98	
28,0	1,36	1,40	1,43	1,46	1,49	1,53	1,56	1,59	1,62	1,66	1,69	1,72	1,76	1,79	1,82	1,85	1,89	1,92	1,95	

ANEXO E: CONTINUACIÓN

TABLA 1. Contenido de CO₂ (v/v)

Presión (kg/cm ²)	2,00	2,05	2,10	2,15	2,20	2,25	2,30	2,35	2,40	2,45	2,50	2,55	2,60	2,65	2,70	2,75	2,80	2,85	2,90	
Temperatura (°C)																				
-1,0	4,82	4,90	4,98	5,06	5,14	5,22	5,29	5,37	5,45	5,53	5,61	5,69	5,77	5,85	5,93	6,01	6,09	6,17	6,25	
-0,5	4,74	4,81	4,89	4,97	5,05	5,13	5,21	5,28	5,36	5,44	5,52	5,60	5,67	5,75	5,83	5,91	5,99	6,06	6,14	
0,0	4,66	4,73	4,81	4,89	4,96	5,04	5,12	5,19	5,27	5,35	5,42	5,50	5,58	5,65	5,73	5,81	5,88	5,96	6,04	
0,5	4,58	4,65	4,73	4,80	4,88	4,96	5,03	5,11	5,18	5,26	5,33	5,41	5,48	5,56	5,64	5,71	5,79	5,86	5,94	
1,0	4,50	4,58	4,65	4,72	4,80	4,87	4,95	5,02	5,10	5,17	5,24	5,32	5,39	5,47	5,54	5,62	5,69	5,76	5,84	
1,5	4,43	4,50	4,57	4,65	4,72	4,79	4,86	4,94	5,01	5,08	5,16	5,23	5,30	5,38	5,45	5,52	5,59	5,67	5,74	
2,0	4,35	4,43	4,50	4,57	4,64	4,71	4,78	4,86	4,93	5,00	5,07	5,14	5,21	5,29	5,36	5,43	5,50	5,57	5,64	
2,5	4,28	4,35	4,42	4,49	4,56	4,63	4,70	4,78	4,85	4,92	4,99	5,06	5,13	5,20	5,27	5,34	5,41	5,48	5,55	
3,0	4,21	4,28	4,35	4,42	4,49	4,56	4,63	4,70	4,77	4,84	4,90	4,97	5,04	5,11	5,18	5,25	5,32	5,39	5,46	
3,5	4,14	4,21	4,28	4,35	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69	4,76	4,82	4,89	4,96	5,03	5,10	5,17	5,23	5,30	5,37	
4,0	4,07	4,14	4,21	4,28	4,34	4,41	4,48	4,54	4,61	4,68	4,75	4,81	4,88	4,95	5,01	5,08	5,15	5,22	5,28	
4,5	4,01	4,07	4,14	4,21	4,27	4,34	4,40	4,47	4,54	4,60	4,67	4,73	4,80	4,87	4,93	5,00	5,06	5,13	5,20	
5,0	3,94	4,01	4,07	4,14	4,20	4,27	4,33	4,40	4,46	4,53	4,59	4,66	4,72	4,79	4,85	4,92	4,98	5,05	5,11	
5,5	3,88	3,94	4,01	4,07	4,13	4,20	4,26	4,33	4,39	4,45	4,52	4,58	4,65	4,71	4,77	4,84	4,90	4,96	5,03	
6,0	3,82	3,88	3,94	4,00	4,07	4,13	4,19	4,26	4,32	4,38	4,44	4,51	4,57	4,63	4,70	4,76	4,82	4,88	4,95	
6,5	3,75	3,82	3,88	3,94	4,00	4,06	4,13	4,19	4,25	4,31	4,37	4,43	4,50	4,56	4,62	4,68	4,74	4,81	4,87	
7,0	3,69	3,76	3,82	3,88	3,94	4,00	4,06	4,12	4,18	4,24	4,30	4,36	4,42	4,49	4,55	4,61	4,67	4,73	4,79	
7,5	3,64	3,70	3,76	3,81	3,87	3,93	3,99	4,05	4,11	4,17	4,23	4,29	4,35	4,41	4,47	4,53	4,59	4,65	4,71	
8,0	3,58	3,64	3,70	3,75	3,81	3,87	3,93	3,99	4,05	4,11	4,17	4,23	4,29	4,34	4,40	4,46	4,52	4,58	4,64	
8,5	3,52	3,58	3,64	3,69	3,75	3,81	3,87	3,93	3,99	4,04	4,10	4,16	4,22	4,28	4,33	4,39	4,45	4,51	4,57	
9,0	3,47	3,52	3,58	3,64	3,69	3,75	3,81	3,87	3,92	3,98	4,04	4,09	4,15	4,21	4,26	4,32	4,38	4,44	4,49	
9,5	3,41	3,47	3,52	3,58	3,64	3,69	3,75	3,80	3,86	3,92	3,97	4,03	4,09	4,14	4,20	4,25	4,31	4,37	4,42	
10,0	3,36	3,41	3,47	3,52	3,58	3,63	3,69	3,74	3,80	3,86	3,91	3,97	4,02	4,08	4,13	4,19	4,24	4,30	4,35	
10,5	3,31	3,36	3,41	3,47	3,52	3,58	3,63	3,69	3,74	3,80	3,85	3,90	3,96	4,01	4,07	4,12	4,18	4,23	4,29	
11,0	3,25	3,31	3,36	3,41	3,47	3,52	3,58	3,63	3,68	3,74	3,79	3,84	3,90	3,95	4,00	4,06	4,11	4,17	4,22	
11,5	3,20	3,26	3,31	3,36	3,41	3,47	3,52	3,57	3,63	3,68	3,73	3,78	3,84	3,89	3,94	4,00	4,05	4,10	4,15	
12,0	3,15	3,21	3,26	3,31	3,36	3,41	3,47	3,52	3,57	3,62	3,67	3,73	3,78	3,83	3,88	3,93	3,99	4,04	4,09	
12,5	3,11	3,16	3,21	3,26	3,31	3,36	3,41	3,46	3,52	3,57	3,62	3,67	3,72	3,77	3,82	3,87	3,92	3,98	4,03	
13,0	3,06	3,11	3,16	3,21	3,26	3,31	3,36	3,41	3,46	3,51	3,56	3,61	3,66	3,71	3,76	3,81	3,86	3,92	3,97	

ANEXO E: CONTINUACIÓN

TABLA 1. Contenido de CO₂ (v/v)

Presión (kg/cm ²)	2,00	2,05	2,10	2,15	2,20	2,25	2,30	2,35	2,40	2,45	2,50	2,55	2,60	2,65	2,70	2,75	2,80	2,85	2,90	
Temperatura (°C)																				
13,5	3,01	3,06	3,11	3,16	3,21	3,26	3,31	3,36	3,41	3,46	3,51	3,56	3,61	3,66	3,71	3,76	3,81	3,86	3,91	
14,0	2,97	3,01	3,06	3,11	3,16	3,21	3,26	3,31	3,36	3,41	3,45	3,50	3,55	3,60	3,65	3,70	3,75	3,80	3,85	
14,5	2,92	2,97	3,02	3,07	3,11	3,16	3,21	3,26	3,31	3,35	3,40	3,45	3,50	3,55	3,60	3,64	3,69	3,74	3,79	
15,0	2,88	2,92	2,97	3,02	3,07	3,11	3,16	3,21	3,26	3,30	3,35	3,40	3,45	3,49	3,54	3,59	3,64	3,68	3,73	
15,5	2,83	2,88	2,93	2,97	3,02	3,07	3,11	3,16	3,21	3,25	3,30	3,35	3,39	3,44	3,49	3,53	3,58	3,63	3,67	
16,0	2,79	2,84	2,88	2,93	2,98	3,02	3,07	3,11	3,16	3,21	3,25	3,30	3,34	3,39	3,44	3,48	3,53	3,57	3,62	
16,5	2,75	2,80	2,84	2,89	2,93	2,98	3,02	3,07	3,11	3,16	3,20	3,25	3,29	3,34	3,38	3,43	3,48	3,52	3,57	
17,0	2,71	2,75	2,80	2,84	2,89	2,93	2,98	3,02	3,07	3,11	3,16	3,20	3,25	3,29	3,33	3,38	3,42	3,47	3,51	
17,5	2,67	2,71	2,76	2,80	2,85	2,89	2,93	2,98	3,02	3,07	3,11	3,15	3,20	3,24	3,29	3,33	3,37	3,42	3,46	
18,0	2,63	2,67	2,72	2,76	2,80	2,85	2,89	2,93	2,98	3,02	3,06	3,11	3,15	3,19	3,24	3,28	3,32	3,37	3,41	
18,5	2,59	2,63	2,68	2,72	2,76	2,81	2,85	2,89	2,93	2,98	3,02	3,06	3,10	3,15	3,19	3,23	3,28	3,32	3,36	
19,0	2,55	2,60	2,64	2,68	2,72	2,76	2,81	2,85	2,89	2,93	2,97	3,02	3,06	3,10	3,14	3,19	3,23	3,27	3,31	
19,5	2,52	2,56	2,60	2,64	2,68	2,72	2,77	2,81	2,85	2,89	2,93	2,97	3,01	3,06	3,10	3,14	3,18	3,22	3,26	
20,0	2,48	2,52	2,56	2,60	2,64	2,68	2,73	2,77	2,81	2,85	2,89	2,93	2,97	3,01	3,05	3,09	3,13	3,18	3,22	
20,5	2,44	2,49	2,53	2,57	2,61	2,65	2,69	2,73	2,77	2,81	2,85	2,89	2,93	2,97	3,01	3,05	3,09	3,13	3,17	
21,0	2,41	2,45	2,49	2,53	2,57	2,61	2,65	2,69	2,73	2,77	2,81	2,85	2,89	2,93	2,97	3,01	3,05	3,09	3,12	
21,5	2,38	3,41	3,45	3,49	3,53	3,57	3,61	3,65	3,69	3,73	3,77	3,81	3,85	3,88	3,92	3,96	4,00	4,04	4,08	
22,0	2,34	2,38	2,42	2,46	2,50	2,53	2,57	2,61	2,65	2,69	2,73	2,77	2,80	2,84	2,88	2,92	2,96	3,00	3,04	
22,5	2,31	2,35	2,38	2,42	2,46	2,50	2,54	2,57	2,61	2,65	2,69	2,73	2,77	2,80	2,84	2,88	2,92	2,96	2,99	
23,0	2,28	2,31	2,35	2,39	2,43	2,46	2,50	2,54	2,58	2,61	2,65	2,69	2,73	2,76	2,80	2,84	2,88	2,91	2,95	
23,5	2,24	2,28	2,32	2,36	2,39	2,43	2,47	2,50	2,54	2,58	2,61	0,27	2,69	2,73	2,76	2,80	2,84	2,87	2,91	
24,0	2,21	2,25	2,29	2,32	2,36	2,40	2,43	2,47	2,50	2,54	2,58	2,61	2,65	2,69	2,72	2,76	2,80	2,83	2,87	
24,5	2,18	2,22	2,25	2,29	2,33	2,36	2,40	2,43	2,47	2,51	2,54	2,58	2,61	2,65	2,69	2,72	2,76	2,79	2,83	
25,0	2,15	2,19	2,22	2,26	2,29	2,33	2,37	2,40	2,44	2,47	2,51	2,54	2,58	2,61	2,65	2,68	2,72	2,76	2,79	
25,5	2,12	2,16	2,19	2,23	2,26	2,30	2,33	2,37	2,40	2,44	2,47	2,51	2,54	2,58	2,61	2,65	2,68	2,72	2,75	
26,0	2,09	2,13	2,16	2,20	2,23	2,27	2,30	2,34	2,37	2,40	2,44	2,47	2,51	2,54	2,58	2,61	2,65	2,68	2,72	
26,5	2,07	2,10	2,13	2,17	2,20	2,24	2,27	2,30	2,34	2,37	2,41	2,44	2,47	2,51	2,54	2,58	2,61	2,64	2,68	
27,0	2,04	2,07	2,11	2,14	2,17	2,21	2,24	2,27	2,31	2,34	2,37	2,41	0,24	2,48	2,51	2,54	2,58	2,61	2,64	
27,5	2,01	2,04	2,08	2,11	2,14	2,18	2,21	2,24	2,28	2,31	2,34	2,38	2,41	2,44	2,48	2,51	2,54	2,57	2,61	
28,0	1,98	2,02	2,05	2,08	2,12	2,15	2,18	2,21	2,25	2,28	2,31	2,34	2,38	2,41	2,44	2,48	2,51	2,54	2,57	

ANEXO E: CONTINUACIÓN

TABLA 1. Contenido de CO₂ (v/v)

Presión (kg/cm ²)	2,95	3,00	3,05	3,10	3,15	3,20	3,25	3,30	3,35	3,40	3,45	3,50	3,55	3,60	3,65	3,70	3,75	3,80	3,85	3,90	3,95	
Temperatura (°C)																						
-1,0	6,33	6,41	6,49	6,57	6,64	6,72	6,80	6,88	6,96	7,04	7,12	7,20	7,28	7,36	7,44	7,52	7,60	7,68	7,76	7,84	7,92	
-0,5	6,22	6,30	6,38	6,45	6,53	6,61	6,69	6,77	6,84	6,92	7,00	7,08	7,16	7,23	7,31	7,39	7,47	7,55	7,63	7,70	7,78	
0,0	6,12	6,19	6,27	6,35	6,42	6,50	6,58	6,65	6,73	6,81	6,88	6,96	7,04	7,11	7,19	7,27	7,34	7,42	7,50	7,57	7,65	
0,5	6,01	6,09	6,16	6,24	6,31	6,39	6,47	6,54	6,62	6,69	6,77	6,84	6,92	6,99	7,07	7,14	7,22	7,30	7,37	7,45	7,52	
1,0	5,91	5,99	6,06	6,13	6,21	6,28	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,88	6,95	7,02	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	
1,5	5,81	5,89	5,96	6,03	6,11	6,18	6,25	6,32	6,40	6,47	6,54	6,62	6,69	6,76	6,83	6,91	6,98	7,05	7,13	7,20	7,27	
2,0	5,72	5,79	5,86	5,93	6,00	6,08	6,15	6,22	6,29	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,72	6,79	6,86	6,94	7,01	7,08	7,15	
2,5	5,62	5,69	5,76	5,83	5,90	5,97	6,05	6,12	6,19	6,26	6,33	6,40	6,47	6,54	6,61	6,68	6,75	6,82	6,89	6,96	7,03	
3,0	5,53	5,60	5,67	5,74	5,81	5,88	5,95	6,02	6,08	6,15	6,22	6,29	6,36	6,43	6,50	6,57	6,64	6,71	6,78	6,85	6,92	
3,5	5,44	5,51	5,57	5,64	5,71	5,78	5,85	5,92	5,98	6,05	6,12	6,19	6,26	6,33	6,39	6,46	6,53	6,60	6,67	6,74	6,80	
4,0	5,35	5,42	5,48	5,55	5,62	5,69	5,75	5,82	5,89	5,95	6,02	6,09	6,16	6,22	6,29	6,36	6,42	6,49	6,56	6,63	6,69	
4,5	5,26	5,33	5,39	5,46	5,53	5,59	5,66	5,72	5,79	5,86	5,92	5,99	6,05	6,12	6,19	6,25	6,32	6,38	6,45	6,52	6,58	
5,0	5,18	5,24	5,31	5,37	5,44	5,50	5,57	5,63	5,70	5,76	5,83	5,89	5,96	6,02	6,09	6,15	6,22	6,28	6,35	6,41	6,48	
5,5	5,09	5,16	5,22	5,28	5,35	5,41	5,48	5,54	5,60	5,67	5,73	5,80	5,86	8,92	5,99	6,05	6,12	6,18	6,24	6,31	6,37	
6,0	5,01	5,07	5,14	5,20	5,26	5,32	5,38	5,45	5,51	5,58	5,64	5,70	5,77	5,83	5,89	5,95	6,02	6,08	6,14	6,21	6,27	
6,5	4,93	4,99	5,05	5,12	5,18	5,24	5,30	5,36	5,43	5,49	5,55	5,61	5,67	5,73	5,80	5,86	5,92	5,98	6,04	6,11	6,17	
7,0	4,85	4,91	4,97	5,03	5,09	5,16	5,22	5,28	5,34	5,40	5,46	5,52	5,58	5,64	5,70	5,76	5,83	5,89	5,95	6,01	6,07	
7,5	4,77	4,83	4,89	4,95	5,01	5,07	5,13	5,19	5,25	5,31	5,37	5,43	5,49	5,55	5,61	5,67	5,73	5,79	5,85	5,91	5,97	
8,0	4,70	4,76	4,82	4,88	4,93	4,99	5,05	5,11	5,17	5,23	5,29	5,35	5,41	5,46	5,52	5,58	5,64	5,70	5,76	5,82	5,88	
8,5	4,62	4,68	4,74	4,80	4,86	4,91	4,97	5,03	5,09	5,15	5,20	5,26	5,32	5,38	5,44	5,49	5,55	5,61	5,67	5,73	5,78	
9,0	4,55	4,61	4,66	4,72	4,78	4,84	4,89	4,95	5,01	5,06	5,12	5,18	5,24	5,29	5,35	5,41	5,46	5,52	5,58	5,64	5,69	
9,5	4,48	4,54	4,59	4,65	4,70	4,76	4,82	4,87	4,93	4,99	5,04	5,10	5,15	5,21	5,27	5,32	5,38	5,43	5,49	5,55	5,60	
10,0	4,41	4,46	4,52	4,58	4,63	4,69	4,74	4,80	4,85	4,91	4,96	5,02	5,07	5,13	5,18	5,24	5,29	5,35	5,41	5,46	5,52	
10,5	4,34	4,39	4,45	4,50	4,56	4,61	4,67	4,72	4,78	4,83	4,89	4,94	4,99	5,05	5,10	5,16	5,21	5,27	5,32	5,38	5,43	
11,0	4,27	4,33	4,38	4,43	4,49	4,54	4,59	4,65	4,70	4,76	4,81	4,86	4,92	4,97	5,02	5,08	5,13	5,18	5,24	5,29	5,35	
11,5	4,21	4,26	4,31	4,37	4,42	4,47	4,52	4,58	4,63	4,68	4,73	4,79	4,84	4,89	4,95	5,00	5,05	5,10	5,16	5,21	5,26	
12,0	4,14	4,19	4,25	4,30	4,35	4,40	4,45	4,51	4,56	4,61	4,66	4,71	4,77	4,82	4,87	4,92	4,97	5,03	5,08	5,13	5,18	
12,5	4,08	4,13	4,18	4,23	4,28	4,33	4,39	4,44	4,49	4,54	4,59	4,64	4,69	4,74	4,80	4,85	4,90	4,95	5,00	5,05	5,10	
13,0	4,02	4,07	4,12	4,17	4,22	4,27	4,32	4,37	4,42	4,47	4,52	4,57	4,62	4,67	4,72	4,77	4,82	4,87	4,92	4,97	5,02	

ANEXO E: CONTINUACIÓN

TABLA 1. Contenido de CO₂ (v/v)

Presión (kg/cm ²)	2,95	3,00	3,05	3,10	3,15	3,20	3,25	3,30	3,35	3,40	3,45	3,50	3,55	3,60	3,65	3,70	3,75	3,80	3,85	3,90	3,95
Temperatura (°C)																					
13,5	3,95	4,00	4,05	4,10	4,15	4,20	4,25	4,30	4,35	4,40	4,45	4,50	4,55	4,60	4,65	4,70	4,75	4,80	4,85	4,90	4,95
14,0	3,89	3,94	3,99	4,04	4,09	4,14	4,19	4,24	4,29	4,34	4,38	4,43	4,48	4,53	4,58	4,63	4,68	4,73	4,77	4,82	4,87
14,5	3,84	3,88	3,93	3,98	4,03	4,08	4,12	4,17	4,22	4,27	4,32	4,37	4,41	4,46	4,51	4,56	4,61	4,65	4,70	4,75	4,80
15,0	3,78	3,83	3,87	3,92	3,97	4,02	4,06	4,11	4,16	4,21	4,25	4,30	4,35	4,39	4,44	4,49	4,54	4,58	4,63	4,68	4,73
15,5	3,72	3,77	3,82	3,86	3,91	3,96	4,00	4,05	4,10	4,14	4,19	4,24	4,28	4,33	4,38	4,42	4,47	4,52	4,56	4,61	4,66
16,0	3,67	3,71	3,76	3,80	3,85	3,90	3,94	3,99	4,03	4,08	4,13	4,17	4,22	4,26	4,31	4,36	4,40	4,45	4,49	4,54	4,59
16,5	3,61	3,66	3,70	3,75	3,79	3,84	3,88	3,93	3,97	4,02	4,06	4,11	4,16	4,20	4,25	4,29	4,34	4,38	4,43	4,47	4,52
17,0	3,56	3,60	3,65	3,69	3,74	3,78	3,83	3,87	3,92	3,96	4,00	4,05	4,09	4,14	4,18	4,23	4,27	4,32	4,36	4,41	4,45
17,5	3,51	3,55	3,59	3,64	3,68	3,73	3,77	3,81	3,86	3,90	3,95	3,99	4,03	4,08	4,12	4,17	4,21	4,25	4,30	4,34	4,39
18,0	3,45	3,50	3,54	3,58	3,63	3,67	3,71	3,76	3,80	3,84	3,89	3,93	3,97	4,02	4,06	4,10	4,15	4,19	4,23	4,28	4,32
18,5	3,40	3,45	3,49	3,53	3,59	3,62	3,66	3,70	3,75	3,79	3,83	3,87	3,92	3,96	4,00	4,04	4,09	4,13	4,17	4,22	4,26
19,0	3,35	3,40	3,44	3,48	3,52	3,56	3,61	3,65	3,69	3,73	3,77	3,82	3,86	3,90	3,94	3,99	4,03	4,07	4,11	4,15	4,20
19,5	3,31	3,35	3,39	3,43	3,47	3,51	3,55	3,60	3,64	3,68	3,72	3,76	3,80	3,84	3,89	3,93	3,97	4,01	4,05	4,09	4,13
20,0	3,26	3,30	3,34	3,38	3,42	3,46	3,50	3,54	3,58	3,63	3,67	3,71	3,75	3,79	3,83	3,87	3,91	3,95	3,99	4,03	4,08
20,5	3,21	3,25	3,29	3,33	3,37	3,41	3,45	3,49	3,53	3,57	3,61	3,65	3,69	3,73	3,77	3,81	3,86	3,90	3,94	3,98	4,02
21,0	3,16	3,20	3,24	3,28	3,32	3,36	3,40	3,44	3,48	3,52	3,56	3,60	3,64	3,68	3,72	3,76	3,80	3,84	3,88	3,92	3,96
21,5	4,12	4,16	4,20	4,24	4,28	4,32	4,35	4,39	4,43	4,47	4,51	4,55	4,59	4,63	4,67	4,71	4,75	4,78	4,82	4,86	4,90
22,0	3,08	3,11	3,15	3,19	3,23	3,27	3,31	3,35	3,38	3,42	3,46	3,50	3,54	3,58	3,62	3,65	3,69	3,73	3,77	3,81	3,85
22,5	3,03	3,07	3,11	3,15	3,18	3,22	3,26	3,30	3,34	3,37	3,41	3,45	3,49	3,53	3,56	3,60	3,64	3,68	3,72	3,75	3,79
23,0	2,99	3,03	3,06	3,10	3,14	3,18	3,21	3,25	3,29	3,33	3,36	3,40	3,44	3,48	3,51	3,55	3,59	3,63	3,66	3,70	3,74
23,5	2,95	2,98	3,02	3,06	3,10	3,13	3,17	3,21	3,24	3,28	3,32	3,35	3,39	3,43	3,47	3,50	3,54	3,58	3,61	3,65	3,69
24,0	2,91	2,94	2,80	3,02	3,05	3,09	3,13	3,16	3,20	3,23	3,27	3,31	3,34	3,38	3,42	3,45	3,49	3,53	3,56	3,60	3,64
24,5	2,87	2,90	2,94	2,97	3,01	3,05	3,08	3,12	3,15	3,19	3,23	3,26	3,30	3,33	3,37	3,41	3,44	3,48	3,51	3,55	3,59
25,0	2,83	2,86	2,90	2,93	2,97	3,00	3,04	3,07	3,11	3,15	3,18	3,22	3,25	3,29	3,32	3,36	3,39	3,43	3,47	3,50	3,54
25,5	2,79	2,82	2,86	2,89	2,93	2,96	3,00	3,03	3,07	3,10	3,14	3,17	3,21	3,24	3,28	3,31	3,35	3,38	3,42	3,45	3,49
26,0	2,75	2,78	2,82	2,85	2,89	2,92	2,96	2,99	3,03	3,06	3,10	3,13	3,16	3,20	3,23	3,27	3,30	3,34	3,37	3,41	3,44
26,5	2,71	2,75	2,78	2,82	2,85	2,89	2,92	2,95	2,99	3,02	3,05	3,09	3,12	3,16	3,19	3,22	3,26	3,29	3,33	3,36	3,39
27,0	2,68	2,71	2,74	2,78	2,81	2,84	2,88	2,91	2,95	2,98	3,01	3,05	3,08	3,11	3,15	3,18	3,21	3,25	3,28	3,32	3,35
27,5	2,64	2,67	2,71	2,74	2,77	2,81	2,84	2,87	2,91	2,94	2,97	3,01	3,04	3,07	3,11	3,14	3,17	3,20	3,24	3,27	3,30
28,0	2,61	2,64	2,67	2,70	2,74	2,77	2,80	2,84	2,87	2,90	2,93	2,97	3,00	3,03	3,06	3,10	3,13	3,16	3,20	3,23	3,26

ANEXO F: NTE INEN 2322 BEBIDAS ALCOHÓLICAS CERVEZA DETERMINACIÓN DE ALCOHOL, MÉTODO VOLUMÉTRICO

4.1 Método Volumétrico

4.1.2 Equipos

4.1.2.1 Balón de destilación, de 500 cm³ de capacidad.

4.1.2.2 Trampa de arrastre que conecta el balón de destilación (ver 4.1.2.1) y el condensador vertical (4.1.2.3). Se recomienda una trampa tipo Kjeldahl esférica o cilíndrica.

4.1.2.3 Condensador vertical, tipo Graham, Liebig o Allihn, con una camisa de 400 mm de longitud como mínimo. El tubo de condensación interior debe terminar en un adaptador lo suficientemente largo de manera que llegue justo debajo de la línea de aforo del recipiente recolector.

4.1.2.4 Balón volumétrico, de 100 cm³ ± 0,1 cm³ de capacidad, para ser destinado como recipiente recolector del destilado.

4.1.2.5 Equipo necesario para determinar la gravedad específica (ver anexo A).

4.1.2.6 Pipeta volumétrica, de 100 cm³.

4.1.2.7 Pipeta de transferencia, 100 cm³ ± 0,1 cm³.

4.1.3 Procedimiento

4.1.3.1 Pipetear exactamente 100 cm³ de cerveza desgasificada a 20°C, colocar dentro del balón de destilación; a continuación añadir 50 cm³ de agua. (Se puede utilizar un balón volumétrico de 100 cm³ para medir la cerveza que se vierte en el balón de destilación). Los 50 cm³ de agua se pueden añadir en pequeñas porciones para enjuagar el balón volumétrico, los que se añaden también al balón de destilación.

4.1.3.2 Conectar el balón al equipo de destilación, y disponer de un balón volumétrico de 100 cm³ para recibir el destilado. (No se debe colocar un embudo en el recipiente recolector).

4.1.3.3 El balón empleado como recolector se rodea con hielo o hielo con agua.

4.1.3.4 La temperatura del agua de refrigeración que sale por el condensador no debe ser superior a 25°C.

4.1.3.5 Destilar alrededor de 96 cm³ a una velocidad uniforme y en un tiempo entre 30 y 60 minutos.

4.1.3.6 El destilado obtenido se mezcla bien. Ajustar la temperatura a 20°C y completar a volumen con agua destilada.

4.1.3.7 A continuación determinar la gravedad específica a 20°C/20°C.

4.1.3.8 De acuerdo al método seleccionado para evaluar la gravedad específica (ver Anexo A), en la tabla 1, leer los gramos de alcohol por 100 cm³ que corresponden a la gravedad específica del destilado.

ANEXO F: CONTINUACIÓN

4.1.4 Cálculos

4.1.4.1 El porcentaje de alcohol por masa en cerveza se calcula mediante las ecuaciones siguientes:

a) Alcohol, porcentaje en volumen, en cerveza = alcohol, % en volumen en el destilado.

b) Alcohol, porcentaje en masa, en cerveza = g de alcohol por 100 cm³ de destilado/gravedad específica de la cerveza.

4.1.4.2 El contenido de alcohol se reporta como porcentaje en masa o en volumen, con dos cifras decimales.

4.1.4.3 Ejemplo.

- Gravedad específica de la cerveza = 1,00924

- Gravedad específica del destilado = 0,99311

- Porcentaje de alcohol, en volumen de la cerveza = 4,78 (a partir de la gravedad específica equivalente del destilado de la tabla 1)

- Gramos de alcohol en 100 cm³ de destilado = 3,77 (de la tabla 1.)

- Porcentaje de alcohol en masa de la cerveza = $3,77/1,00924 = 3,74$

ANEXO G: NTE INEN 2323 BEBIDAS ALCOHÓLICAS. CERVEZA. DETERMINACIÓN DE LA ACIDEZ TOTAL, MÉTODO POR TITULACIÓN CON FENOLFTALEÍNA

4.2 Método por titulación con fenolftaleína.

4.2.1 Equipos

4.2.1.1 Vaso o erlenmeyer de vidrio, de 500 cm³.

4.2.1.2 Pipeta, de 25 cm³ ± 0,1 cm³, tipo flujo rápido.

4.2.1.3 Bureta.

4.2.2 Reactivos

4.2.2.1 Solución de fenolftaleína, 0,5% en 95% de alcohol etílico.

4.2.2.2 Solución estándar de hidróxido de sodio, 0,1 N.

4.2.3 Procedimiento

4.2.3.1 Llevar 250 cm³ de agua destilada a ebullición en un vaso o erlenmeyer de 500 cm³ y continuar la ebullición por 2 minutos.

4.2.3.2 Añadir 25 cm³ de cerveza desgasificada (ver numeral 2 y Nota 2) con pipeta de flujo rápido. Continuar el calentamiento por un minuto, después de que la pipeta es vaciada. Regular la fuente de calor, de tal manera que la ebullición se produzca durante los 30 segundos finales del calentamiento.

4.2.3.3 Retirar la fuente de calor, agitar el contenido del recipiente por 5 segundos y enfriar rápidamente a la temperatura ambiente.

4.2.3.4 Añadir a la solución fría 0,5 cm³ de la solución indicadora de fenolftaleína (ver numeral 4.2.2.1) y valorar con hidróxido de sodio 0,1 N (ver numeral 4.2.2.2) contra fondo blanco.

4.2.3.5 Hacer frecuentes comparaciones de color, durante la valoración, con una muestra de igual volumen y dilución, a la cual le ha sido agregada la cantidad aproximada de álcali necesario para la neutralización, pero no contiene indicador.

4.2.3.6 Continuar la valoración hasta la aparición de un color rosado pálido y leer la lectura de la bureta.

4.2.3.7 Añadir 0,2 cm³ adicionales de álcali, si el color es rojizo definido y permanente, indica sobretitulación. En ese caso, el punto final corresponde a la lectura anterior.

4.2.4 Cálculos

4.2.4.1 La acidez se calcula como "cm³ de álcali 1,0 N por 100 g de cerveza" mediante la ecuación siguiente.

$$\text{Acidez total} = [(\text{cm}^3 \text{ de NaOH } 0,1 \text{ N})/10] \times [100/(\text{cm}^3 \text{ cerveza} \times \text{gravedad específica de cerveza})]$$

$$\text{Acidez total} = (\text{cm}^3 \text{ de NaOH } 0,1 \text{ N} \times 10)/(\text{cm}^3 \text{ cerveza} \times \text{gravedad específica})$$

a) Reportar la acidez de la cerveza con un decimal.

ANEXO G: CONTINUACIÓN

4.2.4.2 La acidez se calcula como "porcentaje de ácido láctico" mediante la ecuación siguiente.

$$\text{Acidez total (como ácido láctico)} = \left[\frac{\text{cm}^3 \text{ de NaOH } 0,1 \text{ N} \times 10}{\text{cm}^3 \text{ cerveza} \times \text{gravedad específica de la cerveza}} \right] \times 0,09$$

En donde:

0,09 = cm^3 equivalentes de una solución de ácido láctico 1,0 N, o

$$\text{Acidez total (como ácido láctico)} = \frac{\text{cm}^3 \text{ de NaOH } 0,1 \text{ N} \times 0,9}{\text{cm}^3 \text{ cerveza} \times \text{gravedad específica de la cerveza}}$$

a) Reportar la acidez de la cerveza como ácido láctico con dos decimales.

ANEXO H: NTE INEN 2325 BEBIDAS ALCOHÓLICAS. CERVEZA. DETERMINACIÓN DEL pH

3. METODO DE ENSAYO

3.1 Resumen

3.1.1 El método consiste en una determinación potenciométrica del pH en una muestra de cerveza previamente desgasificada, filtrada y atemperada de 20°C a 25°C.

3.2 Equipos

3.2.1 Potenciómetro con sus respectivos electrodos.

3.2.2 Vaso de precipitación de 250 cm³.

3.2.3 Agitador.

3.2.4 Termómetro.

3.3 Reactivos

3.3.1 Solución buffer, de pH 4,00.

3.3.2 Solución buffer, de pH 7,00.

3.4 Preparación de la muestra.

3.4.1 Desgasificar la cerveza mediante agitación constante, manteniendo la temperatura de la cerveza entre 20°C y 25°C y filtrarla a través de papel filtro.

3.5 Calibración

3.5.1 Mantener los electrodos del potenciómetro inmersos en una solución.

3.5.2 Verificar el cero y ajustar si es necesario.

3.5.3 Verificar que la temperatura de ensayo sea 20°C.

3.5.4 Lavar los electrodos con agua destilada y secar con papel absorbente.

3.5.5 Sumergir los electrodos en la solución Buffer de pH 7,0.

3.5.6 Remover los electrodos lavar y secar.

3.5.7 Sumergir los electrodos en la solución Buffer de pH 4,0.

3.5.8 Hacer la corrección a pH 4,0 si es necesario.

ANEXO H: CONTINUACIÓN

3.6 Procedimiento

3.6.1 La determinación debe efectuarse por duplicado sobre la misma muestra preparada.

3.6.2 Colocar en el vaso de precipitación aproximadamente 100 cm³ de muestra de cerveza desgasificada y temperatura de ensayo.

3.6.3 Determinar el pH de la cerveza introduciendo los electrodos del medidor de pH en el vaso de precipitación con la muestra, cuidando que no toquen las paredes del recipiente.

3.6.4 Agitar y leer el valor del pH obtenido a 0,01.

ANEXO I: NTE INEN 2326 BEBIDAS ALCOHÓLICAS. CERVEZA. DETERMINACIÓN DE HIERRO

4.1 Método colorimétrico

4.1.1 Resumen

4.1.1.1 El método se basa en la reacción de la 2,2' Bipiridina o de la Ortofenantrolina con el ion ferroso, formando un complejo coloreado, el cual se cuantifica espectrofotométricamente a una longitud de onda de 520 nm para la Bipiridina o a una longitud de onda de 505 nm para la Ortofenantrolina. Longitudes de onda en las cuales el complejo formado presenta su mayor absorbancia.

4.1.2 Equipos

4.1.2.1 Espectrofotómetro o colorímetro. Al usar colorímetro se requiere de filtros en la región azul-verde de 500 nm a 540 nm.

4.1.2.2 Baño de agua a 60°C.

4.1.2.3 Pipetas volumétricas de 1,0 cm³; 2,0 cm³; 5,0 cm³; 10,0 cm³; 20,0 cm³; 25,0 cm³; 30,0 cm³ y 50,0 cm³.

4.1.2.4 Balón aforado de 100 cm³ y 500 cm³.

4.1.3 Reactivos

4.1.3.1 Reactivo de color. Bipiridina u Ortofenantrolina.

a) *Bipiridina*. Disolver 1,0 gramo de 2,2' Bipiridina (α, α' -dipiridil) en 20 cm³ de ácido acético (1+ 2) y diluir a 500 cm³ con agua destilada.

b) *Ortofenantrolina*. Disolver 1,5 gramos de ortofenantrolina en 500 cm³ de agua calentada a 70 °C.

4.1.3.2 *Solución estándar de hierro*. (Esta solución contiene 1 mg de hierro por cm³).

a) Pesar 3,512 g de sulfato de hierro y amonio hexahidratado [Fe (NH₄)₂.(SO₄)₂.6H₂O] y transferir a un balón aforado de 500 cm³. Disolver la sal de hierro en agua destilada, agregar 0,1 cm³ de HCl concentrado y completar el volumen con agua destilada, mezclar la solución vigorosamente.

b) También se puede preparar la solución a partir de alambre de hierro puro libre de óxido así: Disolver 0,500 g de hierro grado reactivo en 5 cm³ de HCl (1+4) y 1 cm³ de HNO₃. Tapar con vidrio de reloj, calentar hasta la solución completa y luego evaporar la solución de hierro hasta sequedad. Disolver el residuo en poca agua y evaporar nuevamente hasta sequedad.

c) Disolver el residuo en 3 cm³ a 5 cm³ de HCl, enfriar y transferir cuantitativamente la solución a un balón volumétrico de 500 cm³. Agregar 2 gotas de agua de bromo saturada y completar a volumen con agua destilada.

4.1.3.3 *Ácido ascórbico*. Reactivo grado analítico, en polvo y libre de hierro.

ANEXO I: CONTINUACIÓN

4.1.4 Calibración

4.1.4.1 Desgasificar la cerveza preferiblemente sin filtrar. En caso de que se requiera filtrar debe usarse papel filtro libre de hierro, el cual no debe dar color al agregarle reactivo de color en presencia de ácido ascórbico.

4.1.4.2 Diluir 1 cm³ de la solución estándar de hierro (reactivo 4.1.3.2) a 100 cm³ con agua destilada para obtener una solución que contiene 0,01 mg de hierro por cm³ de solución.

4.1.4.3 Diluir alícuotas de 0,0 cm³; 2,0 cm³; 5,0 cm³; 10,0 cm³; 20,0 cm³ y 30,0 cm³ de esta solución y aforar hasta 100 cm³ con agua destilada para obtener soluciones que contienen 0,0; 0,20; 0,50; 1,00; 2,00 y 3,00 mg de hierro por litro.

4.1.4.4 Agregar 25 mg de ácido ascórbico y 2 cm³ de reactivo de color a una alícuota de 25 cm³ o 50 cm³ de estas soluciones.

4.1.4.5 Mezclar vigorosamente y calentar a 60°C por 15 minutos. Enfriar a la temperatura ambiente.

4.1.4.6 Medir la absorbancia a 505 nm para el caso de la Ortofenantrolina o a 520 nm para el caso de la Bpiridina.

4.1.4.7 Graficar la absorbancia contra mg/l de hierro para obtener una línea recta. Calcular el factor de calibración F para convertir absorbancia a mg de hierro por litro.

4.1.5 Preparación de la muestra

4.1.5.1 Desgasificar la cerveza preferiblemente sin filtrar. En caso de que se requiera filtrar debe usarse papel filtro libre de hierro, el cual no debe dar color al agregarle reactivo de color en presencia de ácido ascórbico.

4.1.6 Procedimiento

4.1.6.1 La determinación debe efectuarse por duplicado sobre la misma muestra preparada.

4.1.6.2 Preparar un blanco que contenga 25 cm³ de la muestra, añadir 2 cm³ de agua destilada y 25 mg de ácido ascórbico.

4.1.6.3 Preparar la muestra que contenga 25 cm³ de cerveza, añadir 2 cm³ de reactivo de color (Bpiridina) y 25 mg de ácido ascórbico.

4.1.6.4 Agitar a las dos muestras, calentarlas a 60°C por 15 minutos.

4.1.6.5 Enfriar a la temperatura ambiente y medir la absorbancia de la muestra contra el blanco a 505 nm para el caso de usar Ortofenantrolina o 520 nm para el caso de usar Bpiridina. (ver Nota 1).

4.1.7 Cálculos:

4.1.7.1 El contenido de hierro en la cerveza se calcula mediante la ecuación siguiente:

a) Fotómetro o Colorímetro:

$$Fe = F_p \times (R_s - R_0)$$

ANEXO I: CONTINUACIÓN

En donde:

Fe = Contenido de hierro, en mg/l

F_p = Factor de calibración.

R_s = Lectura de la muestra en el fotómetro o colorímetro.

R_0 = Lectura del blanco en el fotómetro o colorímetro

a.1) Ejemplo:

Factor de Calibración = 0,0485

R_s = 8,5

R_0 = 0,5

$Fe = 0,0485 \times (8,5 - 0,5)$

$Fe = 0,39$

b) Espectrofotómetro:

$Fe = F_s \times A$

En donde:

Fe = Contenido de hierro, en mg/l

ANEXO J: NTE INEN 2327 BEBIDAS ALCOHÓLICAS. CERVEZA. DETERMINACIÓN DE COBRE

4.3 Método por espectrofotometría de absorción atómica

4.3.1 Resumen

4.3.1.1 La determinación de cobre en cerveza mediante el uso de espectrofotometría de absorción atómica está restringido para aquellos instrumentos suficientemente sensibles como para detectar niveles de 0,05 mg/l por aspiración directa.

4.3.1.2 La concentración de cobre se determina refiriéndose a una curva de calibración obtenida por el método adición de estándares.

4.3.2 Equipos

4.3.2.1 Espectrofotómetro de absorción Atómica equipado con una lámpara de cátodo hueco para la detección del cobre. Provista de un quemador de tres ranuras (esto reduce los riesgos de formación de depósitos).

4.3.2.2 Balones volumétricos de vidrio, de 100 cm³ con tapa.

4.3.2.3 Pipetas, de 1 cm³ graduadas en 0,1 cm³.

4.3.2.4 Pipetas, volumétricas de 10 cm³.

4.3.3 Reactivos

4.3.3.1 Solución estándar de cobre. 1000 mg/l. Disolver 1,000 g de cobre metálico en un volumen mínimo de ácido nítrico (1+1). Diluir a un litro con ácido nítrico al 1% (v/v). Alternativamente, soluciones estándar preparadas de muy alta pureza para espectrofotometría de absorción atómica están disponibles comercialmente.

4.3.3.2 Agua desionizada.

4.3.4 Procedimiento

4.3.4.1 La determinación debe efectuarse por duplicado sobre la misma muestra preparada.

4.3.4.2 Aspirar directamente las soluciones en el Espectrofotómetro de Absorción Atómica utilizando condiciones apropiadas para el uso de este instrumento.

4.3.4.3 Utilizar agua destilada para encerar el instrumento y luego medir las absorbancias de las muestras de cervezas y de los correspondientes estándares.

4.3.4.4 Utilizar los valores de absorbancia obtenidos de los cuatro estándares para trazar la curva estándar. Extrapolar la cantidad de cobre presente en la cerveza en la correspondiente curva estándar.

4.3.4.5 No interrumpir la acción de aspiración en ninguna de las series. Esto incrementará la precisión en el trabajo.

4.3.5 Cálculo

4.3.5.1 Una réplica de una hoja de trabajo de laboratorio utilizada para registrar los datos y calcular el contenido de cobre se indica en la figura 1. Por extrapolación la intersección de la curva de la adición del estándar con la abscisa indica que la cerveza tiene 0,13 mg/l de cobre.

ANEXO J: CONTINUACIÓN

4.3.5.2 Reportar el contenido de cobre en mg/l en la cerveza con aproximación a dos cifras decimales.

4.3.5.3 Ejemplo

Elemento: Cu
Longitud de onda: 324,7 nm
Quemador: 3 ranuras
Llama: Oxidante (azul)
Aire / Acetileno

Concentración	Absorbancia
Cerveza + 0,0 mg/l cobre añadido	0,125
Cerveza + 0,1 mg/l cobre añadido	0,220
Cerveza + 0,2 mg/l cobre añadido	0,320
Cerveza + 0,4 mg/l cobre añadido	0,510
Cerveza + 0,6 mg/l cobre añadido	0,700

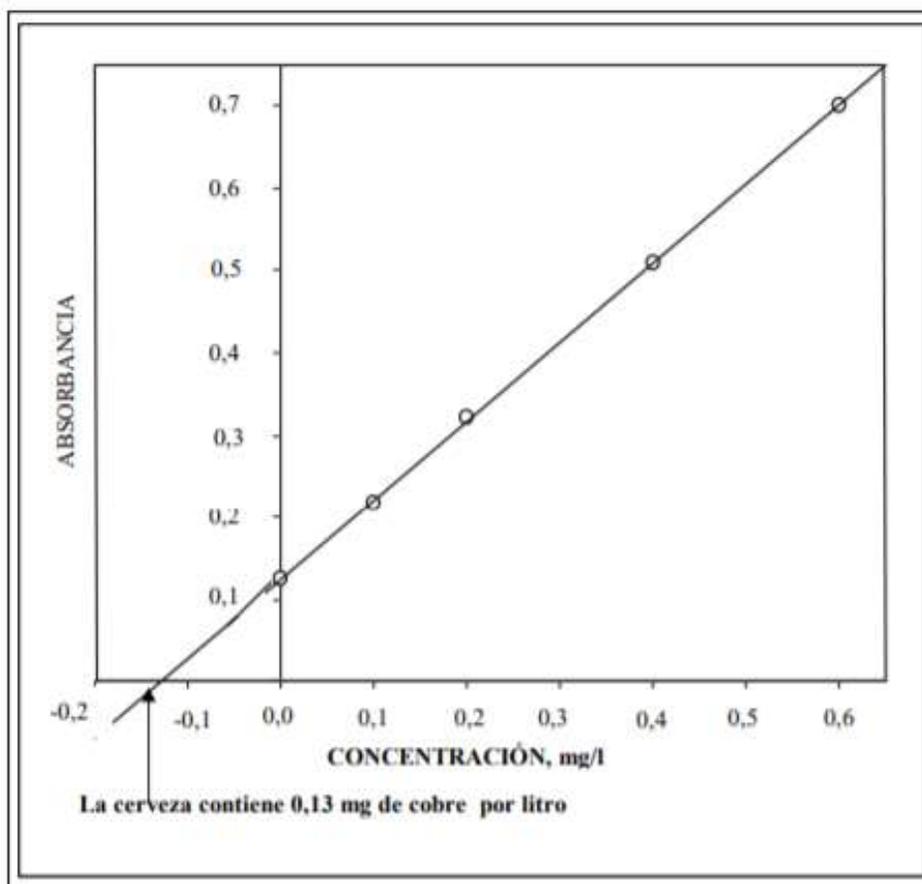


FIGURA 1. Ejemplo del cálculo del contenido de cobre en la cerveza con los datos obtenidos por Espectrofotometría de Absorción Atómica.

ANEXO K: NTE INEN 2328 BEBIDAS ALCOHÓLICAS. CERVEZA. DETERMINACIÓN DE ZINC

2. METODO DE ENSAYO

2.1 Resumen

2.1.1 El zinc se determina por aspiración directa de la cerveza diluida. Los átomos de zinc en estado basal absorben radiación a 213,9 nm, la cual es emitida por una lámpara de cátodo hueco.

2.1.2 La concentración de zinc se determina directamente refiriéndose a una curva de calibración obtenida por el método de adición de estándares.

2.2 Equipos

2.2.1 Espectrofotómetro de absorción atómica con lámpara de cátodo hueco para zinc, provisto de un quemador de tres ranuras (este reduce el riesgo de formación de depósitos).

2.2.2 Balones volumétricos, de 50 cm³, 100 cm³ y 1000 cm³, con tapas de vidrio

2.2.3 Pipetas volumétricas, de 1 cm³ y 2 cm³.

2.3 Reactivos

2.3.1 *Ácido clorhídrico concentrado*, de densidad 1,19 g/cm³.

2.3.2 *Ácido clorhídrico al 50% v/v*. Ácido clorhídrico concentrado mezclando en relación 1:1 con agua destilada.

2.3.3 *Ácido clorhídrico al 1% v/v*. Llevar 20 cm³ del reactivo 2.3.1 a 1 litro con agua destilada.

2.3.4 *Solución patrón de zinc de 1 000 mg/l*. Disolver 1,000 g de zinc metálico en un volumen mínimo de ácido clorhídrico al 50% v/v (reactivo 2.3.2) y llevar a un volumen de 1 litro con ácido clorhídrico al 1% v/v (reactivo 2.3.3). Alternativamente se pueden emplear soluciones estándar de alta pureza preparadas comercialmente.

2.3.5 *Agua destilada*.

2.4 Preparación de la muestra

2.4.1 Ajustar la temperatura de 20°C a 25°C.

2.4.2 Desgasificar la muestra de cerveza transfiriendo a un frasco y agitándola, al principio lentamente, luego vigorosamente, manteniendo la temperatura de la cerveza de 20°C a 25°C.

2.4.3 Si es necesario separar el material en suspensión, pasando la cerveza libre de CO₂ a través de papel filtro libre de zinc.

ANEXO K: CONTINUACIÓN

2.5 Procedimiento

2.5.1 La determinación debe efectuarse por duplicado sobre la misma muestra preparada.

2.5.2 Calibración

2.5.2.1 De la solución patrón de zinc 1 000 mg/l preparar soluciones de 10 mg/l; 20 mg/l; 30 mg/l y 40 mg/l en agua destilada añadiendo 1 cm³, 2 cm³, 3 cm³ y 4 cm³ de esta solución a una serie de cuatro balones volumétricos de 100 cm³ y llevar a volumen con agua destilada.

2.5.3 Preparación de las soluciones estándar de cerveza

2.5.3.1 Hacer adiciones de 0 mg/l; 0,2 mg/l; 0,4 mg/l; 0,6 mg/l y 0,8 mg/l de zinc a la cerveza añadiendo 1 cm³ de agua destilada, 1 cm³ de cada una de las soluciones de 10 mg/l, 20 mg/l, 30 mg/l y 40 mg/l de zinc a una serie de cinco balones volumétricos de 50 cm³ y llevar a volumen con la cerveza a ensayar.

2.5.3.2 La cerveza es así diluida 49/50.

2.5.4 Muestra para ensayo

2.5.4.1 Las muestras para ensayo son las soluciones estándares de cerveza indicadas en el numeral 2.5.2.

2.5.5 Blanco.

2.5.5.1 El blanco consta de un volumen de agua destilada.

2.5.6 Verificación del equipo.

2.5.6.1 Llevar a cabo todas las verificaciones necesarias para asegurar que el equipo esté operando satisfactoriamente, como se describe en el manual del equipo.

2.5.6.2 Ajustar la presión y la velocidad de flujo de gas (mezcla acetileno/aire) la llama es oxidante, ligeramente azul.

2.5.6.3 Conectar la lámpara de zinc y ajustar la intensidad

2.5.6.4 Fijar la longitud de onda a 213,9 nm , ajustar la lámpara y el quemador.

2.6 Cálculos

2.6.1 El contenido de zinc en la cerveza se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$C = C_1 \times \frac{50}{49}$$

En donde:

C = Concentración de zinc en la cerveza, en mg/l.

C₁ = Concentración de zinc en la cerveza diluida, en mg/l.

50/49= Factor de dilución.

2.6.2 La curva de calibración se extrapola para obtener el contenido de zinc de la cerveza diluida.

ANEXO K: CONTINUACIÓN

2.6.3 Ejemplo

Elemento: Zn
Longitud de onda: 213,9 nm
Quemador: 3 ranuras
Llama: Oxidante (azul)
Aire / Acetileno

Concentración	Absorbancia
Cerveza + 0,0 mg/l zinc añadido	0,034
Cerveza + 0,2 mg/l zinc añadido	0,073
Cerveza + 0,4 mg/l zinc añadido	0,112
Cerveza + 0,6 mg/l zinc añadido	0,150
Cerveza + 0,8 mg/l zinc añadido	0,188

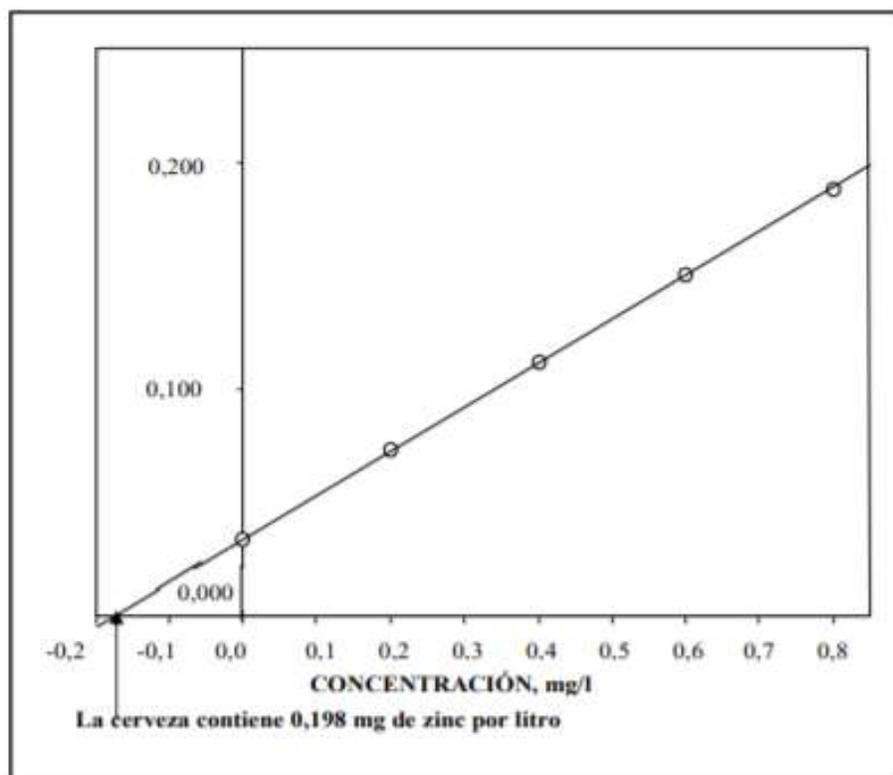


FIGURA 1. Ejemplo del cálculo de contenido de zinc en la cerveza con los datos obtenidos por Espectrofotometría de absorción atómica.

2.6.4 El contenido de zinc en la cerveza diluida es 0,198 mg Zn/l.

2.6.5 La concentración de Zinc en la cerveza se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$C = 0,198 \times \frac{50}{49} = 0,202 \text{ mg/l}$$

ANEXO L: NTE INEN 2329 BEBIDAS ALCOHÓLICAS. CERVEZA. DETERMINACIÓN DE ZINC

2. METODO DE ENSAYO

2.1 Resumen

2.1.1 El procedimiento que se describe a continuación permite determinar el contenido de arsénico total (AsIII) hasta una concentración de 2 ng/cm³ de cerveza, empleando espectrofotometría de absorción atómica por generación de hidruros.

2.2 Equipos

2.2.1 Espectrofotómetro de absorción atómica, equipado con lámparas de cátodo hueco de As, o de descarga sin electrodos de Arsénico, tres ranuras, cabeza de quemador Bolling de 10 cm, aire C₂-H₂ y H₂-N₂ llamas de aire arrastrado, y corrector de fondo de arco de deuterio.

2.2.2 Tubos de vidrio de borosilicato.

2.2.3 Pipetas.

2.2.4 Probetas.

2.2.5 Vasos de precipitación.

2.2.6 Vaso de descomposición, de 70 cm³.

2.2.7 Balones volumétricos, de 100 cm³.

2.2.8 Plancha de calentamiento.

2.2.9 Micropipetas, de 10 - 50 µl, 50 - 250 µl, 200 - 1 000 µl.

2.2.10 Mufia.

2.2.11 Balanza analítica.

2.3 Reactivos

2.3.1 Ácido nítrico concentrado R.A. (redistilado).

2.3.2 Ácido clorhídrico concentrado R.A. (redistilado).

2.3.3 Nitrato de magnesio al 15% m/v. Preparar disolviendo 150 g de Mg(NO₃)₂ en 1 000 cm³ de agua desionizada.

2.3.4 Ácido nítrico 1:1. Preparar disolviendo 500 cm³ de HNO₃ en 500 cm³ de agua desionizada.

ANEXO L: CONTINUACIÓN

2.3.5 Ácido clorhídrico 8M. Preparar diluyendo 66 cm³ de HCl concentrado a 1 000 cm³ con agua desionizada.

2.3.6 Trióxido de arsénico (As₂O₃).

2.3.7 Solución de Hidróxido de potasio (KOH), al 20% m/v.

2.3.8 Solución de ácido sulfúrico al 20% v/v.

2.3.9 Solución de ácido sulfúrico al 1% v/v.

2.3.10 Hidróxido de sodio (NaOH).

2.3.11 Solución de borohidruro de sodio. Pesar 1,0 g de hidróxido de sodio y 3,0 g de borohidruro de sodio, luego disolver en agua desionizada (reactivo 2.3.14), filtrar y completar a volumen en un balón volumétrico de 100 cm³.

2.3.12 Solución de yoduro de potasio al 10%.

2.3.13 Solución de nitrato de amonio (NH₄NO₃). En un vaso de precipitación colocar 100 cm³ de hidróxido de amonio redistilado y unas gotas de indicador verde de bromocresol. Luego añadir lentamente ácido nítrico concentrado al hidróxido de amonio hasta que vire el color azul a verde. Este procedimiento se debe llevar a cabo en un baño de hielo debido a que la reacción es exotérmica.

2.3.14 Agua desionizada tipo I. (resistencia específica mínima 17 Mohm/cm, contenido de sodio máximo 0,03 µg/cm³, no debe leer más de 0,010 unidades de absorbancia).

2.3.15 Se requiere que estos reactivos sean de alta pureza (reactivos para absorción atómica), exentos de los metales a analizar.

2.4 Procedimiento

2.4.1 Preparación del material

2.4.1.1 Lavar el material con jabón neutro, enjuagar con abundante agua corriente y a continuación con agua destilada.

2.4.1.2 Luego escurrir y enjuagar con mezcla sulfonítrica, lo cual se debe realizar bajo campana.

2.4.1.3 Finalmente lavar con agua destilada, luego con agua desionizada y secar dejando escurrir en un ambiente libre de polvo o en una estufa.

2.4.2 Preparación de la muestra

2.4.2.1 Separar el CO₂ transfiriendo la muestra a un frasco grande y agitándola, al principio lentamente, luego vigorosamente, manteniendo la temperatura de la cerveza de 20°C a 25°C.

2.4.2.2 Luego de retirado el gas, someter la muestra al siguiente procedimiento de calcinación:

2.4.2.3 Colocar 5 cm³ de la muestra de cerveza y 0,5 cm³ de la solución de Mg(NO₃)₂ (reactivo 2.3.3) en un tubo de vidrio borosilicato de 100 cm³ y colocar en una plancha de calentamiento de 150°C a 180°C hasta que la muestra esté seca (aproximadamente en 30 minutos). La muestra se debe secar completamente. Luego de que se enfríe, añadir 5 cm³ de ácido nítrico concentrado (reactivo 2.3.1) y poner nuevamente en la plancha de calentamiento hasta eliminar completamente los residuos de ácido nítrico.

ANEXO L: CONTINUACIÓN

2.4.2.4 Introducir la muestra en una mufla a una temperatura inferior a 110°C, posteriormente elevar la temperatura suavemente alrededor de 50°C/min hasta 375°C. Conservar esta temperatura hasta que cesen los humos y luego incrementar hasta 450°C, permaneciendo en este valor durante 1,5 h y a continuación dejar enfriar a temperatura ambiente.

2.4.2.5 Se puede requerir una segunda calcinación para remover residuos de carbón remanente. Para lograr esto agregar 1 cm³ de HNO₃ 1:1 (reactivo 2.3.4) dejándolo caer por las paredes del tubo. A continuación colocar la muestra en la mufla fría incrementando después la temperatura a 450°C, conservándola bajo estas condiciones durante 10 min.

2.4.2.6 Repetir este procedimiento hasta que no queden residuos de carbón.

2.4.2.7 Disolver las cenizas obtenidas en 2 cm³ de HCl 8M (reactivo 2.3.5) y 8 cm³ de agua (reactivo 2.3.14) (Utiliza un dispensador para añadir exactamente los anteriores volúmenes en el tubo). Se debe hacer un blanco reactivo para revisar todo el proceso y verificar una posible contaminación.

2.4.3 Preparación de la solución patrón

2.4.3.1 La solución patrón contiene 1000 µg/cm³ de arsénico y para prepararla se procede de la siguiente manera:

- Disolver 1,320 g de trióxido de arsénico (As₂O₃) (reactivo 2.3.6) en 25 cm³ de solución de hidróxido de potasio al 20% m/v (reactivo 2.3.7).
- A continuación, neutralizar esta solución con ácido sulfúrico al 20% v/v (reactivo 2.3.8) empleando fenolftaleína como indicador. En seguida completar a 1 litro con una solución de ácido sulfúrico al 1% (v/v) (reactivo 2.3.9).

2.4.3.2 También se recomienda el uso de soluciones patrón para absorción atómica disponibles en el comercio.

2.4.4 Determinación del contenido de arsénico

2.4.4.1 Preparación de las soluciones patrón de arsénico

- Diluir 1 cm³ de la solución patrón (ver numeral 2.4.3) en el agua desionizada (reactivo 2.3.14) y completar a un volumen de 100 cm³ para obtener una solución de 10 mg de As/l.
- Tomar a continuación alícuotas de 0 cm³, 10 cm³, 30 cm³ y 60 cm³ de la solución anterior en cuatro tubos de vidrio de borosilicato de 100 cm³.
- Añadir 2 cm³ de HCl 8M (reactivo 2.3.5) y 8 cm³ de agua desionizada (reactivo 2.3.14), los cuales corresponden al blanco y a soluciones patrón de 10 µg/l, 30 µg/l, y 60 µg/l.
- Agregar posteriormente en los respectivos recipientes de reacción 2 cm³ de las anteriores soluciones patrón y de la muestra.
- Añadir 0,5 cm³ de Yoduro de potasio al 10% (reactivo 2.3.12) a cada tubo de reacción y dejar en reposo a temperatura ambiente durante 60 min.

2.4.4.2 Parámetros de operación del equipo

- Elemento: Arsénico.
- Fuente: lámpara de cátodo hueco.
- Longitud de onda: 193,7 nm.

ANEXO L: CONTINUACIÓN

- d) Ancho de ranura: 0,7 nm.
- e) Corrector de fondo: No.
- f) Gas de purga: Argón/Nitrógeno.
- g) Llama: Aire/Acetileno (1 000 °C).
- h) Reductor: Borohidruro de sodio 3% en hidróxido de sodio 1% (reactivo 2.3.11).
- i) Se deben tener en cuenta las demás recomendaciones del fabricante.

2.4.4.3 Calibración y lectura de muestra.

- a) Hacer un blanco de reactivos para ajustar el cero.
- b) calibrar con las soluciones patrón y leer las muestras en unidades de concentración ($\mu\text{g/l}$) (ver Nota 1).

2.5 Cálculos

2.5.1 El contenido de arsénico en la muestra se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$\text{Contenido de Arsénico } (\mu\text{l/l}) = (\text{lectura} \times 10 \text{ cm}^3) / 5 \text{ cm}^3$$

ANEXO M: NTE INEN 2330 BEBIDAS ALCOHÓLICAS. CERVEZA. DETERMINACIÓN DE PLOMO

2. METODO DE ENSAYO

2.1 Resumen

2.1.1 El procedimiento que se describe a continuación permite determinar el contenido de plomo hasta una concentración de 2 ng/cm³ de cerveza, empleando espectrofotometría de absorción atómica por generación de hidruros.

2.2 Equipos

2.2.1 Espectrofotómetro de absorción atómica, equipado con lámparas de cátodo hueco de Pb, o de descarga sin electrodos de Plomo, tres ranuras, cabeza de quemador Belling de 10 cm, aire C₂-H₂ y H₂-N₂ de aire arrastrado, y corrector de fondo de arco de deuterio.

2.2.2 Tubos de vidrio de borosilicato.

2.2.3 Pipetas.

2.2.4 Probetas.

2.2.5 Vasos de precipitación.

2.2.6 Vaso de descomposición, de 70 cm³.

2.2.7 Balones volumétricos, de 100 cm³, 200 cm³ y 1 000 cm³.

2.2.8 Plancha de calentamiento.

2.1.9 Micropipetas, de 10 -50 µl, 50 - 250 µl, 200 - 1 000 µl.

2.1.10 Mufia.

2.1.11 Balanza analítica.

2.3 Reactivos

2.3.1 *Ácido nítrico concentrado R.A. (redistilado).*

2.3.2 *Ácido clorhídrico concentrado R.A. (redistilado).*

2.3.3 *Nitrato de magnesio al 15% m/v. Preparar disolviendo 150 g de Mg(NO₃)₂ en 1 000 cm³ de agua desionizada.*

2.3.4 *Ácido nítrico 1:1. Preparar disolviendo 500 cm³ de HNO₃ en 500 cm³ de agua desionizada.*

ANEXO M: CONTINUACIÓN

2.3.5 Ácido clorhídrico 8M. Preparar diluyendo 66 cm³ de HCl concentrado a 1 000 cm³ con agua desionizada.

2.3.6 Plomo en polvo.

2.3.7 Solución de Hidróxido de potasio (KOH) al 20% m/v.

2.3.8 Solución de ácido sulfúrico al 20% v/v.

2.3.9 Solución de ácido sulfúrico al 1% v/v.

2.3.10 Hidróxido de sodio (NaOH).

2.3.11 Solución de borohidruro de sodio. Pesar 1,0 g de hidróxido de sodio y 3,0 g de borohidruro de sodio, luego disolver en agua desionizada (reactivo 2.3.13), filtrar y completar a volumen en un balón volumétrico de 100 cm³.

2.3.12 Solución de yoduro de potasio al 10%

2.3.13 Solución de nitrato de amonio (NH₄NO₃). En un vaso de precipitación colocar 100 cm³ de hidróxido de amonio redistilado y unas gotas de indicador verde de bromocresol. Luego añadir lentamente ácido nítrico concentrado al hidróxido de amonio hasta que vire el color azul a verde. Este procedimiento se debe llevar a cabo en un baño de hielo debido a que la reacción es exotérmica.

2.3.14 Agua desionizada tipo I. (resistencia específica mínima 17 Mohm/cm, contenido de sodio máximo 0,03 µg/cm³, no debe leer más de 0,010 unidades de absorbancia).

2.3.15 Se requiere que estos reactivos sean de alta pureza (reactivos para absorción atómica), exentos de los metales a ensayar.

2.4 Procedimiento

2.4.1 Preparación del material

2.4.1.1 Lavar el material con jabón neutro, enjuagar con abundante agua corriente y a continuación con agua destilada.

2.4.1.2 Luego escurrir y enjuagar con mezcla sulfonítrica, lo cual se debe realizar bajo campana.

2.4.1.3 Finalmente enjuagar con agua destilada, luego con agua desionizada y secar dejando escurrir en un ambiente libre de polvo o en una estufa.

2.4.2 Preparación de la muestra

2.4.2.1 Separar el CO₂ transfiriendo la muestra a un frasco grande y agitándola, al principio lentamente, luego vigorosamente, manteniendo la temperatura de la cerveza de 20°C a 25°C.

2.4.2.2 Luego de retirado el gas, someter la muestra al siguiente procedimiento de calcinación:

2.4.2.3 Colocar 5 cm³ de la muestra de cerveza y 0,5 cm³ de la solución de Mg(NO₃)₂ (reactivo 2.3.3) en un tubo de vidrio borosilicato de 100 cm³ y colocar en una plancha de calentamiento de 150°C - 180°C hasta que la muestra esté seca (aproximadamente en 30 minutos). La muestra se debe secar completamente. Luego de que se enfríe, añadir 5 cm³ de ácido nítrico concentrado (reactivo 2.3.1) y poner nuevamente en la plancha de calentamiento hasta eliminar completamente los residuos de ácido nítrico.

ANEXO M: CONTINUACIÓN

2.4.2.4 Introducir la muestra en una mufla a una temperatura inferior a 110°C, posteriormente elevar la temperatura suavemente alrededor de 50°C/min hasta 375°C. Conservar esta temperatura hasta que cesen los humos y luego incrementar hasta 450°C, permaneciendo en este valor durante 1,5 h y a continuación dejar enfriar a temperatura ambiente.

2.4.2.5 Se puede requerir una segunda calcinación para remover residuos de carbón remanente. Para lograr esto agregar 1 cm³ de HNO₃ 1:1 (reactivo 2.3.4) dejándolo caer por las paredes del tubo. A continuación colocar la muestra en la mufla fría incrementando después la temperatura a 450 °C, conservándola bajo estas condiciones durante 10 min.

2.4.2.6 Repetir este procedimiento hasta que no queden residuos de carbón.

2.4.2.7 Disolver las cenizas obtenidas en 2 cm³ de HCl 8M (reactivo 2.3.5) y 8 cm³ de agua (reactivo 2.3.14) (Utilizar un dispensador para añadir exactamente los anteriores volúmenes en el tubo). Se debe hacer un blanco reactivo para revisar todo el proceso y verificar una posible contaminación.

2.4.3 Preparación de la solución patrón

2.4.3.1 La solución patrón contiene 1 000 µg/cm³ de plomo y para prepararla se procede de la siguiente manera:

a) Disolver 1,000 g de polvo de plomo en 20 cm³ de ácido nítrico (1+1) (reactivo 2.3.4) en un balón volumétrico de 1 litro y diluir a volumen con agua destilada.

2.4.3.2 La solución de trabajo contiene 5 µg/ cm³ de plomo y para prepararla se procede de la siguiente manera:

a) Pipetear 1 cm³ de la solución patrón del numeral 2.4.3.1 literal (a), colocar dentro de un balón volumétrico de 200 cm³ y diluir con agua destilada.

2.4.3.3 También se recomienda el uso de soluciones patrón para absorción atómica disponibles en el comercio.

2.4.4 Determinación del contenido de plomo

2.4.4.1 Preparación de las soluciones patrón.

a) Diluir 1 cm³ de la solución patrón (ver numeral 2.4.4.1, literal a) en agua desionizada y completar a 100 cm³ para obtener una solución patrón de 10 mg/l.

b) Tomar a continuación alícuotas de 0 µl, 50 µl, 150 µl y 300 µl de la solución anterior (a) en cuatro tubos de vidrio de borosilicato de 100 cm³.

c) Añadir 2 cm³ de HCl 8M (reactivo 2.3.5) y 8 cm³ de agua desionizada (reactivo 2.3.14), los cuales corresponden al blanco y a soluciones patrón de 50 µg/l, 150 µg/l y 300 µg/l.

d) Agregar posteriormente estas soluciones en las copas del automuestreador.

2.4.4.2 Parámetros de operación del equipo

a) Elemento: plomo (Pb)

b) Matriz: Cenizas disueltas en HCl 8M

ANEXO M: CONTINUACIÓN

TABLA 1. Parámetros instrumentales y de lectura del equipo

Parámetros instrumentales	Parámetros de lectura
Longitud de onda: 283,3 nm	Concentración/Absorbancia
Ancho de banda espectral: 0,7 nm	S1: 50 µg/0,141
Fuente de luz: Lámpara de cátodo hueco	S2: 150 µg/0,337
Corriente: 5 mA	S3: 300 µg/0,552
Corriente de fondo: opcional	Altura pico; tiempo: 7 s

2.4.4.4 Calibración y lectura de la muestra

- a) Hacer un blanco de reactivos para ajustar el cero; calibrar con las soluciones patrón y leer las muestras en unidades de concentración (µg/l).

2.5 Cálculos

2.5.1 El contenido de plomo en la muestra se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$\text{Contenido de plomo } (\mu\text{g/l}) = (\text{lectura} \times 10 \text{ cm}^3) / 5 \text{ cm}^3$$

ANEXO N: NTE INEN 1529-17 CONTROL MICROBIOLÓGICO DE LOS ALIMENTOS. BACTERIAS ANAEROBIAS MESÓFILAS. RECUENTO EN TUBO POR SIEMBRA EN MASA.

6. MUESTREO, CONSERVACIÓN Y PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

6.1 Tomar las muestras según la NTE INEN 1529-2

6.2 Las unidades de muestras perecederas que llegan al laboratorio deben mantenerse en refrigeración, entre 0°C y 5°C, por no más de 24 h. En general, las muestras deben mantenerse en las condiciones adecuadas del producto, hasta el momento del examen.

6.3 La unidad analítica debe provenir de una unidad de muestra de por lo menos 100 g y ser preparada según la NTE INEN 1529-2.

7. PROCEDIMIENTO

7.1 Siembra

7.1.1 En tubos conteniendo el agar triptonado T 65 fundido y temperado a 47°C, de cada dilución decimal y en tubos individuales, pipetear, por duplicado, volúmenes de 1 cm³, introduciendo la pipeta hasta el fondo y dejando caer la muestra al retirar la pipeta con movimiento helicoidal ascendente.

Utilizar para cada dilución una nueva pipeta estéril.

7.1.2 Poner los tubos en pie en un baño de agua fría para que el agar se solidifique rápidamente.

7.1.3 Cubrir la siembra con una capa de vaselina líquida estéril de 1 cm de espesor (vaselina - parafina, agar al 2% o parafina) o poner los tubos en una jarra anaeróbica.

7.1.4 Incubar entre 30°C y 35°C por 24 a 72 h

7.2 Recuento de colonias

7.2.1 Elegir los dos tubos de la dilución que contengan 30 ±10 colonias, contarlas y calcular el número de UFC de bacterias anaerobias por gramo o centímetro cúbico de alimento.

7.2.2 Si todos los tubos presentan más de 40 colonias, contar en los tubos inoculados con la menor cantidad de muestra.

7.2.3 Si no hay desarrollo de colonias en los tubos sembrados con la suspensión inicial (10⁻¹) o con la muestra no diluida, anotar: "No se observan colonias".

ANEXO N: CONTINUACIÓN

8. CÁLCULOS

8.1 El número (N) de unidades formadoras de colonias (UFC) por gramo o centímetro cúbico de muestra se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$N = nxf$$

En donde:

n = media aritmética de las colonias contadas en 7.2;

f = factor de dilución (valor inverso de la dilución de la muestra)

Cuando se siembran alícuotas de 1 cm³ de producto original líquido no diluido, la ecuación que se aplica es:

$$N = n$$

ANEXO O: NTE INEN 1529-10 CONTROL MICROBIOLÓGICO DE LOS ALIMENTOS. MOHOS Y LEVADURAS VIABLES. RECuentOS EN PLACA POR SIEMBRA EN PROFUNDIDAD

4.1 Resumen

4.1.1 Este método se basa en el cultivo entre 22°C y 25°C de las unidades propagadoras de mohos y levaduras, utilizando la técnica de recuento en placa por siembra en profundidad y un medio que contenga extracto de levadura, glucosa y sales minerales.

4.2 Material y medios de cultivo

4.2.1 Materiales. La vidriería debe resistir esterilizadas repetidas y todo el material debe estar perfectamente limpio y estéril.

4.2.1.1 Placas Petri

4.2.1.2 Pipetas serológicas de boca ancha de 1;5 cm³ y 10 cm³ graduadas en 1/10 de unidad.

4.2.1.3 Esparcidores

4.2.2 Medios de cultivo

4.2.2.1 Agar sal-levaduras de Davis o similar. Ver NTE INEN 1529-1.

4.2.2.2 Se puede adicionar de manera opcional clorhidrato de clortetraciclina. Cuando existe sobre crecimiento bacteriano puede ser un problema (por ejemplo, las carnes crudas), se recomienda usar cloranfenicol (50 mg / l) y clortetraciclina (50 mg / l), preparar el medio de base, con sólo 50 mg de cloranfenicol, se dispense en cantidades de 100 ml y se esteriliza. Prepara también un 0,1% (en masa concentración) solución de clorhidrato de clortetraciclina en agua (relativamente inestables en solución, que debe ser recién preparada) y esterilizar por filtración. Justo antes de usar, añadir 5 ml de esta solución asépticamente a 100 ml del medio de base, y verter en placas. La gentamicina no es recomendable, ya que se ha informado que puede causar inhibición de algunas especies de levaduras (ver nota 1).

4.2.2.3 Adición opcional de elementos traza. A fin de que los mohos exhiban su morfología completa, en particular los pigmentos que producen normalmente, necesitan rastrear los elementos que no pueden estar presentes en DRBC (Dichloran-rose bengal chloramphenicol agar). Para identificar estos mohos en este medio, agregue la siguiente traza solución de elementos en 1 ml por litro del medio, antes de la esterilización en autoclave: ZnSO₄ · 7H₂O 1g; CuSO₄ · 5H₂O 0,5 g; agua, destilada o des ionizada 100 ml.

4.2.2.3 Adición opcional de Tergitol. Con el fin de evitar el crecimiento excesivo de Mucoraceae en placas de agar, la adición de Tergitol (1 ml/l) al medio de cultivo es recomendada.

4.2.2.5 Dichloran-rose bengal chloramphenicol agar (DRBC); usado en productos cuya Aw es mayor de 0,95.

4.2.2.6 Dichloran glicerol 18% (concentración de masa) agar (DG18); utilizado para productos con actividad de agua inferior o igual a 0,95.

ANEXO O: CONTINUACIÓN

4.4 Procedimiento

4.4.1 Debido a la rápida sedimentación de las esporas en la pipeta, mantener la pipeta en una posición horizontal (no vertical) posicionarse cuando se llena con el volumen apropiado de la suspensión inicial y diluciones. Agitar la suspensión inicial y diluciones con el fin de evitar la sedimentación de microorganismo que contienen partículas.

4.4.2 Inoculación e incubación. Sobre una placa de agar previamente fundido, utilizando una pipeta estéril, transferir 0,1 ml de la muestra si es líquido, o 0,1 ml de la suspensión inicial en el caso de otros productos. Sobre una segunda placa de agar, utilizando una pipeta estéril fresco, transferir 0,1 ml de la dilución decimal primera (10^{-1}) dilución (producto líquido), o 0,1 ml de la dilución 10^{-1} (otros productos). Para facilitar el recuento de bajas poblaciones de levaduras y mohos, los volúmenes pueden llegar hasta 0,3 ml de una dilución 10^{-1} de muestra, o de la muestra de prueba, si es líquido, puede ser extendido en tres placas. Repetir estas operaciones con diluciones posteriores, utilizando una pipeta estéril nueva para cada dilución decimal. Si se sospecha un rápido crecimiento de mohos se sospecha, extender el líquido sobre la superficie de la placa de agar con un esparcidor estéril hasta que el líquido se encuentre completamente absorbido en el medio.

4.2.3 También se inoculan las placas por el método de vertido, pero en este caso la equivalencia de los resultados serán validados en comparación con la inoculación en superficie, además la discriminación y la diferenciación de los mohos y levaduras no son admisibles. El método de difusión en la superficie puede dar mayor enumeración. La técnica de propagación de placa facilita la máxima exposición de las células al oxígeno atmosférico y evita cualquier riesgo de inactivación térmica de los propágulos fúngicos. Los resultados pueden depender del tipo de hongos.

4.2.4 Incubar las placas preparadas aeróbicamente, con las tapas superiores en posición vertical en la incubadora a $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 5 días. Si es necesario, deje las placas de agar de pie con luz natural difusa durante 1 día a 2 días. Se recomienda incubar las placas en una bolsa de plástico abierta con el fin de no contaminar la incubadora en el caso de la difusión de los mohos de los platos.

4.4.5 Recuento y selección de colonias para la confirmación. Leer las placas entre 2 días y 5 días de incubación. Seleccionar los platos que contienen menos de 150 colonias y contarlas. Si estos mohos son de rápido crecimiento puede ser un problema, al momento del conteo, por ello se recomienda realizar un recuento a los 2 días y otra vez después de 5 días de incubación (Ver nota 2 y 3).

4.4.6 Contar las colonias de levaduras y las colonias de mohos por separado, si es necesario. Para la identificación de levaduras y mohos, seleccionar áreas de crecimiento de hongos y examinar con el microscopio o inocular en el medio adecuado para su aislamiento.

4.5 Cálculos

4.5.1 Cálculo del número (N) de unidades propagadas (UP) de mohos y/o levaduras por centímetro cúbico ó gramo de muestra. Calcular según la siguiente fórmula:

$$N = \frac{\text{numero total de colonias contada o calculadas}}{\text{Cantidad total de muestra sembrada}} \quad (1)$$

$$N = \frac{\sum C}{V(n_1 + 0,1m_2)} \quad (2)$$

En donde:

- $\sum C$ = suma de las colonias contadas o calculadas en todas las placas elegida;
- n_1 = número de placas contadas de la primera dilución seleccionada;
- n_2 = número de placas contadas de la segunda dilución seleccionada;
- d = dilución de la cual se obtuvieron los primeros recuentos, por ejemplo 10^{-2} ;
- V = volumen del inóculo sembrado en cada placa.

ANEXO O: CONTINUACIÓN

4.5.2 Redondeo. El valor obtenido redondear a dos cifras significativas de la siguiente manera (NTE INEN 52)

4.5.2.1 Si el tercer dígito, empezando por la izquierda es menor de cinco, mantener inalterado el segundo dígito y reemplazar por ceros los restantes. Por ejemplo, si el valor calculado fuere 533 000, redondeado a 550 000 y expresar como $5,5 \times 10^5$. Si el tercer dígito, empezando por la izquierda es superior a cinco, añadir una unidad al segundo dígito; por ejemplo, si el valor obtenido fue 10 954, redondearlo a 11 000 y expresar $1,1 \times 10^4$.

4.5.2.2 Si el tercer dígito empezando por la izquierda es cinco y es segundo de, por lo menos. Un dígito, añadir una unidad al segundo dígito y reemplazar por ceros a los restantes. Por ejemplo, si el valor obtenido fue 31 554, redondearlo a 32 000 y expresar como $3,2 \times 10^4$. Si el tercer dígito es cinco y no es seguido de otro (s) dígito (s) ó lo es únicamente por ceros, añadir una cantidad al segundo dígito, si éste es impar; si es par ó cero conservarlo inalterado, ejemplo: 235 redondear a 240 y expresar como $2,4 \times 10^2$, 24 500 redondear a 24 000 y expresar como $2,4 \times 10^4$.

4.5.3 Presentación de resultados

4.5.3.1 Presentar el resultado como número N, de unidades propagadoras UP de mohos y/o levaduras / cm^3 ó g de muestra utilizando solo dos cifras significativas multiplicadas por 10^n (n es la respectiva potencia de 10). Las cifras significativas corresponden al primero y segundo dígitos (empezando por la izquierda) del número de las colonias calculadas (4.5.1).

4.5.3.2 Si no hay desarrollo de colonias en las placas de las suspensión 10^{-1} , presentar como número estimado (N_E), de las siguientes formas;

$$N_E \frac{\text{de UP de mohos o levaduras}}{\text{g o cm}^3} = < 1,0 \cdot 10 \quad (3)$$

4.5.3.3 si no hay desarrollo de las colonias en las placas sembradas con 1 cm^3 de muestra no diluida (producto original líquido), expresar el resultado de la siguiente manera:

$$N_E \frac{\text{de UP de mohos o levaduras}}{\text{g o cm}^3} = < 1,0 \cdot 10 \quad (4)$$

4.5.3.4 Si todas las placas sembradas presentan más de 150 colonias, calcular el resultado a partir de las placas sembradas con la dilución más alta y expresar de la siguiente manera

$$N_E \frac{\text{de UP de mohos y/o levaduras}}{\text{cm}^3 \text{ o g}} = > \text{al valor obtenido} \cdot f \quad (5)$$

$$f = \text{factor de dilución (valor inverso de la dilución de la muestra)} \quad (6)$$

4.5.3.5 Indicar entre paréntesis la dilución utilizada. Este resultado sirve como guía para decidir el número de diluciones que se han de realizar en ensayos posteriores y, la decisión de aceptación o rechazo de una partida de alimentos debe basarse solo en valores N.

ANEXO P: RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

EXAMEN BROMATOLOGICO Y MICROBIOLOGICO DE ALIMENTOS

CÓDIGO: 149-21

CLIENTE: Paola Córdova

TIPO DE MUESTRA: Cerveza

FECHA DE RECEPCIÓN: 02 de marzo del 2021

FECHA DE MUESTREO: 02 de marzo del 2021

EXAMEN FISICO

COLOR: Característico

OLOR: Característico

ASPECTO: Normal, libre de material extraño

DETERMINACIONES	UNIDADES	MÉTODO DE ANÁLISIS	RESULTADO
Grados alcohólicos	%	INEN 2322	8.5
Acidez expresado como ácido láctico	%	INEN 2323	0.31
pH	Unid	INEN 2325	4.41
Hierro	mg/l.	INEN 2326	0.10
Plomo	mg/l.	INEN 2330	0.016
Arsénico	mg/l.	INEN 2329	<0.4
Zinc	mg/l.	INEN 2328	0.33
Cobre	mg/l.	INEN 2327	0.1
Anaerobios mesófilos	UFC /ml.	Siembra en masa	8
Mohos y levaduras	UFC /ml.	Siembra en masa	0

RESPONSABLE:



Dra. Gina Álvarez R.



El informe sólo afecta a la muestra solicitada a ensayo; el informe no deberá reproducirse sino en su totalidad previo autorización de los responsables.

*La muestra es receptada en laboratorio.



ESPOCH

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

Oficio No. 02. D.FC.2021
Riobamba, 26 de agosto de 2021

Ingenieros
COMISIÓN DE INTEGRACIÓN CURRICULAR
Presente.

De mi consideración:

Con un cordial saludo, mediante la presente me permito indicar que los estudiantes: Cristian David Calva Ortiz y Juan Raul Venegas Ortiz con CI. 210112583-5 y 180520153-8 de la Carrera de Ingeniería Química realizaron la entrega del equipo Carbonatador, así como los manuales y documentos requeridos para el laboratorio de procesos Industriales, el cual se recibe en óptimas condiciones y fue previamente validado por su comisión como parte del trabajo de titulación denominado: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CARBONATADOR DE INYECCIÓN COMO PARTE DE UNA LÍNEA DE PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE CERVEZA ARTESANAL".

Por su gentil atención y aceptación al presente anticipo mi sincero agradecimiento

Atentamente,

 FIRMADO DIGITALMENTE
CARLA VIVIANA
HARO
VELASTEGUI

Ing. Carla Haro
TÉCNICO DE LABORATORIO



c.c. Estudiantes

ANEXO R: CERTIFICADO DBRA



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL APRENDIZAJE
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 18 / 10 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Cristian David Calva Cedeño</i> <i>Juan Raúl Venegas Ortiz</i>
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: <i>Ciencias</i>
Carrera: <i>Ingeniería Química</i>
Título a optar: <i>Ingeniero Químico</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: <i>Ing. Leonardo Medina Ñuste MSc.</i>

LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE

Firmado digitalmente
por LEONARDO FABIO
MEDINA NUSTE
Fecha: 2021.10.18
17:43:41 -05'00'



1497-DBRA-UTP-2021