

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
“OPTIMIZACION DE ABSORCION DE DIOXIDO
DE CARBONO EN BEBIDA EMPLEANDO
VENTURI”

CESAR GUTIÉRREZ CUBA

HÉCTOR RICARDO CUBA TORRE

Callao, 2020

PERÚ

Andy

Handwritten signature

AGRADECIMIENTO

A la UNAC por el financiamiento del desarrollo de la investigación a través del Fondo Especial de Desarrollo Universitario (FEDU).



INDICE

	4
TABLAS DE CONTENIDO	
LISTA DE TABLAS	4
LISTA DE FIGURAS	5
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
	10
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
1.1. Descripción de la realidad problemática	10
1.2. Formulación del problema	10
1.2.1. Problema general	10
1.2.2. Problemas específicos	10
1.3. Objetivos de la investigación	11
1.3.1. Objetivo general	11
1.3.2. Objetivos específicos	11
1.4. Limitantes de la investigación	11
II. MARCO TEORICO	12
2.1. Antecedentes	12
2.1.1. Antecedentes internacionales	12
2.1.2. Antecedentes Nacionales	14
2.2. Marco	15
2.2.1. Teórico	15
2.2.2. Propiedades del dióxido de Carbono	15
2.2.3. Carbonatación	16



2.2.4. Equilibrio termodinámico de CO ₂ gas y líquido de la bebida.	17
2.2.5. Determinación de la carbonatación	21
2.2.6. Carbonatador	24
2.2.7. Tecnología de microburbujas	31
2.2.8. Inyector Venturi	35
2.2.9. Geometría del Venturi	37
2.2.10. Lecho empacado	40
2.2.11. Conceptual	41
2.3. Definición de términos básicos	43
III. HIPOTESIS Y VARIABLES	44
3.1. Hipótesis	44
3.1.1. Hipótesis general	44
3.1.2. Hipótesis específicas	44
3.2. Definición conceptual de variables	44
3.3. Operacionalización de variables	45
IV. DISEÑO METODOLÓGICO	46
4.1. Tipo y diseño de investigación	46
4.2. Método de Investigación	46
4.3. Población y muestra	56
4.4. Lugar de estudio y periodo	56
4.5. Técnica e instrumentos para la recolección de información	56
4.6. Análisis y procesamiento de datos	57
V. RESULTADOS	60
5.1. Resultados descriptivos	60

5.2. Resultados inferenciales	62
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	63
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	63
6.2. Hipótesis General	67
6.3. Hipótesis específicas	68
6.4. Contrastación de los resultados con otros similares	69
6.5. Responsabilidad ética	69
CONCLUSIONES	71
RECOMENDACIONES	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXOS	76



TABLAS DE CONTENIDO

Lista de Tablas

	Pág
Tabla 1. Carta de volumen de gas	23
Tabla 2. Niveles de carbonatación típicos	24
Tabla 3. Operacionalización de variables	45
Tabla 4. Especificaciones del CO ₂ en la Industria de Bebidas	54
Tabla 5. Temperaturas, presiones y flujo de pruebas experimentales	55
Tabla 6. Resultados de pruebas experimentales	62
Tabla 7. Resultados de pruebas experimentales	65
Tabla 8. Valores de c_L	66



Lista de figuras

	Pág
Figura 1. Diagrama de fases del CO ₂	16
Figura 2. Esquema de una botella en el equilibrio	19
Figura 3. Carta de carbonatación de volúmenes de gas de CO ₂	22
Figura 4. Métodos de carbonatación básicos	25
Figura 5. Carbo-enfriador Mojonnier	27
Figura 6. Carbo-enfriador Predosix de Simonazzi	28
Figura 7. Unidad de infusión de CO ₂ Crown-Century	30
Figura 8. Carbonatador de agua "Intermix"	31
Figura 9. Diagrama esquemático mostrando macro, micro y nano burbujas	33
Figura 10. Presurización para generación de microburbujas	34
Figura 11. Tubo Venturi	35
Figura 12. Sistema que incluye al Venturi	37
Figura 13. Criterios geométricos de importancia en un tubo Venturi	38
Figura 14. Tubos Venturi	39
Figura 15. Columna de lecho empacado con anillos Raschig de plástico	41
Figura 16. Tanque de almacenamiento bebida carbonatada	46
Figura 17. Bomba Centrifuga sanitaria Inoxidable de presión	47
Figura 18. Lecho empacado con relleno de polietileno de alta densidad	47
Figura 19. Inyector Venturi Mazzei de ½ diámetro	48
Figura 20. Primera configuración del Módulo de carbonatación	48
Figura 21. Segunda configuración del módulo de Carbonatación	49
Figura 22. Sensor digital de temperatura	50
Figura 23. Manómetro de medición de presión al ingreso del Venturi	50
Figura 24. Manómetro de cámara del almacenamiento bebida carbonatada	51
Figura 25. Conductividad de agua	52
Figura 26. Determinación Grados Brix de bebida jarabeada preparada	53
Figura 27. Tanque de CO ₂ con válvulas de regulación de flujo	53
Figura 28. Dosificación del CO ₂ a través del Venturi	55
Figura 29. Volumen de CO ₂ a 39,2 °F y 24 psi	57



Figura 30. Volumen de CO ₂ a 42,8 °F y 27 psi	58
Figura 31. Volumen de CO ₂ a 46,4 °F y 30,5 psi	58
Figura 32. Concentración de CO ₂ vs presión a diferentes temperaturas	67
Figura 33. Dato comparativo con estudio similar	69

Two handwritten signatures in blue ink. The signature on the left is a stylized 'A' followed by 'Drey'. The signature on the right is more complex, appearing to be 'Gustavo' followed by a date '27/11/11'.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue la construcción de un módulo experimental que utiliza un inyector Venturi y un lecho empacado para conseguir un grado de carbonatación adecuado que en la práctica industrial son cuatro volúmenes de dióxido de carbono por cada volumen de bebida carbonatada. Los resultados experimentales para un refresco con 10.5 ° Brix, a una temperatura de 6 °C +/- 1 °C, una presión manométrica de 1.85 bar, y para un caudal de 7.2 L / min, fue posible incorporar cuatro volúmenes a la bebida de carbón. dióxido de carbono por cada volumen de refresco. Los resultados permiten utilizar el Venturi acoplado al lecho empacado como una adecuada configuración compacta que facilita una mayor absorción debido a la formación de microburbujas de dióxido de carbono ofreciendo una alta área de contacto entre las fases y homogeneización dentro del lecho empacado logrando niveles de carbonatación similares al nivel industrial.

Palabras clave: Carbonatación, grados Brix, bebida jarabeada, Venturi, lecho empacado



ABSTRACT

The objective of this research was the module experimental construction and testing through a Venturi injector and a packed bed additional to achieve the target of carbonation, Soft drink industrial practice is around four volumes of carbon dioxide for each carbonated drink volume. The experimental results for a soft drink with 10.5 ° Brix, at a temperature of 6 °C +/- 1°C, a gauge pressure of 1.85 bar, and for a flow of 7.2 L / min, was possible incorporated four volumes into the drink of carbon dioxide for each volume of soft drink. The results permit using the Venturi coupled to the packed bed as a suitable compact configuration that facilitates greater absorption due to the formation of carbon dioxide microbubbles offering a high contact area between the phases and homogenization within the packed bed achieving carbonation levels like the industrial level.

Key Words: Soft drink, Brix degree, absorption, Venturi, packed bed, microbubble.

Two handwritten signatures in blue ink, one on the left and one on the right, positioned above the page number.

INTRODUCCION

Con el desarrollo y avance tecnológico en la absorción de gases en líquido, existen posibilidades de mejorar estos procesos. La utilización del Venturi es una alternativa de sustitución a los equipos tradicionales para mejorar la absorción de CO₂ en los líquidos y bebidas.

La intensificación del proceso consiste en el desarrollo de equipos y técnicas novedosas que, en comparación con las que son comúnmente utilizados. Esperamos obtener mejoras importantes en la fabricación y el procesamiento, disminuyendo sustancialmente la relación: tamaño del equipo/capacidad de producción, consumo de energía o producción y resultando en tecnologías más eficientes y sostenibles.

Con esta perspectiva, el desarrollo de procesos de ingeniería más compactos y económicos es posible. Por ello se propone utilizar el Venturi que tiene características que permite su aplicación como un dispositivo de intensificación de procesos, ya que promueve procesos de mezcla y reacciones más eficientes en un tamaño de equipo más compacto y de menor costo en comparación a los equipos comúnmente utilizados.

Este estudio nos permitió utilizar el Venturi como un dispositivo muy útil para la carbonatación de bebidas y así poder encontrar un mejor arreglo del proceso y de los parámetros operativos que permitan obtener una carbonatación adecuada de la bebida.



I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

Se pueden emplear sistemas alternativos a los procesos como la absorción, con el fin de reemplazar con unidades más compactas, menor costo y de mayor eficiencia conocido como intensificación de procesos. Esto puede realizarse al reemplazar las unidades con platos de contacto con dispositivos de tipo Venturi más pequeños y compactos.

Con este trabajo se pretende brindar una alternativa al proceso de carbonatación, empleando métodos de mezcla más intensos como el Venturi, que es un dispositivo que provocará un mezclado de fases gas y líquido a escala más pequeña, lo cual facilitará la absorción de CO_2 más intensa. Adicionalmente se empleará una columna de lecho empacado que permitirá aún más el contacto de fases que facilitará la absorción a niveles que se trabajan en plantas industriales.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema General

¿Cuáles son los valores de variables de diseño que permitan realizar una optimización del proceso de absorción de dióxido de carbono en bebidas empleando Venturi?

1.2.2. Problemas específicos

1. ¿Cuál es la configuración experimental más adecuada para conseguir una buena absorción de CO_2 en la bebida?
2. ¿Cuáles son los valores de variables de proceso que permitan una buena absorción de CO_2 en la bebida empleando Venturi?



1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo General

Determinar valores de variables de diseño que permitan realizar una óptima absorción de dióxido de carbono en bebidas empleando Venturi.

1.3.2. Objetivos Específicos

Determinar la configuración experimental más adecuada para conseguir una buena absorción de CO₂ en la bebida.

Determinar los valores de variables de proceso que permitan una buena absorción de CO₂ en la bebida empleando Venturi.

1.4. Limitantes de la Investigación

El trabajo de investigación es viable porque se cuenta con los ambientes de laboratorio, equipos para la realización de la parte experimental del proyecto, así como presupuesto para la movilidad.

Durante el periodo de marzo a julio del 2020, no se tuvo acceso a los laboratorios por el problema sanitario del COVID 19, lo cual no permitió terminar el proyecto en los plazos establecidos.



II. MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Barker (G. Barker et al, 2002) estudia la carbonatación doméstica basada en la inyección de gas a alta presión y la despresurización. Los parámetros del proceso examinados comprendieron la temperatura, el método de inyección de gas, el diseño de la boquilla y el control y liberación de la presión del espacio de cabeza. Se encontró que las variables clave que impactan en la retención de CO₂ son los períodos de tiempo espacial durante los cuales se inyectó el gas, el diseño y la ubicación de la boquilla (que impactan en la agitación) y el tiempo de liberación de la presión. Se descubrió que una boquilla de un solo orificio colocado 25 mm por encima de la línea de flotación era el más eficaz, en términos de masa de CO₂ retenido a masa inyectada, de todas las configuraciones de boquillas y sistemas estudiados. Disminuir el diámetro del orificio de salida y así aumentar el tiempo de despresurización mejoró aún más la retención de gas. Se concluyó que la eficiencia en el uso de gas podría incrementarse sustancialmente ajustando la ubicación de la boquilla, adoptando un protocolo de inyección y despresurización apropiado y disminuyendo la tasa de despresurización.

Descoins (Descoins C. et al, 2006), estudio las propiedades de efervescencia de bebidas carbonatadas sujetas a la concentración de dióxido de carbono disuelto y su capacidad para transferirse de la fase líquida a la burbuja en formación. Se informa la construcción de una unidad de carbonatación a pequeña escala de laboratorio que permite el estudio de la solubilidad del dióxido de carbono en diversos medios hidroalcohólicos, difiriendo en sus composiciones. Esta unidad, que es un modelo de un equipo industrial real, mide la concentración instantánea de CO₂ durante el proceso de carbonatación, mediante un detector de



conductividad térmica. Se estudió la cinética de carbonatación de varias muestras, que contienen agua, alcohol, azúcar, proteínas y aminoácidos libres. Mientras que el azúcar disminuye la solubilidad del CO₂ y, en consecuencia, la cinética de carbonatación, los aminoácidos libres y las proteínas aumentan la concentración de dióxido de carbono en el medio. El equipo experimental utilizado, podría ser útil para los embotelladores de refrescos para medir los cambios que pueden afectar la efervescencia y consecuentemente la percepción visual y gustativa de la bebida tras la modificación de su composición.

Rudolf (Rudolf et al, 2014) estudia el fenómeno de cavitación que ocurren en la boquilla convergente-divergente (tubo Venturi). Utilizó un circuito de prueba cerrado con posibilidad de controlar tanto el caudal como el nivel de presión estática. Evaluó el coeficiente de pérdida para diferentes números de cavitación, lo que resultó en una caracterización "estática" completa de la boquilla. Las visualizaciones del desarrollo del patrón de cavitación fueron obtenidas y combinadas con la evolución del coeficiente de pérdida. Se describen tres regímenes de cavitación: cavitación parcial, cavitación completamente desarrollada y supercavitación.

Mingda Li (Mingda Li et al, 2019), investiga numérica y experimentalmente la influencia de varios parámetros geométricos en el inicio de la cavitación detectado por un hidrófono y la generación de microburbujas medida por una cámara de alta velocidad. Usando un análisis numérico adimensional, encuentra que el inicio de la cavitación se determina por la resistencia al flujo, que depende significativamente del diseño geométrico del tubo Venturi. En el régimen de cavitación, la resistencia al flujo inducida por la cavitación aumenta linealmente con la reducción del número de cavitación aguas abajo, mientras que el número de cavitación aguas arriba se vuelve constante independientemente de la geometría del tubo Venturi. Un ángulo de salida pequeño da como resultado un inicio de baja cavitación y una alta producción de microburbujas. Además, encontró que el grado de generación de microburbujas aumenta con la resistencia al flujo adicional y la concentración de gas disuelto.



2.1.2. Antecedentes nacionales

Ordoñez (Ordoñez Huamán, 2011), en su trabajo de investigación “Tratamiento de Aguas y Elaboración de Bebidas” da información relacionada al conocimiento del agua, propiedades físico químicas, tratamientos primarios que se realiza con fines de potabilidad y su posterior utilización en la industria de bebidas. Así mismo desarrolla lo concerniente a tecnologías aplicadas en la elaboración de bebidas no alcohólicas y alcohólicas a partir de diversas materias primas vegetales: semillas, frutos, raíces, hojas y tallos.



2.2. Marco

2.2.1. Teórico

2.2.2. Propiedades del dióxido de Carbono

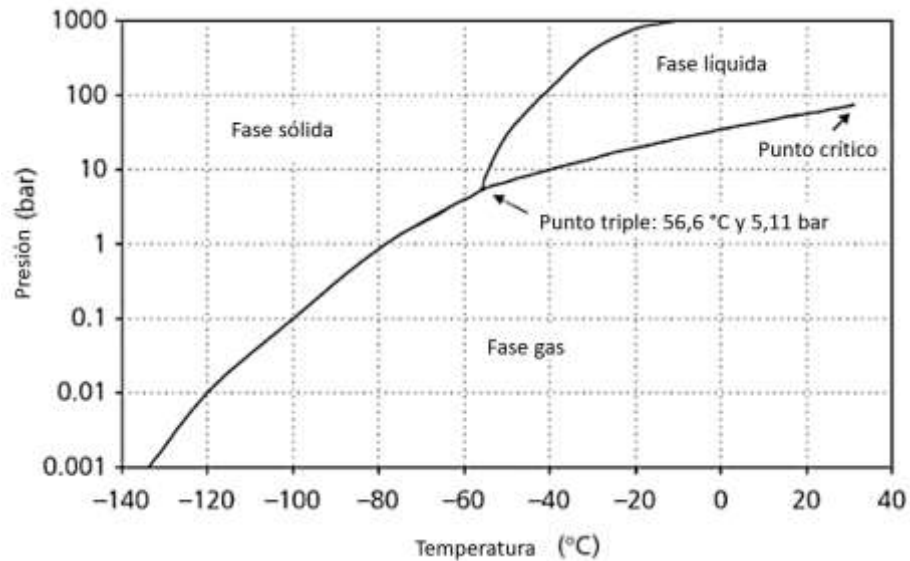
El dióxido de carbono es un gas incoloro con un olor ligeramente acre; cuando se disuelve en agua, la mezcla de ácido carbónico resultante tiene un sabor ácido y penetrante que no es desagradable. El CO₂ no favorece la combustión y se utiliza mucho en extintores. Las altas concentraciones en la atmósfera sofocarán rápidamente a los animales que respiran y, dado que el gas es 1,53 veces más pesado que el aire a 70 ° F, se debe tener mucho cuidado al ingresar a recipientes que han contenido CO₂ y que pueden no haber sido suficientemente ventilados y purgados; en estas circunstancias, el CO₂ residual se depositará en la base del tanque para atrapar al entrante desprevenido. El dióxido de carbono generalmente está presente en el aire atmosférico a un nivel de aproximadamente 300 ppm por volumen y es peligroso respirar atmósferas que contienen más del 5% por volumen: se ha postulado que los trabajadores pueden estar expuestos de manera segura a una concentración máxima de 5000 ppm de CO₂, por volumen durante 8 horas al día. El CO₂ es uno de los pocos gases adecuados para proporcionar la efervescencia en refrescos. No es tóxico, es inerte, prácticamente insípido, disponible a precios moderados y puede ser licuado a temperaturas y presiones razonables.

En la figura 1, se tiene el diagrama de fases del CO₂. Se puede observar que a presión de 1 bar (muy próximo a 1 atm) se encuentra por debajo del punto triple.



Figura 1

Diagrama de fases del CO₂



Fuente: NPCS board of consultants & Engineers (2017)

La solubilidad de CO₂ en agua y bebidas que contienen azúcar permite una retención aceptable del gas en solución a presión atmosférica y temperatura ambiente, aunque una ligera agitación puede promover la evolución de burbujas de gas desde el cuerpo de la bebida que crea un efecto espumoso atractivo.

2.2.3. Carbonatación

La inclusión artificial de un gas disuelto en una bebida gaseosa se desarrolló a partir de la popularidad de las aguas minerales naturales, que se descargan en una forma ligeramente carbonatada de formaciones rocosas en muchos de los balnearios más conocidos del mundo.

En las bebidas carbonatadas, la concentración de CO₂ disuelto es de hecho un parámetro de suma importancia, ya que es responsable de la muy buscada sensación efervescente y de la formación de burbujas (la efervescencia).

La carbonatación se puede definir como la disolución de un líquido con gas dióxido de carbono (CO₂). Cuando se aplica a un producto de refresco, el resultado es una bebida que brilla y hace espuma a medida que se dispensa y consume. Este escape de CO₂ durante el consumo de la bebida debe complementar y realzar el sabor, y agregará un excitante cosquilleo que estimula el paladar. La cantidad de gas CO₂ que produce el efecto de carbonatación se suele especificar como "volúmenes", es decir, en términos generales, el número de veces que el volumen total de gas disuelto se puede dividir por el volumen del líquido. Por ejemplo, una bebida de 3,0 volúmenes contendrá CO₂, hasta el triple del volumen de la bebida. Los efectos organolépticos no son los únicos beneficios del contenido de CO₂; a carbonataciones por encima de 3,0 volúmenes, el CO₂ tiene una propiedad de conservación, cuya extensión depende del pH, azúcar, carga microbiana inicial y naturaleza de los microorganismos.

2.2.4. Equilibrio termodinámico de CO₂ gas y líquido de la bebida

Al igual que otros gases, el dióxido de carbono aumenta en solubilidad a medida que disminuye la temperatura del líquido. Para cada combinación de una cantidad de CO₂ en solución y temperatura del líquido hay una presión mínima finita que es necesaria para retener el gas en solución. Esta es una condición conocida como 'equilibrio' donde, debido al movimiento molecular, la solución de salida de gas es igualada y equilibrada por la solución de entrada de gas. A la presión de equilibrio, el gas y el líquido están en estado estable, pero cualquier disminución de presión o aumento de temperatura hará que la mezcla sea metaestable (o sobresaturada) en el sentido de que la combinación de presión/temperatura es insuficiente para mantener el CO₂ en solución. En estas circunstancias, el gas se liberará



espontáneamente, particularmente si hay agitación aplicado a la solución, una condición conocida como 'formación de espuma' y generalmente evidente cuando una botella de producto carbonatado se abre a presión atmosférica.

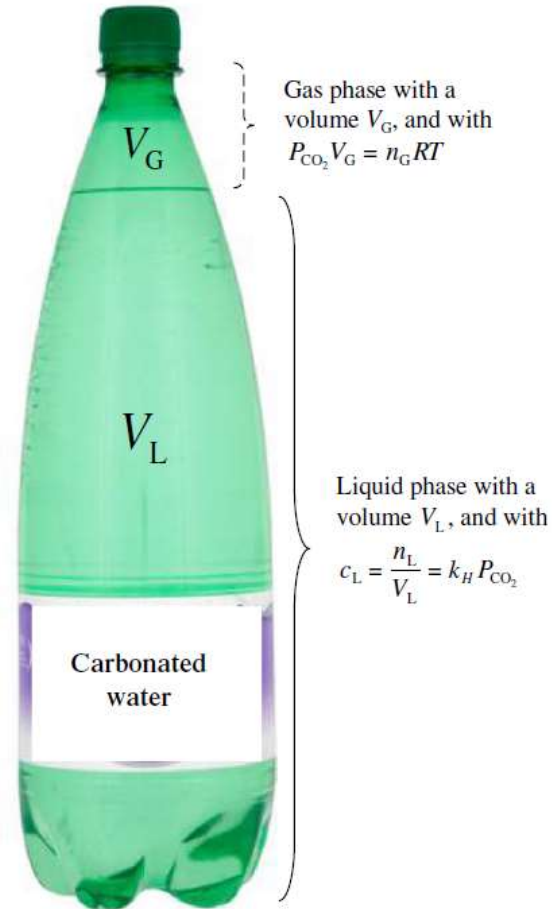
La incapacidad de una bebida carbonatada para retener todo su contenido de CO_2 en solución a presión atmosférica da lugar a la atractiva efervescencia observada durante el acto de verter la bebida en un vaso y la liberación de más CO_2 durante el consumo real. El producto carbonatado contenido en un recipiente abierto a la atmósfera perderá gradualmente la carbonatación a medida que el gas se libera y se escapa del líquido. En un recipiente cerrado, este desprendimiento de gas procede a llenar el volumen del espacio de cabeza y aumenta gradualmente la presión, rápidamente al principio y luego más lentamente a medida que se acerca a la condición de equilibrio. La tasa real de transferencia de gas del producto al espacio de cabeza depende no solo de la proximidad de la presión del espacio de cabeza a la presión de equilibrio, sino también de la temperatura del líquido, la naturaleza de la bebida y el grado de agitación impuesta al líquido.

Un producto estable y en reposo que no esté sujeto a vibraciones o movimiento puede tardar muchas horas en alcanzar el equilibrio, mientras que el mismo producto, agitado bruscamente, tardará sólo unos segundos en alcanzar el estado de equilibrio. El gas CO_2 que sale de la bebida se acumula en el volumen del espacio de cabeza para proporcionar la presión de equilibrio necesaria para mantener el gas restante en solución, con una carbonatación ligeramente más baja que el valor original.

En una botella de agua carbonatada (Liger-Belair, Gerard, 2019) sellada herméticamente con una corona o un tapón de rosca, el volumen V_G de fase gaseosa en el espacio de cabeza cohabita con el volumen V_L , de agua (es decir, la fase líquida), como se ve en la figura 2.



Figura 2
Esquema de una botella en el equilibrio



Fuente: Liger-Belair, Gerard, 2019

Por simplicidad, se supone que ambos volúmenes permanecen constantes. La capacidad del CO_2 para disolverse en agua se rige por la ley de equilibrio de Henry, que establece que la concentración c_L de CO_2 disuelto en la fase líquida es proporcional a la presión parcial del CO_2 en la fase gaseosa y se denota como P_{CO_2} :

$$c_L = k_H P_{CO_2} \quad (1)$$

Two handwritten signatures in blue ink are present at the bottom right of the page. The first signature is a stylized name, and the second is a more complex signature with a date '25' written above it.

siendo k_H la constante de la ley de Henry, que es fuertemente dependiente de la temperatura de la fase líquida (es decir, su solubilidad).

Termodinámicamente hablando, para una determinada especie de gas, la dependencia de la temperatura de la constante de la ley de Henry se puede expresar convenientemente con una ecuación similar a la de Van't Hoff de la siguiente manera:

$$k_H(T) = k_{298K} \exp \left[-\frac{\Delta H_{\text{diss}}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right) \right] \quad (2)$$

Siendo ΔH_{diss} , la entalpía de disolución de las especies gaseosas en fase líquida (expresada en J/mol), siendo R la constante del gas ideal (8,31 J/ K mol) y T la temperatura absoluta (expresada en K). En la botella herméticamente cerrada, el número total de moles de CO_2 , n_T , es una cantidad conservada que se descompone en n_G moles en la fase gaseosa y n_L moles en la fase líquida. Por lo tanto:

$$n_T = n_G + n_L \quad (3)$$

En el rango de presión realista que se encuentra en una botella de agua carbonatada (unos pocos bares), podemos suponer con seguridad que la fase gaseosa está regida por la ley de los gases ideales. Así:

$$P_{\text{CO}_2} V_G = n_G RT \quad (4)$$

Siendo T , la temperatura de la bebida (en K) y n_G el número de moles de CO_2 en la fase gaseosa, que se encuentra en el espacio superior de la botella.

En la botella herméticamente cerrada (figura 2), el equilibrio termodinámico del CO_2 disuelto en el líquido y en fase gaseosa, siempre verifica el siguiente sistema de



ecuaciones:

$$\begin{cases} n_T = n_L + n_G \\ c_L = \frac{n_L}{V_L} = k_H P_{CO_2} \\ P_{CO_2} V_G = n_G RT \end{cases} \quad (5)$$

La presión parcial de CO₂ en fase gaseosa, en las botellas selladas, puede simplemente determinarse mediante la ley de Henry como $P_{CO_2} = c_L/k_H$. La constante de la ley de Henry del CO₂, en agua a 25 ° C (298K) es 1,49 g/ L bar y la entalpía de disolución del CO₂, en agua es $\Delta H_{diss} = 19,9 \text{ kJ / mol}$ (Lide y Frederikse, 1995).

2.2.5. Determinación de la carbonatación

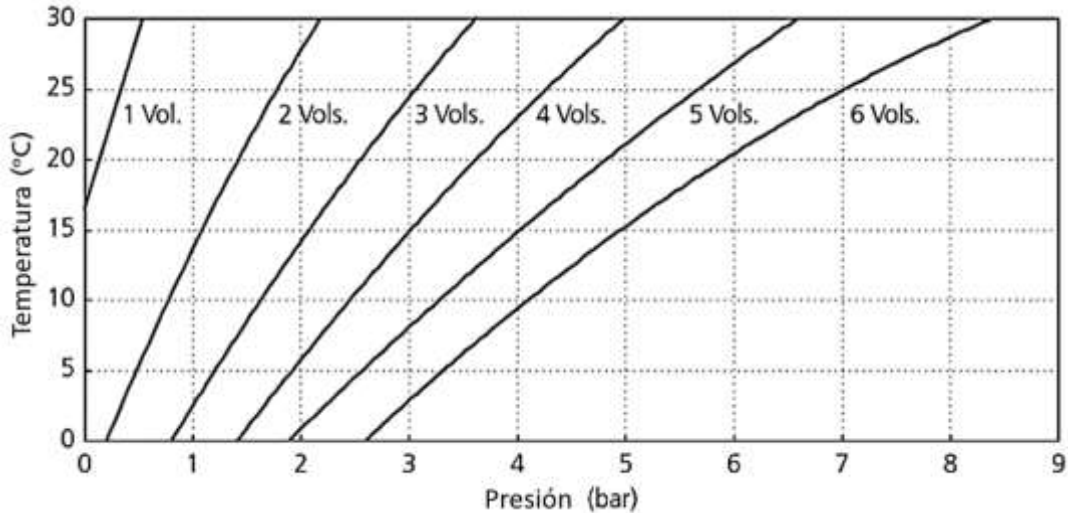
Un método para medir el grado de carbonatación (NPCS board of consultants & Engineers, 2017) sería extraer el contenido total de CO₂ de un volumen conocido de producto, ajustar el volumen de gas a la presión atmosférica y, cuando se desee, convertir matemáticamente este volumen a 0 °C; la relación entre el volumen de gas y el volumen de bebida original dará la cifra de carbonatación. Otro procedimiento hace uso del fenómeno del equilibrio. Si se conocen la temperatura y la presión de equilibrio de un producto, entonces debe haber un nivel de carbonatación fijo basado en estos dos factores.

A partir de mediciones de laboratorio de las cantidades máximas de CO₂ disuelto en agua a diversas presiones y temperaturas y mediante la aplicación de la Ley de Henry, se puede producir un gráfico de la relación de tres variables: volúmenes disueltos, temperaturas y presiones de equilibrio. La Figura 3 muestra los volúmenes máximos de CO₂ (ajustados a 760 mm Hg y 0 ° C) que pueden disolverse a diversas temperaturas y presiones.



Figura 3

Carta de carbonatación de volúmenes de gas de CO₂ (reducido a 0 °C y 1,013 bar)



Fuente: NPCS board of consultants & Engineers (2017)

Así como hay información gráfica de cartas de carbonatación, también hay tablas de cartas de volumen como el mostrado en la Tabla 1. Esta tabla da información de volúmenes de CO₂ contenidos en el líquido en función de la temperatura y presión. De la tabla, por ejemplo, para 4,4 °C (40 °F) y una presión de 30 lb/pulg², se tiene 4,1 volúmenes de CO₂ por cada volumen de líquido de bebida.

Tabla 1

Carta de volumen de gas (volúmenes de CO2 disuelto en 1 volumen de bebida)

Presión de la botella en lb/pulg ²	Temperatura del líquido en la botella en °F												
	32	36	40	44	48	55	60	65	70	75	80	85	90
15	3.46	3.19	2.93	2.70	2.50	2.20	2.02	1.86	1.71	1.58	1.44	1.37	1.27
20	4.04	3.73	3.42	3.15	2.92	2.57	2.36	2.17	2.00	1.84	1.69	1.58	1.48
25	4.58	4.27	3.92	3.61	3.35	3.04	2.69	2.48	2.29	2.10	1.93	1.80	1.70
30	5.21	4.81	4.41	4.06	3.77	3.31	3.03	2.80	2.58	2.37	2.18	2.03	1.91
35	5.80	5.35	4.91	4.52	4.19	3.69	3.37	3.11	2.86	2.63	2.42	2.26	2.13
40	6.37	5.89	5.39	4.97	4.61	4.05	3.71	3.42	3.15	2.89	2.67	2.49	2.34
45	6.95	6.43	5.88	5.43	5.03	4.43	4.06	3.74	3.44	3.16	2.91	2.72	2.56
50	7.53	6.95	6.36	5.89	5.45	4.80	4.40	4.05	3.73	3.42	3.16	2.94	2.77
55	8.11	7.48	6.86	6.34	5.87	5.17	4.74	4.37	4.02	3.69	3.40	3.17	2.99
60	8.71	8.02	7.35	6.79	6.29	5.53	5.08	4.68	4.31	3.95	3.64	3.39	3.20
70	9.86	9.09	8.33	7.70	7.13	6.27	5.76	5.30	4.89	4.49	4.14	3.86	3.63
80	11.02	10.17	9.31	8.61	7.98	7.00	6.43	5.92	5.46	5.02	4.62	4.31	4.06
90	12.18	11.25	10.30	9.52	8.82	7.74	7.11	6.54	6.04	5.55	5.12	4.77	4.49
100	13.34	12.33	11.29	10.43	9.66	8.4	7.79	7.18	6.62	6.08	5.60	5.22	4.91

Fuente: NPCS board of consultants & Engineers (2017)

En la tabla 2, se muestra los volúmenes de carbonatación típicos y sus g/L respectivos para diferentes tipos de bebidas carbonatas.

Tabla 2

Niveles de carbonatación típicos para diferentes bebidas carbonatadas

Tipo de producto	Niveles de carbonatación típicos	
	Volúmenes	g/L
Bebida ligera de baja caloría	2.0	4
Bebida carbonatada con jugo de fruta	2.5	5
Limonada	3.0–3.5	6–7
Cola	4.0	8
Bebida de otros sabores	4.5–5.0	9–10

Fuente: NPCS board of consultants & Engineers (2017)

2.2.6. Carbonatador

En su forma básica, un carbonatador permite un contacto cercano entre el CO₂ gas y el líquido a ser carbonatado. Los factores determinantes del grado de carbonatación son:

- La presión en el sistema
- La temperatura en el líquido. Si la temperatura disminuye, la solubilidad del CO₂ en el líquido se incrementa
- el tiempo durante el cual el líquido está en contacto con el CO₂
- el área de la interfaz de contacto entre el líquido y el CO₂,
- la receptividad (o afinidad) del líquido al dióxido de carbono: el agua es más receptiva al CO₂ que las soluciones de azúcar o sal.
- la presencia de otros gases mezclados con el dióxido de carbono: dependiendo de sus cantidades y solubilidades, las proporciones de estos gases extraños se disolverán en lugar de CO₂.

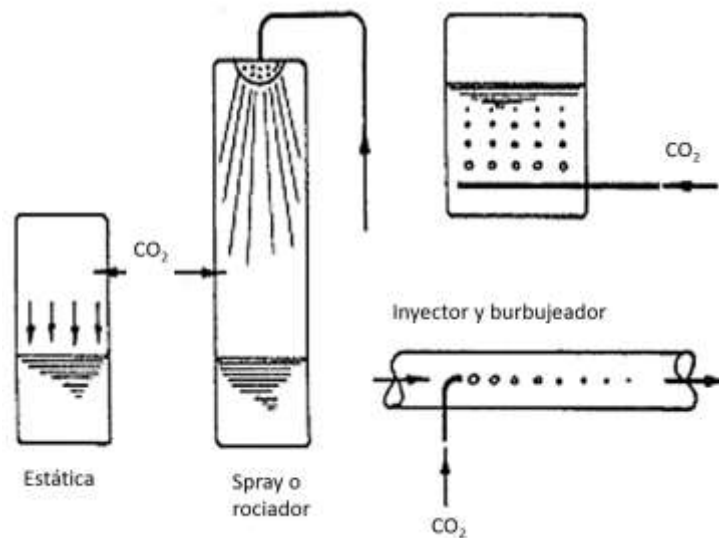


De estos seis factores, la presión, el tiempo de contacto y el área de contacto se utilizan en la operación de todos los sistemas de carbonatación; Adicionalmente. En el carbonatador con enfriador integral se utilizan la variable de temperatura del líquido.

Los métodos mediante los cuales se obtiene la asociación estrecha del líquido y el dióxido de carbono son bastante limitados: los principios fundamentales se muestran en la Figura 4 y todos los carbonatadores se basan en uno o más de estos diseños básicos.

Figura 4

Métodos de carbonatación básicos



Fuente: NPCS board of consultants & Engineers (2017)

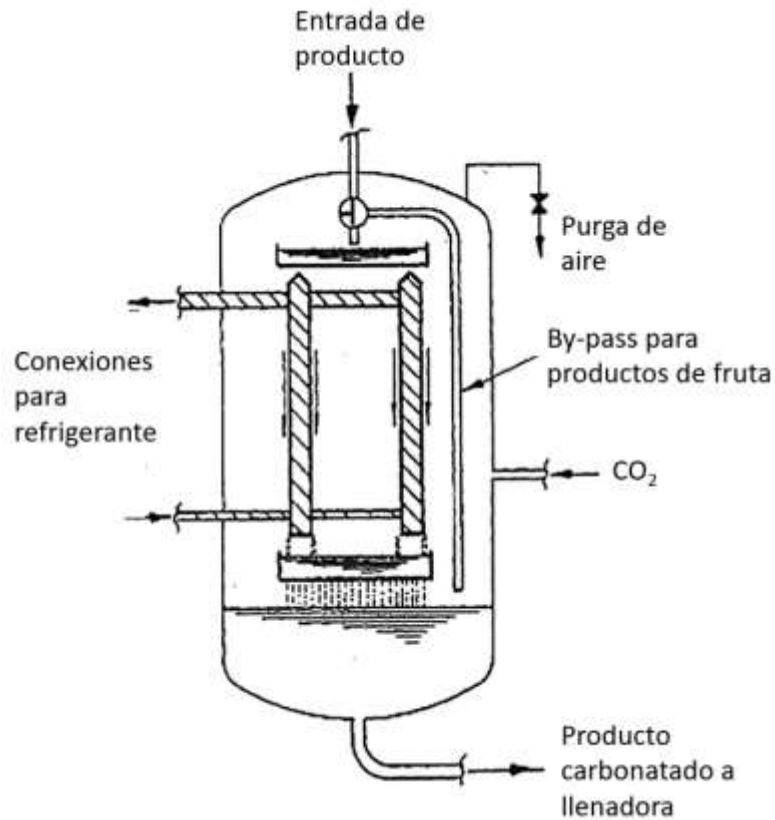
Los carbonatadores actuales se pueden dividir en dos grupos principales: los que carbonatan la mezcla del producto terminado de jarabe y agua, y los que carbonatan

solo agua, que luego se agrega al componente de jarabe. Los carbonatadores de productos terminados también pueden estar equipados con una instalación de enfriamiento que permite reducir la temperatura del producto a medida que se carbonata, y estas unidades a menudo se denominan 'carbo-enfriadores'. Posiblemente, el carbo-enfriador más conocido es la unidad Mojonnier que es de construcción de acero inoxidable y comprende una carcasa exterior que forma el recipiente de presión principal capaz de presiones internas de hasta aproximadamente 6 bar. Dentro de este recipiente de CO₂ presurizado hay varios módulos intercambiadores de calor verticales (el número real depende del caudal total de líquido) a través de los cuales pasa un refrigerante, generalmente amoníaco. Como se muestra en la Figura 5, el producto entrante se distribuye en canales desde los cuales fluye en películas controladas sobre las superficies onduladas de los módulos de enfriamiento: el producto tarda un tiempo finito en fluir por las superficies y también ofrece una superficie grande (y cambiante) área de contacto con el gas, cumpliendo así con dos de los factores de disolución del CO₂ mencionados anteriormente. El patrón de flujo relativamente agitado, junto con la característica de película delgada, también promueve una transferencia de calor eficiente del producto al refrigerante y esto asegura que la bebida se enfríe durante su paso por las placas.



Figura 5

Carbo-enfriador Mojonnier

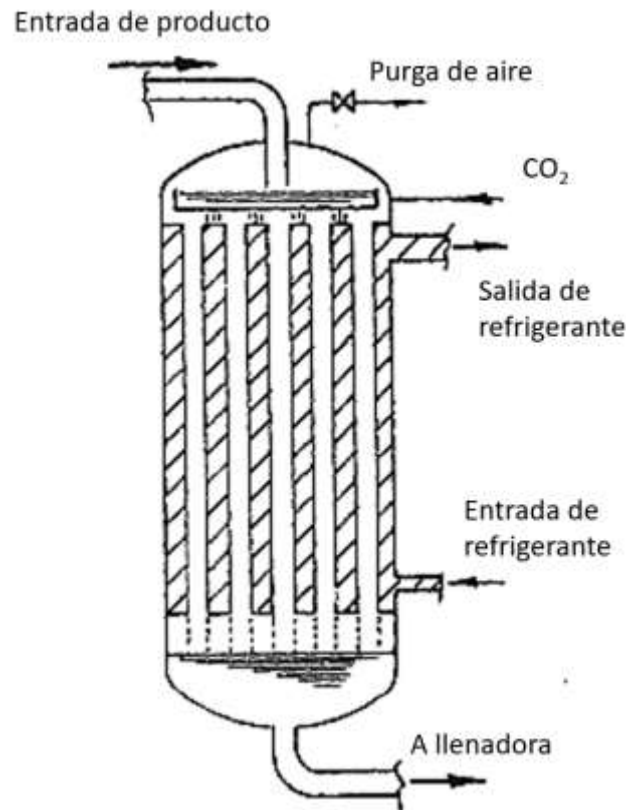


Fuente: NPCCS board of consultants & Engineers (2017)

Una unidad alternativa que opera con principios similares es el modelo Predosix fabricado por Simonazzi de Parma, Italia (ver figura 6). Un intercambiador de calor vertical de carcasa y tubos está ubicado dentro del recipiente principal y presurizado con CO₂. El producto fluye en películas delgadas por los orificios de los tubos y el refrigerante pasa a través de la carcasa del intercambiador de calor para efectuar el enfriamiento de la bebida.

Figura 6

Carbo-enfriador Predosix de Simonazzi



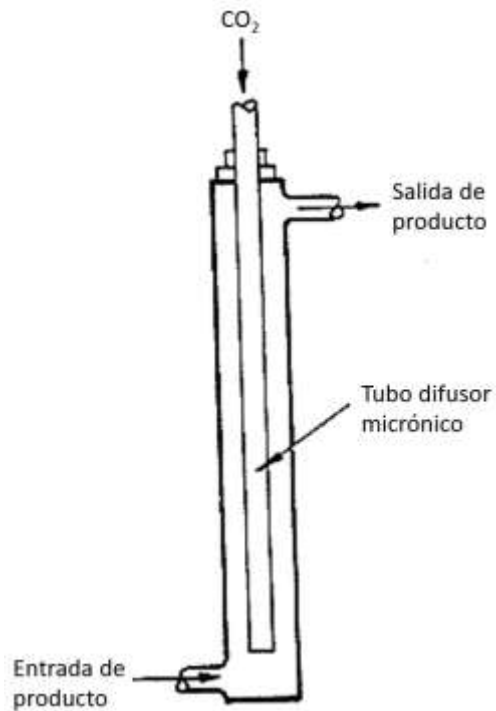
Fuente: NPCS board of consultants & Engineers (2017)

El dispositivo inyector de CO₂ utilizado para complementar la carbonatación en la torre principal no tiene por qué ser necesariamente de diseño sofisticado: es habitual insertar un grifo (perforado con varios orificios pequeños) en la corriente de producto, el resultado es una serie de pequeñas burbujas de gas que deben entrar en la solución antes de que el producto llegue a la torre carbonatadora. Un diseño de carbonatador que se basa en estos principios, se muestra en la figura 7. El equipo consta de un tubo difusor micrónico poroso dentro de una carcasa exterior de acero inoxidable; la tubería de gran diámetro produce una baja velocidad lineal

de flujo de producto que, junto con burbujas de CO₂ de tamaño micrométrico, asegura una disolución rápida y eficiente del gas. La bebida carbonatada se alimenta a un tanque estabilizador a través de un cabezal descendente por debajo del nivel del líquido y una placa deflectora evita salpicaduras y turbulencias. Una característica adicional es una bobina estabilizadora serpentina incorporada de 100 mm de diámetro a través del cual la bebida viaja antes de ingresar a la tubería que alimenta la llenadora: por lo tanto, cualquier burbuja de gas arrastrada tiene la oportunidad de disolverse por completo antes de que el producto se someta a la operación de llenado, donde el CO₂ no disuelta podría crear problemas.



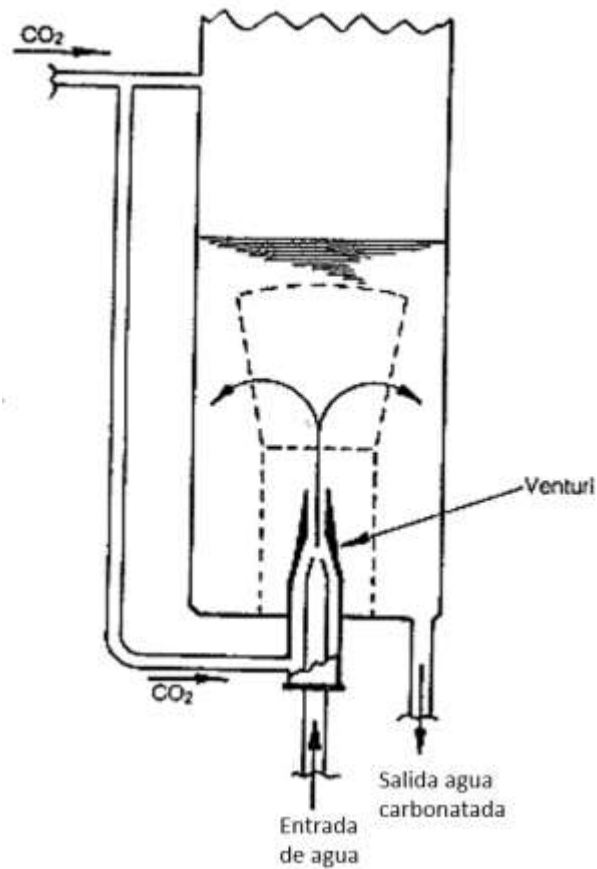
Figura 7
Unidad de infusión de CO₂ Crown-Century



Fuente: NPCS board of consultants & Engineers (2017)

Ampliamente utilizada durante más de veinte años es la unidad Intermix de Ortmann and Herbst GmbH de Hamburgo, Alemania, que inyecta el agua verticalmente en la base del carbonatador, incorporando CO₂, a través de una disposición Venturi como se muestra en la figura 8. Se fomenta alta turbulencia y agitación y el fabricante afirma que se puede obtener el 98% de saturación total.

Figura 8
Carbonatador de agua "Intermix"



Fuente: NPCS board of consultants & Engineers (2017)

2.2.7. Tecnología de microburbujas

Las microburbujas (G. Kaushik and A., Chel, 2014) se definen como burbujas extremadamente pequeñas con diámetros del orden de $10\ \mu\text{m}$ (por lo general, entre 10^{-4} y 10^{-6} m de diámetro). Comparados con las miliburbujas, que tienen diámetros del orden de pocos milímetros, las microburbujas tienen características distintas que resultan de sus pequeños tamaños y gran superficie asociada a relaciones de volumen y menor flotabilidad.

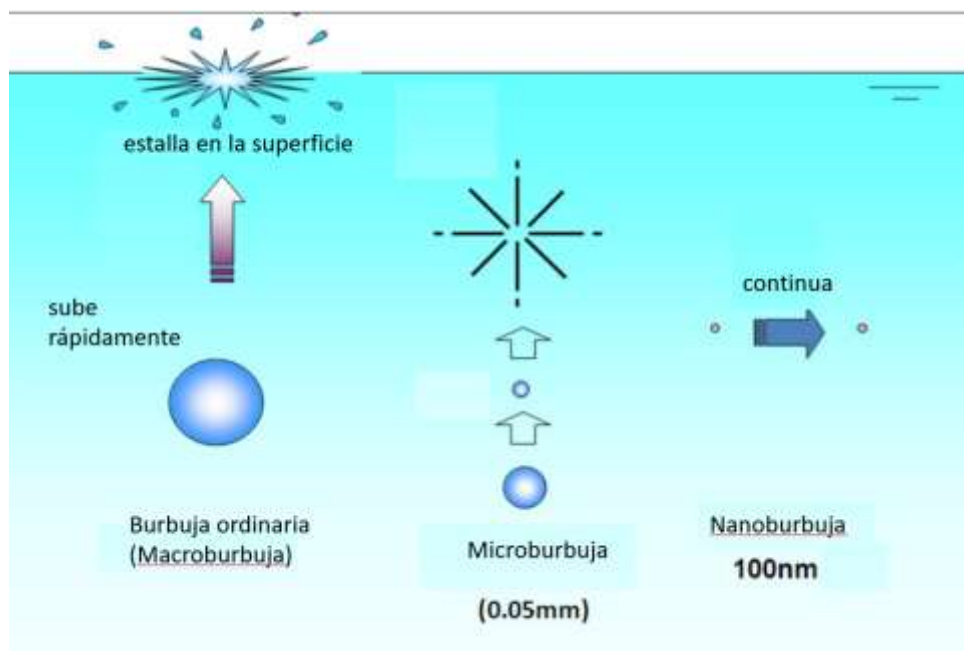
Las microburbujas tienen varias propiedades que se diferencian de las burbujas macroscópicas. Por ejemplo, las burbujas más pequeñas tienen una flotabilidad más baja, por lo que ascienden más lentamente a la superficie del líquido, proporcionando tiempos de permanencia más largos en el líquido (ver figura 9). Esto puede resultar en tasas de transferencia de masa muy altas durante estos tiempos de residencia más largos. Cuanto más pequeña es la burbuja, mayor es el área interfacial específica, lo que mejora la adsorción física eficiente con la solución y la superficie de la burbuja. La fuerza impulsora para la transferencia de masa desde la fase gaseosa al líquido circundante aumenta con la disminución del tamaño de la burbuja. La solubilidad del gas y las reacciones químicas en el límite gas/líquido se mejoran inyectando múltiples microburbujas en oposición al medio de aireación normal de burbujas macroscópicas.

Los métodos convencionales de generación de burbujas involucran boquillas u orificios. Las burbujas finas generalmente se producen usando medios porosos, boquillas de flujo constante, membranas o rociadores de gas combinados con mezcladores o impulsores. Sin embargo, es difícil generar microburbujas usando estas técnicas debido a la dificultad para prevenir la coalescencia de las burbujas. Además, las burbujas generadas por estos procesos tienen distribuciones de tamaño altamente polidispersas. Por lo tanto, se están desarrollando nuevas técnicas para la generación de microburbujas que se pueden clasificar en tres categorías en términos de su mecanismo de eliminación: tipo de presurización, tipo de cavitación y tipo de flujo rotatorio.

The image shows two handwritten signatures in blue ink. The signature on the left is a stylized, cursive name that appears to be 'A. D. ...'. The signature on the right is also cursive and includes the number '25' written above the main text, possibly indicating a date or a specific reference.

Figura 9

Diagrama esquemático mostrando macro, micro y nano burbujas



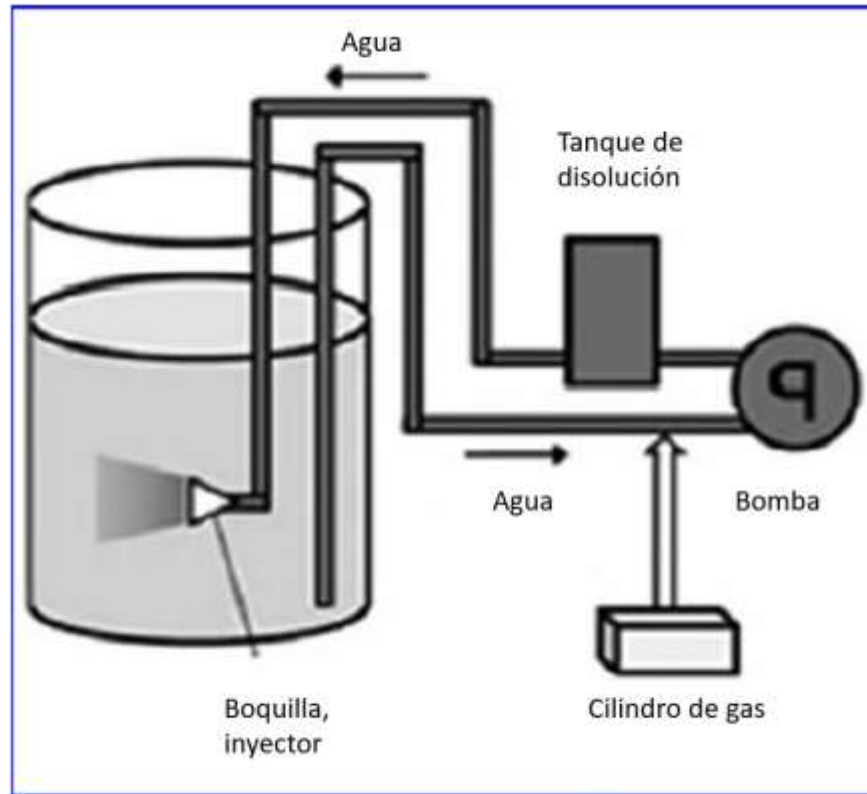
Fuente: G. Kaushik and A. Chel, 2014

La técnica de presurización para la generación de microburbujas se basa en la ley de Henry, que establece que mayores cantidades de gas se pueden disolver en líquido a una presión elevada (304-405 kPa) y cuando la presión se libera a una velocidad controlada, el gas disuelto se libera en forma de burbujas (ver figura 10). Específicamente, el gas deseado se disuelve en agua a alta presión hasta su límite de saturación. Las microburbujas se forman durante la liberación repentina de gas a una presión más baja. El tamaño de las burbujas generadas depende de la solubilidad del gas, la diferencia entre las dos presiones, la temperatura y las propiedades del líquido.

El bloque contiene dos firmas manuscritas en tinta azul. La primera es una firma estilizada que parece decir 'A. Chel'. La segunda es una firma más detallada que parece decir 'G. Kaushik'.

Figura 10

Presurización para generación de microburbujas



Fuente: G. Kaushik and A. Chel, 2014

En la técnica de Cavitación la presión local en un punto de un líquido cae por debajo de la presión de vapor del líquido a la temperatura ambiente local, el líquido experimenta un cambio de fase, creando grandes vacíos, denominados burbujas de cavitación. Se ha informado del uso de este fenómeno para generar microburbujas. El tubo Venturi es un ejemplo de este fenómeno.

2.2.8. Inyector Venturi

En la figura 11, se muestra un dispositivo Venturi que también es adecuado para aumentar los procesos de transferencia de gas a líquido en procesos de absorción.

Figura 11

Tubo Venturi



Fuente: <https://mazzei.net/es/agriculture-venturi-injectors/>

Two handwritten signatures in blue ink are located at the bottom right of the page. The first signature is a stylized name, and the second is a more complex signature with a date "25" written above it.

Los tubos Venturi se componen de tres partes:

1. Una sección de entrada cónica convergente en la que la sección transversal disminuye, lo que se traduce en un aumento de la velocidad del fluido y una disminución de la presión.
2. Una sección cilíndrica en la que se sitúa la toma de baja presión, y donde la velocidad del fluido se mantiene prácticamente constante.
3. Una tercera sección de salida cónica divergente en la que la sección transversal aumenta disminuyendo la velocidad y aumentando la presión.

Los Venturi son inyectores de presión diferencial con paletas mezcladoras internas. Los costes de funcionamiento de los inyectores son más bajos que los sistemas menos eficientes ya que no tienen partes móviles. Cuando el líquido a presión entra en la entrada del inyector, éste se estrecha hacia la cámara de inyección y ocurre cambios formando una corriente de chorro de alta velocidad. El aumento en la velocidad a través de cámara de inyección hace que ocurra una disminución de la presión absoluta, y se crea un vacío. De este modo se permite que un material (gas carbónico en nuestro caso), sea aspirado a través del puerto de succión y arrastrado en la corriente del líquido. A medida que la corriente de chorro se difunde hacia la salida del inyector, su velocidad se reduce y se reconvierte en energía de presión más baja.

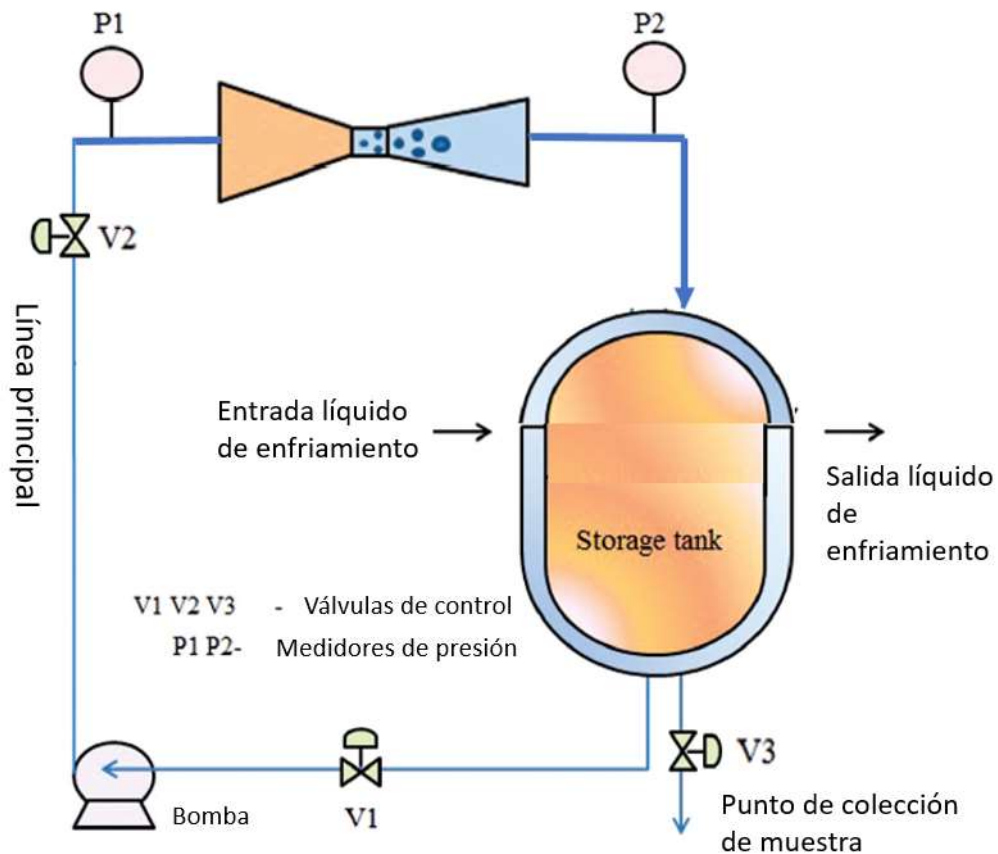
Los inyectores Venturi operan en un amplio rango de presiones y sólo requieren una diferencia de presión mínima entre los lados de entrada y de salida para iniciar un vacío en el puerto de succión. Los inyectores de paletas de mezcla internos crean miles de micro burbujas que aumenta en gran medida la superficie de gas (CO₂, oxígeno, ozono, etc.) en contacto con el líquido (hay que tener en cuenta que varias micro burbujas tienen un área de superficie mayor que una sola gran burbuja del mismo volumen).



Los inyectores Venturi se aplican en configuración experimental como el mostrado en la figura 12.

Figura 12

Sistema que incluye al Venturi



Fuente: Carpenter et al, 2016

2.2.9. Geometría del Venturi

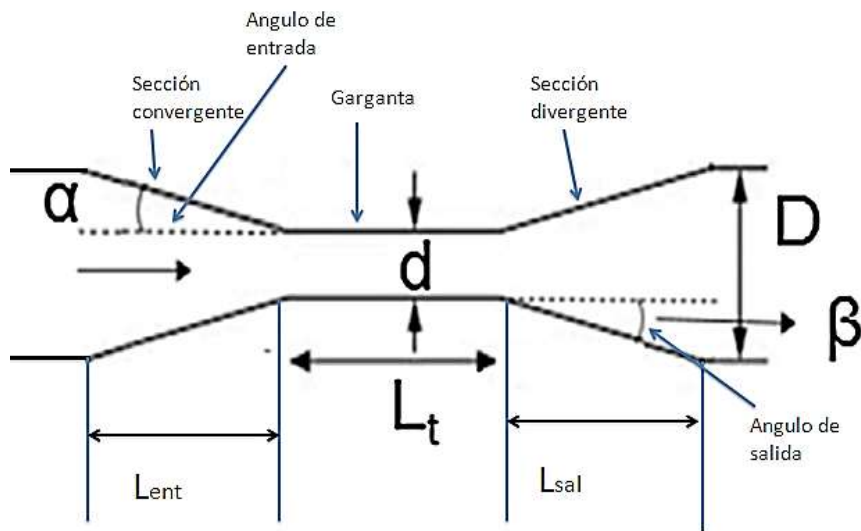
El diseño geométrico afecta significativamente la eficiencia de un dispositivo de cavitación. Para un rendimiento cavitación al óptimo, los parámetros tales como el número de cavidades generadas, el tiempo de residencia de las cavidades en la

región de baja presión, la tasa de recuperación de presión en la sección aguas abajo, la trayectoria de la cavidad y la intensidad de la cavidad son muy importantes (Bashir, 2011). Todas estas propiedades de cavitación se pueden regular variando la geometría de un dispositivo de cavitación.

Las características geométricas más importantes de un tubo Venturi se muestran en la figura 13.

Figura 13

Criterios geométricos de importancia en un tubo Venturi



Fuente: Mingda Li, 2019.

Donde:

α = Ángulo de entrada

β = Ángulo de salida

D = Diámetro del tubo

d = Diámetro de garganta

L_t = Longitud de garganta

L_{ent} = Longitud de entrada sección convergente

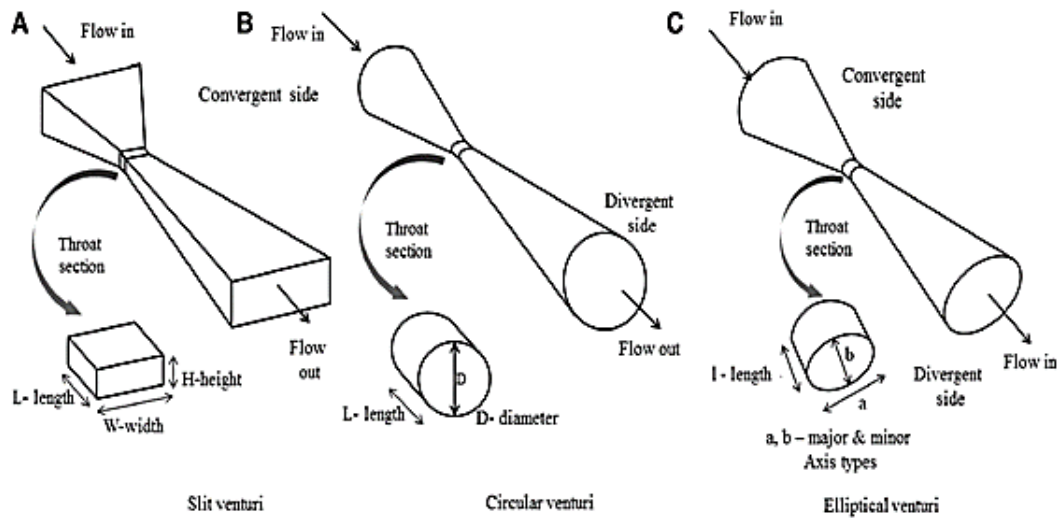
L_{sal} = Longitud de salida sección divergente

Un Venturi consiste en la sección convergente, la garganta y la sección divergente en la que la dinámica del flujo varía de manera considerable, pero no se produce una contracción y expansión repentina como se observa en un orificio. Se encuentra una variación sustancial en el flujo en secciones convergentes y divergentes y, por lo tanto, los parámetros de flujo, como la presión y la velocidad, varían constantemente a lo largo del Venturi.

El Venturi puede tener diferentes formas (ver figura 14), como rectangular, circular y elíptica. Los diferentes tamaños y formas de la garganta y la sección divergente establecen los criterios para las diferentes actividades de cavitación, es decir, puede alterar el número de eventos de cavitación, la magnitud de la presión de colapso y el tiempo de residencia de la cavidad en la región de baja presión.

Figura 14

Tubos Venturi: A) De tipo ranura, B) de tipo circular y C) De tipo elíptico



Fuente: Carpenter, 2016.

El Venturi es un dispositivo robusto y compacto que puede manejar altas presiones y por su diseño geométrico permite realizar mezclas vigorosas que son extremadamente útiles especialmente para la absorción de dióxido de carbono en

[Firma manuscrita]

una bebida. Para una absorción eficiente, se requiere de un alto grado de distribución del gas en la fase líquida (la gaseosa del dióxido de carbono y la líquida de la bebida) y permite una alta área de transferencia de ambas fases. El Venturi por su geometría permite micromezcla energética de fases y una alta área superficial ya que provoca la formación de microburbujas de gas. Si estos dos requisitos se asistieren con una disminución de temperatura de la fase líquida, se consigue un alto grado de absorción del CO₂, que es precisamente el objetivo de esta investigación.

2.2.10. Lecho empacado

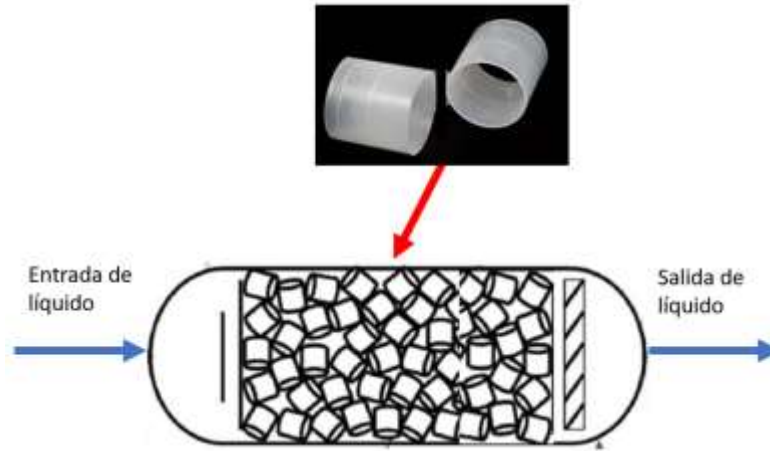
Una columna de empaque es comúnmente empleada para promover un contacto eficiente entre el gas y el líquido, debido a que ofrece una alta eficiencia para la transferencia de masa (de la fase gas a la fase líquida) incrementando la solubilidad y mayor absorción del dióxido de carbono en el proceso de carbonatación. El relleno del lecho empacado (muchos objetos de forma cilíndrica) se emplea como un instrumental que ayuda a crear un tiempo de contacto adecuado para alcanzar el equilibrio entre el líquido y el CO₂ durante el proceso de absorción, además de realzar el área de contacto entre los dos fluidos en su vigoroso movimiento al interior del equipo.

El anillo Raschig de plástico, es una especie de empaque de plástico insertado en forma aleatorio, tiene como ventajas una alta relación de vacíos, una caída de presión baja, unidad de altura de transferencia de masa alta, contacto de gas-líquido uniforme, alta eficiencia de transferencia de masa, entre otras. Los anillos Raschig están hechos de plásticos resistentes al calor, corrosión y químicos. Incluye el polietileno (PE), polipropileno (PP), polipropileno reforzado (RPP), cloruro de polivinilo (PVC), cloruro de polivinilo tratado con cloro (CPVC) y el fluoruro de polivinilideno (PVDF) para temperaturas de aplicación desde ambiente hasta los 150°C. En la figura 15, se puede observar la configuración de un lecho empacado.



Figura 15

Columna de lecho empacado con anillos Rasching de plástico



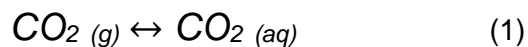
2.2.11. Conceptual

Se busca tener 4 volúmenes de CO₂ por cada volumen de bebida carbonatada en la bebida carbonatada. Esto debido a que bajo estas condiciones se tiene una bebida con la adecuada sensación efervescente y de formación de burbujas que es agradable al momento de su consumo, además de preservar el producto por más tiempo.

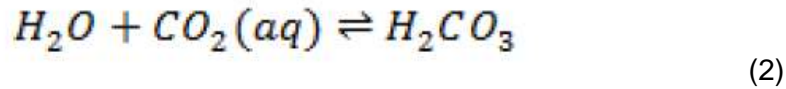
El sistema de carbonatación promueve lo siguiente (Mahmoud Al-Hindi and Fouad Azizi, 2018):

1) Disolución de CO₂ en agua

El CO₂ se disuelve en agua como sigue:



Two handwritten signatures in blue ink are present at the bottom right of the page. The first signature is on the left and the second is on the right, both appearing to be in cursive script.

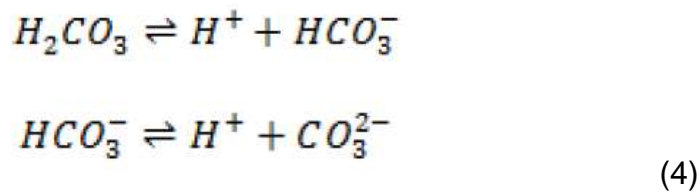


Donde la concentración de todo el CO₂ disuelto se denota por [H₂CO₃]. La condición de equilibrio es cuantificada por la ley de Henry:

$$H_{CO_2} = \frac{[H_2CO_3]}{P_{CO_2}} \quad (3)$$

Donde P_{CO₂} es la presión parcial de CO₂ en atm, H_{CO₂} es la constante de Henry en mol/L atm y [H₂CO₃] es la concentración de CO₂ disuelto en mol/L.

El H₂CO₃ se disocia en agua de acuerdo a lo siguiente:



Donde las constantes de disociación K₁ y K₂ en mol/L, están dados por:

$$K_1 = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_3]}$$

$$K_2 = \frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} \quad (5)$$

La constante de disociación del agua, K_w, está dado por:



$$K_w = 10^{-14} = [H^+][OH^-] \quad (6)$$

2) Mecanismos para facilitar la disolución de CO₂ en la bebida

En esta investigación se propone para la disolución del CO₂ en la bebida, el empleo de técnicas que promuevan la formación de microburbujas (a través del inyector Venturi) y un área interfacial elevada entre las fases gas y líquida (a través del inyector Venturi y columna de empaque en el sistema de carbonatación) de tal forma que se mejore la eficiencia de la disolución de CO₂, todo en un sistema compacto. Además, se promoverá la mayor disolución de CO₂ a bajas temperaturas (4-8 °C) y presiones medias (20-30 psi) que son condiciones donde el proceso de absorción se ve favorecido.

2.3. Definición de términos básicos

Carbonatación: Absorción del CO₂ en la bebida jarabeada.

Equilibrio de fases: Implica que el potencial químico de cada componente es la misma en cada fase. También se debe tener equilibrio térmico (misma temperatura en cada fase) y misma presión en cada fase (equilibrio mecánico).

Carbonatador: Sistema que permite un contacto cercano entre el CO₂ gas y el líquido a ser carbonatado, de tal forma que facilita la disolución del gas en el líquido.

Venturi: Dispositivo que consiste de una sección convergente, la garganta y una sección divergente en la que la dinámica del flujo varía de manera considerable

Lecho empacado: Tubería que contiene un material de empaque. El empaque consiste de objetos pequeños como anillos Raschig llenados aleatoriamente. El objetivo del lecho empacado es ofrecer una mayor área interfacial para el contacto de las fases.



III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis General

Optimizar el proceso de absorción de dióxido de carbono en bebida jarabeada mediante el empleo de un Venturi y un lecho empacado.

3.1.2. Hipótesis Específicas

- Empleando como configuración un Venturi, un lecho empacado y un tanque de almacenamiento de bebida final permiten conseguir una buena absorción de CO₂ en la bebida.
- Las condiciones en las cuales se obtiene una absorción eficiente de CO₂ en bebidas similar a un sistema convencional empleando un Venturi, lecho empacado y tanque de almacenamiento son: temperatura de bebida 4-6 °C, presión de bebida 2 bar y presión de entrada al Venturi 2,8-3 bar.

3.2. Definición conceptual de variables

Las variables independientes: X₁, X₂

X₁: Temperatura de bebida

X₂: presión cámara de mezcla

Variable dependiente

Y: Volúmenes de CO₂ en la bebida



3.3. Operacionalización de la variable

La tabla 3, muestra la operacionalización de variables para la variable dependiente (Y=volumen de CO₂ en la bebida) y las variables independientes (X₁=Temperatura de la bebida y X₂=Presión de cámara de mezcla)

$$Y = f(X_1, X_2) \quad (7)$$

Tabla 3

Operacionalización de variables

VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOS
Y= volumen de CO ₂ en la bebida		Volúmenes de CO ₂ /1 volumen de bebida	Carta de carbonatación
VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOS
X ₁ = Temperatura de la bebida		°C	Sensor de temperatura con pantalla digital
X ₂ = Presión de cámara de mezcla		bar	Manómetro



IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1. Tipo y diseño de la investigación

La investigación es de tipo experimental.

4.2. Método de investigación

4.2.1. Construcción del Módulo de Carbonatación

El módulo de carbonatación es un sistema está constituido por una cámara de 20 litros (figura 16), una bomba centrífuga (figura 17), un lecho empacado de 80 cm altura por 10 cm diámetro en cuyo interior contiene como relleno material de polietileno en forma de tubos cilíndricos de 18 mm de altura por 6 mm de diámetro (figura 18), un inyector Venturi de $\frac{1}{2}$ " (figura 19) y un sistema de enfriamiento.

Figura 16

Tanque de almacenamiento bebida carbonatada



Figura 17
Bomba Centrífuga sanitaria Inoxidable de presión



Figura 18
Lecho empacado con relleno de polietileno de alta densidad



Deby

Guadalupe

Figura 19
Inyector Venturi Mazzei de ½ diámetro



En las figuras 20 y 21 se muestran las dos configuraciones probadas. La segunda configuración (figura 21) fue la mejor, ya que el aislamiento del tanque de almacenamiento permite que la temperatura del líquido se mantenga por más tiempo a temperaturas bajas, favoreciendo el proceso de carbonatación.

Figura 20
Primera configuración del módulo de carbonatación



Deby

Guadalupe

Figura 21
Segunda configuración del módulo de Carbonatación



Los siguientes equipos se emplearon para determinar los valores de variables y datos de muestras: Sensor de temperatura digital (figura 22), manómetro de presión de 0 – 7 Bar (figura 23) y manómetro presión 0 – 4 Bares (figura 24).

Two handwritten signatures in blue ink. The first signature is on the left and the second is on the right, both appearing to be the same person's name.

Figura 22
Sensor digital de temperatura



Figura 23
Manómetro de medición de presión al ingreso del Venturi



A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'D. Cruz'.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Gustavo'.

Figura 24

Manómetro de cámara del almacenamiento bebida carbonatada



4.2.2. Agua para bebida carbonatada

El tratamiento del agua es fundamental para la elaboración de bebidas, y de este dependerá el nivel de absorción del CO₂ como también del sabor y calidad de la bebida final.

El agua utilizada para las pruebas, fue obtenida de la nueva planta de Osmosis inversa del laboratorio de operaciones unitarias (LOPU) y llevada por un proceso de mezcla a una alcalinidad de 50 mg/L y una conductividad de 130 μ S/cm (figura 25). Agua con estos valores de parámetros son utilizados en las Industria de bebidas en general.

Figura 25
Conductividad de agua



4.2.3. Preparación de la Bebida Jarabeada

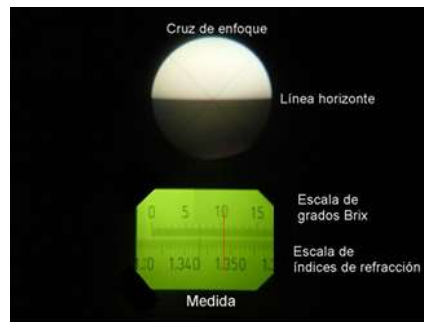
Para la prueba se preparó 18 kg de una bebida jarabeada de sabor cola a 10.5 °Brix. Para ello se disolvió 1,9 kg de azúcar blanca refinada sacarosa grado ICUMSA en 16,1 kg de agua tratada, luego se adiciono 10 ml de concentrado de cola negra sabor a vainilla hasta su disolución completa. Se llevó a reposo por 30 minutos.

Posteriormente, se tomó una muestra de la bebida jarabeada y se determinó los siguientes datos empleando un refractómetro ABBE (figura 26): Temperatura 20 °C; Grados 10.5 °Brix

Two handwritten signatures in blue ink are shown side-by-side. The signature on the left is stylized and appears to be 'A. Rojas'. The signature on the right is also stylized and appears to be 'G. García'.

Figura 26

Determinación grados Brix de bebida preparada jarabeada



4.2.4. Características del CO₂

El CO₂ utilizado en las pruebas, se adquirió del distribuidor Oxinsa SAC, cuyo proveedor es PRAXAIR. El tanque de CO₂ con sistema de válvulas para regulación de flujo se muestra en la (figura 27). Especificaciones del CO₂ se dan en la tabla 4.

Figura 27

Tanque de CO₂ con válvulas de regulación de flujo



[Firma manuscrita]

Tabla 4*Especificaciones del CO₂ usados en la Industria de Bebidas Carbonatadas*

Componente	Concentration
CO ₂	99.9% v/v min
Humedad	20 ppm v/v max
Amoniaco	2.5 ppm v/v max
Oxidos de Nitrogeno (NO ₂ /NO)	30 ppm v/v max
Residuos no volatiles (particulas)	2.5 ppm v/v max each
Residuos organicos no volatiles	10 ppm v/v max
Fosfina	0.3 ppm v/v max
Hidrocarburos volatiles total como metano	50 ppm v/v max of which 20 ppm v/v max hydrocarbons
Acetaldehido	0.2 ppm v/v max
Hidrocarburos aromaticos	0.02 ppm v/v max
Metanol	10 ppm v/v max
Cianuro de Hidrogeno	0.5 ppm v/v max
Sulfuro Total (S)	0.1 ppm v/v max
Sabor y olor en agua	Sin sabor y olor extraños
Apariencia en agua	Sin color o turbiedad
Olor y apariencia del CO ₂	Sin olores extraños o apariencia

Fuente: Eiga (2016)

4.2.5 Proceso de carbonatación

En el módulo de carbonatación (mostrado en la figura 21), se cargó con 18 kg de bebida jarabeada que tenía 10.5 °Brix, luego se procedió a emplear el sistema de enfriamiento para disminuir la temperatura de la bebida jarabeada. La bebida a la temperatura de prueba, es bombeada a través del Venturi, lecho de relleno y tanque de almacenamiento en varios ciclos hasta tener todo el sistema enfiado. Luego se procede a dosificar CO₂ para realizarse el proceso de carbonatación.

Durante el proceso se hace el control de la regulación del sistema de dosificación (figura 28) con un flujo de CO₂ de 0.98 g/s manteniendo el caudal de la bebida jarabeada a 0.12 L/s para una temperatura de 4 °C. Se realiza el mismo procedimiento para temperaturas de 6 °C y 8 °C hasta llegar el estado estacionario.

Figura 28
Dosificación del CO₂ a través del Venturi



Las temperaturas y presiones que se establecieron en las pruebas experimentales, son de operación comúnmente empleadas en la práctica industrial. Son parámetros que se utilizan para la producción de bebidas a gran escala. Valores de temperaturas y presiones que se han utilizado se muestran en la tabla 5.

Tabla 5
Temperaturas, presiones y flujo de pruebas experimentales

Prueba	Temperatura de jarabe en tanque almacenamiento, °C	Presión de carbonatación en tanque de almacenamiento, psi	Presión a ingreso del Venturi, psi	Caudal bebida jarabeada, L/s
1	4	24.0	40	0.12
2	6	27.0	40	0.12
3	8	30.5	40	0.12

Una vez alcanzada la presión de carbonatación dada en la tabla 5, se cierra la dosificación del CO₂, luego se continua con el proceso de homogenización empleando la bomba, hasta equilibrar la presión final de carbonatación para cada temperatura de prueba.

Durante las pruebas experimentales, también se controló los tiempos de carbonatación hasta alcanzar la presión de carbonatación para 4 volúmenes de CO₂ por cada volumen de bebida, para cada temperatura seleccionada.

4.3 Población y muestra

La población y muestra utilizada fue de 18 Kg de bebida jarabeada con 10.5 °Brix.

4.4 Lugar de estudio y periodo desarrollado

El lugar donde se desarrollaron las pruebas experimentales fue en el Laboratorio de Operaciones Unitarias LOPU de la FIQ, entre Setiembre 2019 hasta 30 de noviembre del 2020.

4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

Los instrumentos utilizados para recolección de datos durante las pruebas fueron:

- Módulo de carbonatación, consta de: Bomba de presión, Venturi de ½ pulgada Mazzei, Columna de empaque con anillos cilíndricos de polietileno, cámara de equilibrio del producto,
- Balanza digital de 10 kg
- Rotámetro
- Potenciómetro HANNA
- Conductímetro SI Analytics
- Refractómetro ABBE
- Manómetros de presión con escalas de medición: 0 a 7 bares y 0 a 4 bares



- Sensor de temperatura digital (rango de operación: -10 °C hasta 150 °C) e infrarrojo IR.

4.6 Análisis y procesamiento de datos

Empleando los valores de presión y temperatura dados en la tabla 5, y empleando la carta de volumen de gas se obtiene:

Prueba 1:

Temperatura de operación: 4 °C (39,2 °F)

Presión de operación: 24 psi

De tabla de volumen de gas (figura 29):

Se obtiene 4,05 volúmenes de CO₂/volumen de bebida

Figura 29

Volumen de CO₂ a 39,2 °F y 24 psi

Anexo N° 1 Tabla de volumen de gas.

	PRESION (Libras/inch ²)																														
	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	15.0	15.5	16.0	16.5	17.0	17.5	18.0	18.5	19.0	19.5	20.0	20.5	21.0	21.5	22.0	22.5	23.0	23.5	24.0	24.5	
32	3.62	3.68	3.74	3.80	3.85	3.91	3.97	4.03	4.09	4.15	4.21	4.27	4.33	4.39	4.44	4.50	4.56	4.62	4.68	4.74	4.80	4.86	4.92	4.98	5.04	5.10	5.16	5.22	5.28	5.34	5.40
33	3.56	3.62	3.68	3.74	3.79	3.85	3.91	3.97	4.03	4.08	4.14	4.20	4.26	4.32	4.37	4.43	4.49	4.55	4.61	4.67	4.73	4.79	4.85	4.91	4.97	5.03	5.09	5.15	5.21	5.27	5.33
34	3.50	3.56	3.62	3.68	3.73	3.79	3.85	3.90	3.96	4.02	4.08	4.13	4.19	4.25	4.30	4.36	4.42	4.47	4.53	4.59	4.65	4.71	4.77	4.83	4.89	4.95	5.01	5.07	5.13	5.19	5.25
35	3.45	3.50	3.56	3.62	3.67	3.73	3.78	3.84	3.90	3.95	4.01	4.06	4.12	4.18	4.23	4.29	4.34	4.40	4.46	4.52	4.58	4.64	4.70	4.76	4.82	4.88	4.94	5.00	5.06	5.12	5.18
36	3.39	3.44	3.50	3.55	3.61	3.66	3.72	3.78	3.83	3.88	3.94	4.00	4.05	4.11	4.16	4.22	4.27	4.33	4.39	4.45	4.51	4.57	4.63	4.69	4.75	4.81	4.87	4.93	4.99	5.05	5.11
37	3.33	3.38	3.44	3.49	3.55	3.60	3.66	3.71	3.76	3.82	3.87	3.93	3.98	4.04	4.09	4.14	4.20	4.26	4.32	4.38	4.44	4.50	4.56	4.62	4.68	4.74	4.80	4.86	4.92	4.98	5.04
38	3.27	3.33	3.38	3.43	3.49	3.54	3.59	3.65	3.70	3.75	3.81	3.86	3.91	3.96	4.02	4.07	4.13	4.19	4.25	4.31	4.37	4.43	4.49	4.55	4.61	4.67	4.73	4.79	4.85	4.91	4.97
39	3.21	3.27	3.32	3.37	3.42	3.48	3.53	3.58	3.63	3.68	3.74	3.79	3.84	3.90	3.95	4.01	4.07	4.13	4.19	4.25	4.31	4.37	4.43	4.49	4.55	4.61	4.67	4.73	4.79	4.85	4.91
40	3.15	3.21	3.26	3.31	3.36	3.41	3.46	3.51	3.57	3.62	3.67	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.98	4.04	4.10	4.16	4.22	4.28	4.34	4.40	4.46	4.52	4.58	4.64	4.70	4.76	4.82

Prueba 2:

Temperatura de operación: 6 °C (42,8 °F)

Presión de operación: 27 psi

De tabla de volumen de gas (figura 30):

Se obtiene 4,04 volúmenes de CO₂/volumen de bebida

Figura 30

Volumen de CO₂ a 42,8 °F y 27 psi

Anexo N° 1 Tabla de volumen de gas.

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

Prueba 3:

Temperatura de operación: 8 °C (46,4 °F)

Presión de operación: 30,5 psi

De tabla de volumen de gas (figura 31):

Se obtiene (4,11+4,03) / 2 = 4,07 volúmenes de CO₂/volumen de bebida

Figura 31

Volumen de CO₂ a 46,4 °F y 30,5 psi

Anexo N° 1 Tabla de volumen de gas.

TEMPERATURA (°F)	PRESION (Libras/pulg ²)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	17,5	18,5	19,5	20,5	21,5	22,5	23,5	24,5	25,5	26,5	27,5	28,5	29,5	30,5	31,5	32,5	33,5	34,5	35,5	36,5	37,5	38,5	39,5	40,5	41,5	42,5	43,5	44,5	45,5	46,5	47,5	48,5	49,5	50,5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
17,5	3,62	3,68	3,74	3,80	3,85	3,91	3,97	4,03	4,09	4,15	4,21	4,27	4,33	4,39	4,44	4,50	4,56	4,62	4,68	4,74	4,80	4,86	4,92	4,98	5,04	5,10	5,16	5,22	5,28	5,34	5,40	5,46	5,52	5,58	5,64	5,70	5,76	5,82	5,88	5,94	6,00	6,06	6,12	6,18	6,24	6,30	6,36	6,42	6,48	6,54	6,60	6,66	6,72	6,78	6,84	6,90	6,96	7,02	7,08	7,14	7,20	7,26	7,32	7,38	7,44	7,50	7,56	7,62	7,68	7,74	7,80	7,86	7,92	7,98	8,04	8,10	8,16	8,22	8,28	8,34	8,40	8,46	8,52	8,58	8,64	8,70	8,76	8,82	8,88	8,94	9,00	9,06	9,12	9,18	9,24	9,30	9,36	9,42	9,48	9,54	9,60	9,66	9,72	9,78	9,84	9,90	9,96	10,02	10,08	10,14	10,20	10,26	10,32	10,38	10,44	10,50	10,56	10,62	10,68	10,74	10,80	10,86	10,92	10,98	11,04	11,10	11,16	11,22	11,28	11,34	11,40	11,46	11,52	11,58	11,64	11,70	11,76	11,82	11,88	11,94	12,00	12,06	12,12	12,18	12,24	12,30	12,36	12,42	12,48	12,54	12,60	12,66	12,72	12,78	12,84	12,90	12,96	13,02	13,08	13,14	13,20	13,26	13,32	13,38	13,44	13,50	13,56	13,62	13,68	13,74	13,80	13,86	13,92	13,98	14,04	14,10	14,16	14,22	14,28	14,34	14,40	14,46	14,52	14,58	14,64	14,70	14,76	14,82	14,88	14,94	15,00	15,06	15,12	15,18	15,24	15,30	15,36	15,42	15,48	15,54	15,60	15,66	15,72	15,78	15,84	15,90	15,96	16,02	16,08	16,14	16,20	16,26	16,32	16,38	16,44	16,50	16,56	16,62	16,68	16,74	16,80	16,86	16,92	16,98	17,04	17,10	17,16	17,22	17,28	17,34	17,40	17,46	17,52	17,58	17,64	17,70	17,76	17,82	17,88	17,94	18,00	18,06	18,12	18,18	18,24	18,30	18,36	18,42	18,48	18,54	18,60	18,66	18,72	18,78	18,84	18,90	18,96	19,02	19,08	19,14	19,20	19,26	19,32	19,38	19,44	19,50	19,56	19,62	19,68	19,74	19,80	19,86	19,92	19,98	20,04	20,10	20,16	20,22	20,28	20,34	20,40	20,46	20,52	20,58	20,64	20,70	20,76	20,82	20,88	20,94	21,00	21,06	21,12	21,18	21,24	21,30	21,36	21,42	21,48	21,54	21,60	21,66	21,72	21,78	21,84	21,90	21,96	22,02	22,08	22,14	22,20	22,26	22,32	22,38	22,44	22,50	22,56	22,62	22,68	22,74	22,80	22,86	22,92	22,98	23,04	23,10	23,16	23,22	23,28	23,34	23,40	23,46	23,52	23,58	23,64	23,70	23,76	23,82	23,88	23,94	24,00	24,06	24,12	24,18	24,24	24,30	24,36	24,42	24,48	24,54	24,60	24,66	24,72	24,78	24,84	24,90	24,96	25,02	25,08	25,14	25,20	25,26	25,32	25,38	25,44	25,50	25,56	25,62	25,68	25,74	25,80	25,86	25,92	25,98	26,04	26,10	26,16	26,22	26,28	26,34	26,40	26,46	26,52	26,58	26,64	26,70	26,76	26,82	26,88	26,94	27,00	27,06	27,12	27,18	27,24	27,30	27,36	27,42	27,48	27,54	27,60	27,66	27,72	27,78	27,84	27,90	27,96	28,02	28,08	28,14	28,20	28,26	28,32	28,38	28,44	28,50	28,56	28,62	28,68	28,74	28,80	28,86	28,92	28,98	29,04	29,10	29,16	29,22	29,28	29,34	29,40	29,46	29,52	29,58	29,64	29,70	29,76	29,82	29,88	29,94	30,00	30,06	30,12	30,18	30,24	30,30	30,36	30,42	30,48	30,54	30,60	30,66	30,72	30,78	30,84	30,90	30,96	31,02	31,08	31,14	31,20	31,26	31,32	31,38	31,44	31,50	31,56	31,62	31,68	31,74	31,80	31,86	31,92	31,98	32,04	32,10	32,16	32,22	32,28	32,34	32,40	32,46	32,52	32,58	32,64	32,70	32,76	32,82	32,88	32,94	33,00	33,06	33,12	33,18	33,24	33,30	33,36	33,42	33,48	33,54	33,60	33,66	33,72</

Una vez alcanzada la presión de carbonatación determinado por las tablas se cierra la dosificación del CO₂, luego se continua con el proceso de homogenización hasta equilibrar la presión final de carbonatación para cada temperatura de prueba.

Durante las pruebas experimentales se controló los tiempos de carbonatación hasta alcanzar la presión de carbonatación para 4 volúmenes de CO₂ para cada temperatura seleccionada.



IV. RESULTADOS

5.1 Resultados descriptivos

El agua tratada de la planta de Osmosis Inversa tiene los siguientes resultados,

Olor	: Insípido
Sabor	: Agradable
pH	: 7.02
Alcalinidad como CaCO ₃	: 50 mg/L
Conductividad	: 130 $\mu S/cm$

Azúcar Blanca refinada Grado ICUMSA

Bebida jarabeada	
Grados Brix	: 10.5°Brix
pH	: 6.50

Bebida Carbonatada	
Grados Brix	: 10.5°Brix
pH	: 4.0

Presiones para la carbonatación:

Calculo para 4 °C = 39.2 °F:

Para propósitos prácticos de cálculo, la presión requerida para carbonatar una bebida a 39.2 °F de manera que se pueda mantener 4 volúmenes de CO₂ es,

Solubidad CO₂ a 60°F = 1 volumen

Solubidad CO₂ a 32°F = 1.7 volúmenes

$$\text{Solubidad CO}_2 \text{ a } 39.2^\circ F = 1 + \frac{(1.7 - 1) * (60 - 39.2)}{(60 - 32)} = 1.52$$

El volumen de gas requerido en las bebidas jarabeadas es 4 volúmenes de CO₂.



Entonces, es necesario elevar el volumen en 2.5, es decir entre 1,5 a 4 sobre la solubilidad atmosférica de 1,5 volúmenes de CO₂ a 39,2 °F,

Entonces la presión de carbonatación requerida será,

$$P_{CO_2 \text{ requerida}} = \frac{15 * 2.5}{1.52} = \mathbf{24.7 \text{ psi}}$$

Calculo para 6 °C = 42.8 °F:

$$\text{Solubidad } CO_2 \text{ a } 42.8^\circ F = 1 + \frac{(1.7 - 1) * (60 - 42.8)}{(60 - 32)} = 1.43$$

Entonces la presión de carbonatación requerida será,

$$P_{CO_2 \text{ requerida}} = \frac{15 * 2.5}{1.43} = \mathbf{26.2 \text{ psi}}$$

Calculo para 8 °C = 46.4 °F:

$$\text{Solubidad } CO_2 \text{ a } 46.4^\circ F = 1 + \frac{(1.7 - 1) * (60 - 46.4)}{(60 - 32)} = 1.34$$

Entonces la presión de carbonatación requerida será,

$$P_{CO_2 \text{ requerida}} = \frac{15 * 2.5}{1.34} = \mathbf{28.0 \text{ psi}}$$



Después de las pruebas experimentales, se han obtenido los resultados dados en la tabla 6.

Tabla 6
Resultados de pruebas experimentales

Prueba No	Temperatura °C	Temperatura °F	Masa total de CO ₂ suministrada al tanque de almacenamiento, g	Tiempo de carbonatación, s	Presión de carbonatación, psi
1	4	39,2	148,0	150,0	24,7
2	6	42,8	148,2	156,4	27,0
3	8	46,4	149,1	164,1	30,5

5.2 Resultados inferenciales

No se aplicó a la presente investigación.



VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contratación y demostración de la hipótesis con los resultados

Para corroborar nuestros resultados experimentales, realizando cálculos con la ecuación de Henry, obtenemos la disolución teórica de CO₂ en agua sin considerar solutos. Se emplea los siguientes procedimientos:

$$c_L = k_H P_{CO_2}$$

Ecuación de Henry:

Ecuación de dependencia de la constante de Henry con la temperatura:

$$k_H(T) = k_{298K} \exp \left[-\frac{\Delta H_{diss}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right) \right]$$

Datos:

$$k_{298K} = 1,49 \text{ g/Lbar}$$

$$\Delta H_{diss} = -19\,900 \text{ J/mol}$$

Realizando cálculos para 4 °C (277 K):

$$k_{H(277)} = k_{298K} * e^{-\left(\frac{\Delta H_{diss}}{R} * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right)} = 1,49 \frac{\text{g}}{\text{L bar}} * e^{-\left(\frac{-19900 \frac{\text{J}}{\text{mol}}}{8,31 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}} * \left(\frac{1}{277} - \frac{1}{298}\right)\right)} = 2,74 \frac{\text{g}}{\text{L bar}}$$

Realizando cálculos para 6 °C (279 K):

$$k_{H(279)} = k_{298K} * e^{-\left(\frac{\Delta H_{diss}}{R} * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right)} = 1,49 \frac{\text{g}}{\text{L bar}} * e^{-\left(\frac{-19900 \frac{\text{J}}{\text{mol}}}{8,31 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}} * \left(\frac{1}{279} - \frac{1}{298}\right)\right)} = 2,575 \frac{\text{g}}{\text{L bar}}$$

Realizando cálculos para 8 °C (281 K):



$$k_{H(281)} = k_{298 K} * e^{-\left(\frac{\Delta H_{diss}}{R} * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right)} = 1,49 \frac{g}{L bar} * e^{-\left(\frac{-19900 \frac{J}{mol}}{8,31 \frac{J}{mol K}} * \left(\frac{1}{281} - \frac{1}{298}\right)\right)} = 2,423 \frac{g}{L bar}$$

Determinación de la concentración de CO₂ en el agua (c_L):

Para 4 °C:

$$c_L = k_H * P_{CO_2} = 2,74 \frac{g}{L bar} * 2,65 bar = 7,26 \frac{g CO_2}{L}$$

Para 6 °C:

$$c_L = k_H * P_{CO_2} = 2,575 \frac{g}{L bar} * 2,87 bar = 7,39 \frac{g CO_2}{L}$$

Para 8 °C:

$$c_L = k_H * P_{CO_2} = 2,423 \frac{g}{L bar} * 3,11 bar = 7,54 \frac{g CO_2}{L}$$

Al adicionar azúcar al agua, se cumple una propiedad coligativa de la disolución de un soluto sobre un solvente. Para nuestro caso el soluto es el azúcar y el solvente es el agua. Debido a que la solubilidad del dióxido de carbono en soluciones jarabeadas, como la concentración del azúcar se incrementa, la solubilidad en términos de volumen de gas CO₂ disminuye. En procesos industriales o prácticos, si una solución tiene 1% de azúcar a 60 °F, se disuelve 0,995 volúmenes de CO₂, mientras que para 13% de azúcar se disuelve 0,902 volúmenes de CO₂. Por lo tanto, para nuestro caso, interpolando para 10% de azúcar se obtiene una disolución de 0,925 volúmenes de CO₂.

Entonces a los datos de c_L teóricos en agua deben ser divididos entre 0,925 como un factor de corrección para el c_L de una solución jarabeada:

Para 4 °C:

$$c_{L,corr} = \frac{c_L}{0,925} = \frac{7,26 \text{ g}}{0,925 \text{ L}} = 7,85 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

Para 6 °C:

$$c_{L,corr} = \frac{c_L}{0,925} = \frac{7,39 \text{ g}}{0,925 \text{ L}} = 7,99 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

Para 8 °C:

$$c_{L,corr} = \frac{c_L}{0,925} = \frac{7,54 \text{ g}}{0,925 \text{ L}} = 8,15 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

De acuerdo a la tabla 7, los datos de cL obtenidos en nuestro trabajo experimental fueron:

Tabla 7
Resultados de pruebas experimentales

Prueba No	Temperatura °C	Masa total de CO ₂ suministrada al tanque de almacenamiento, g	Masa de CO ₂ de parte superior del tanque, g	Masa de CO ₂ adsorbida en la bebida, g	Tiempo de carbonatación, s	Presión de carbonatación, psig
1	4	148,0	9,8	138,2	150,0	24,7
2	6	148,2	10,7	137,5	156,4	27,0
3	8	149,1	12,0	137,1	164,1	30,5

Para 4 °C:

$$c_{L,exp} = \frac{138,2 \text{ g}}{18 \text{ L}} = 7,68 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$



Para 6 °C:

$$c_{L,exp} = \frac{137,5 \text{ g}}{18 \text{ L}} = 7,64 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

Para 8 °C:

$$c_{L,exp} = \frac{137,1 \text{ g}}{18 \text{ L}} = 7,62 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

En la tabla 8, se da valores de c_L teóricos y los obtenidos experimentalmente. Se puede observar que el valor teórico corregido es próximo al experimental corroborándose la consistencia del experimento.

Tabla 8

Valores de c_L

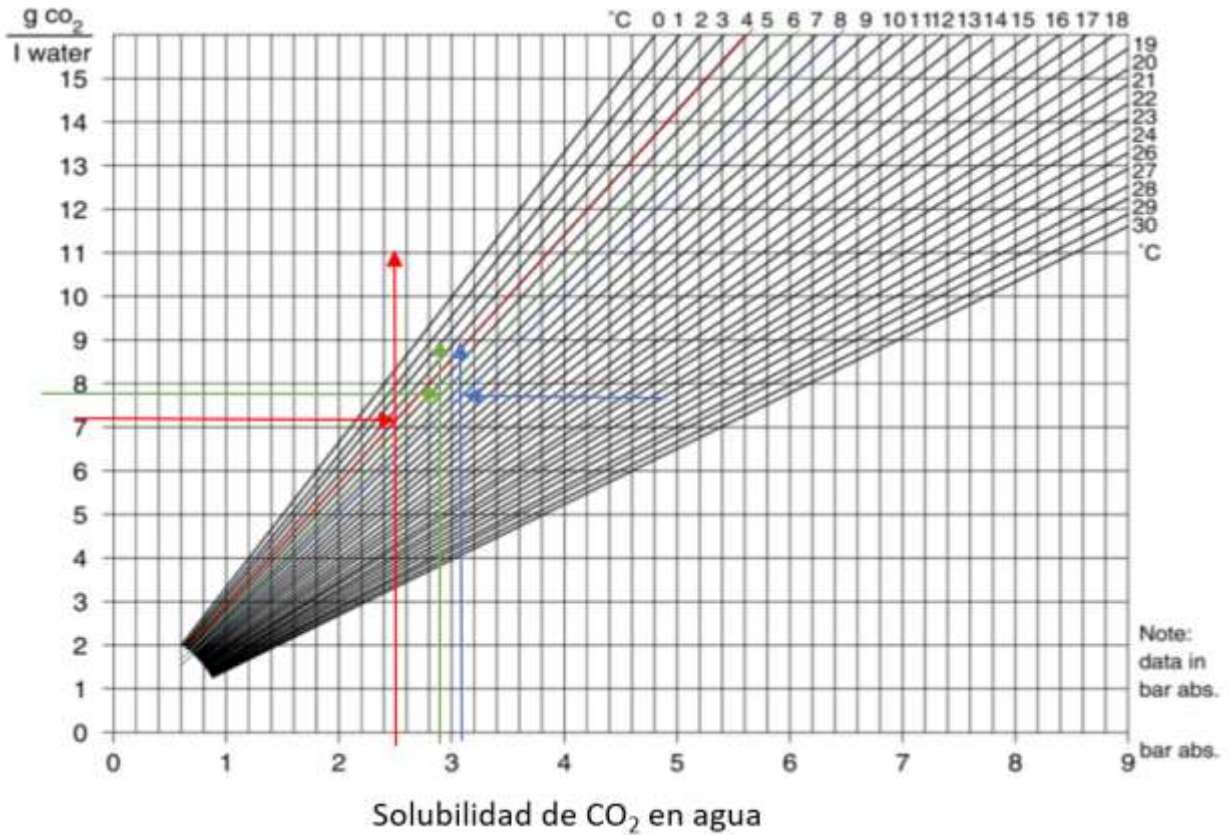
Prueba No	Temperatura °C	c_L teórico (g/L)	c_L teórico corregido para bebida azucarada (g/L)	c_L experimental (g/L)
1	4	7,26	7,85	7,68
2	6	7,39	7,99	7,64
3	8	7,54	8,15	7,62

En la figura 32 se puede corroborar que los datos teórico corregidos, así como los experimentales coinciden aproximadamente con los valores determinados en la figura.



Figura 32

Concentración de CO₂ vs la presión absoluta a diferentes temperaturas



Fuente: Ashurst, Philip R. (1999)

6.2. Hipótesis General

Optimizar el proceso de absorción de dióxido de carbono en bebida jarabeada mediante el empleo de un Venturi y un lecho empacado.

De acuerdo a nuestra Hipótesis General, la optimización del proceso de carbonatación de la bebida jarabeada se pudo conseguir estableciendo valores de presión y temperatura en el rango de 4-8 grados centígrados para temperatura y de

1,65-2,10 bar, de tal forma de conseguir aproximadamente 4 volúmenes de CO₂ / volumen de bebida, referencia tomada de la práctica industrial.

6.3. Hipótesis Específicas

- Empleando como configuración un Venturi, un lecho empacado y un tanque de almacenamiento de bebida final permiten conseguir una buena absorción de CO₂ en la bebida.

El valor de 4 volúmenes de carbonatación conseguida en la bebida fue posible gracias a la configuración experimental de emplear un inyector Venturi y una columna de relleno. El inyector Venturi promovió la formación de microburbujas que incremento grandemente el área interfacial de contacto entre las fases, facilitando la disolución del CO₂ gaseoso en la bebida. Adicionalmente la columna de relleno también ayudo en ofrecer una buena área de contacto entre fases para conseguir aún más homogenización de CO₂ en la fase líquida.

- Las condiciones en las cuales se obtiene una absorción eficiente de CO₂ en bebidas similar a un sistema convencional empleando un Venturi, lecho empacado y tanque de almacenamiento son: temperatura de bebida 4-6 °C, presión de bebida 2 bar y presión de entrada al Venturi 2,8-3 bar.

Se pudo comprobar que el mejor rango de trabajo para la carbonatación fue de 6 ± 1 °C para la temperatura y 2 bar para la presión. La presión a la entrada del Venturi fue de 2,8 bar. Bajo estas condiciones de operación de estado estacionario en el módulo experimental de carbonatación se consigue obtener un contenido de 4 volúmenes de CO₂/volumen de bebida preparada.

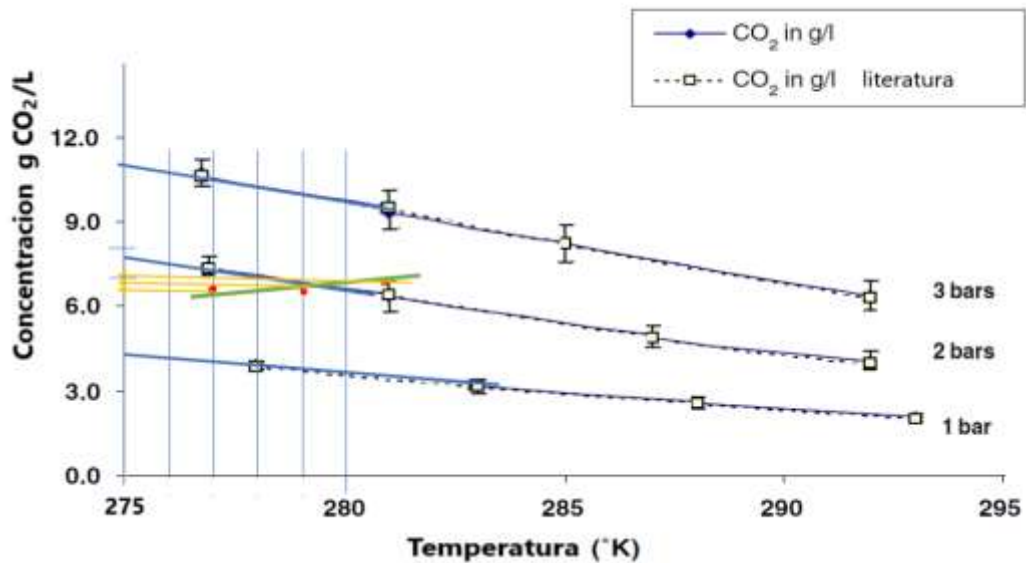


6.4. Contratación de los resultados con otros estudios similares.

Comparando nuestros resultados experimentales con la investigación realizada por Descoins Charles (Descoins Charles et al (2006)), nos indica que nuestros valores obtenidos experimentales son parecidos y están dentro del rango como se indica en la figura 33.

Figura 33

Dato comparativo con estudio similar



Fuente: Descoins Charles et al (2006).

6.5. Responsabilidad ética

Los autores de la investigación se responsabilizan por la información emitida en el presente informe final de investigación, de acuerdo al Reglamento del **Código de Ética de la Investigación de la UNAC**, Resolución de Consejo Universitario N° 260-2019-CU., donde se señala los principios éticos como norma de comportamiento conductual, así como también los autores están de acuerdo con el reglamento en donde se reconoce que la investigación es una función esencial y obligatoria en la UNAC, por

ello los investigadores son responsables de los procesos y procedimientos de diseño, desarrollo y evaluación de su investigación para lo cual se actualiza permanentemente sus conocimientos y dedica el tiempo suficiente para desarrollar sus proyectos de investigación.



CONCLUSIONES

1. Es posible realizar una adecuada carbonatación con el sistema modular construido que incluye un inyector Venturi para un rango de temperatura (4 a 8 °C) y presión (1,64 – 2,1 bar como presión relativa).
2. Para mejorar la carbonatación y homogenización, el dispositivo experimental propuesto de inyector Venturi seguido de una columna empacada con relleno, nos permitió disponer de un sistema compacto para obtener un grado adecuado de carbonatación debido a que se ofrece una mayor área de contacto entre fases para la absorción de CO₂ en la fase líquida.
3. Dentro de nuestro proceso experimental se obtuvo como variables óptimas de operación 6 °C para la temperatura y 1,85 bar relativo para la presión, para conseguir una carbonatación de 4 volúmenes de CO₂ por cada volumen de bebida, que es un valor referencial muy utilizado en la práctica industrial de la producción de bebidas carbonatadas.



RECOMENDACIONES

1. Se sugiere experimentar con otras configuraciones que consigan una carbonatación equivalente o mejorada de la bebida.
2. Se recomienda aplicar el módulo experimental establecido a nivel planta piloto, para luego hacer una extensión en procesos de carbonatación a nivel industrial, de manera que se vea utilidad.
3. Analizar si las características de la bebida carbonatada obtenida empleando procesos que favorecen formación de microburbujas (puedan afectar el sabor) y compararlas con las bebidas carbonatadas del mercado.
4. Estudiar el sistema de operación y mantenimiento del uso del lecho de relleno empacado en casos de producción a mayor escala.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alan J. Mitchell (1990). Formulation and production of Carbonated Soft drink. Formerly of Coca Cola and Schweppes Beverages Ltda, Blackie Glasgow and London New York.
- Ashurst, Philip R. (1999). Production and Packaging of Non-Carbonated Fruit Juices and Fruit Beverages.
- Carpenter et al. (2016). Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry. Rev Chem Eng 2016.
- Descoins Charles, Mathlouthi Mohamed, Le Moual Michel, Hennequim James (2006). Carbonation monitoring of beverage in a laboratory scale unit with on-line measurement of dissolved CO₂. Food Chemistry 95 (2006) 541-553.
- EIGA (2016). Carbon dioxide food and beverages grade, source qualification, quality standards and verification. EIGA doc. 2016.
- G. Barker, B. Jefferson, S. J. Judd. (2002). Domestic carbonation process optimisation. Journal of Food Engineering 52 (2002) 405-412.
- G. Kaushik and A. Chel. (2014). Review. Microbubble technology: emerging field for wáter treatment. Bubble Science, Engineering and Technology, 2014. Vol 0, No 1.
- Gerard Liger-Belair et al. (2015). Bubble dynamics in varios comercial sparkling bottled Waters. Journal of food Engineering 163 (2015) 60-70.



- Jain T, Carpenter J, Saharan VK. (2014). CFD analysis and optimization of circular and slit venturi for cavitation activity. J Mater Sci Mech Eng. 2014; 1: 28–33.
- L. S. Tan et al. (2012). Factors affecting CO₂ absorption efficiency in packed column: A review. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 18 (2012) 1874-1883.
- Larry W. Diamond, Nikolay N. Akinfiev. (2003). Solubility of CO₂ in water from -1,5 to 100 °C and from 0,1 to 100 MPa: evaluation of literature data and thermodynamic modeling. Fluid Phase Equilibria 208 (2003) 265-290.
- Lide, D. R., Frederikse, H. P., (1995) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 76th, ed CRC Press, Boston.
- Liger-Belair, Gerard (2014). How many bubbles in your Glass of Bubbly?. J. Phys. Chem. B 2014, 118, 3156-3163.
- Liger-Belair, Gerard (2019). Carbon Dioxide in Bottled Carbonated Waters and Subsequent Bubble Nucleation under Standard Tasting Conditions. J. Agric. Food Chem. 2019, 67, 4560-4567.
- Liger-Belair, Gerard (2020). CO₂ and bubbles in sparkling Waters. Trends in non-alcoholic beverages. Chapter two. 2020.
- Mahmoud Al-Hindi and Fouad Aziz (2018). Carbon dioxide in several Water types. The Canadian Journal of Chemical Engineering. 96: 274-284. 2018.



Maurice Shachman (2004). The Soft Drinks Companion: A Technical Handbook for the Beverage Industry. CRC Press Taylor & Francis Group, LLC US

McKetta J. John & Cunningham William. (1987). Encyclopedia of Chemical Processing and Design, Marcel Dekker Inc New York 10016.

Mingda Li et al. (2019). Study of venture tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles. Minerals Engineering 132 (2019) 268-274.

NPCS board of consultants & Engineers. (2017). The Complete Technology Book on Alcoholic and Non- Alcoholic Beverages(Fruit Juices, Whisky, Beer, Rum and Wine). Asia Pacific.

Ordoñez Huamán (2011). Tratamiento de aguas y elaboración de bebidas. FIPA. UNAC.

Philip R. Ashurst (2013). Production and Packaging of Non-Carbonated Fruit Juices and Fruit Beverages. 2ed. Edit. PR ASHURST. Springer Science.

Philip R. Ashurst (2016). Chemistry and Technology of Soft Drinks and Fruit Juices. 3 ed. John Wiley & Sons Ltd. West Sussex, PO198SQ, UK.

Suleman Ali and Javald Akthar. (2018). Hydrodynamics of Packed Bed Column: Study of the column for the Absorption of CO₂ in water and its Efficiency. Mass Spectrom Purif Tech. Vol 4.



ANEXOS

Matriz de Consistencia

Título: "OPTIMIZACION DE ABSORCION DE DIOXIDO DE CARBONO EN BEBIDA EMPLEANDO VENTURI"

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variable	Dimensiones	Indicadores	Método de determinación
<p>General</p> <p>¿Cuáles son los valores de variables de diseño que permitan realizar una optimización del proceso de absorción de dióxido de carbono en bebidas empleando Venturi?</p>	<p>General</p> <p>Determinar valores de variables de diseño que permitan realizar una óptima absorción de dióxido de carbono en bebidas empleando Venturi.</p>	<p>General</p> <p>Optimizar el proceso de absorción de dióxido de carbono en bebidas mediante el empleo de un Venturi.</p>	<p>Variable Dependiente:</p> <p>Y= volúmenes de CO₂ en la bebida</p>	<p>Volúmenes de CO₂</p>	<p>Volúmenes de CO₂</p>	<p>Uso de tabla de equilibrio de CO₂ en bebida</p>
<p>Específicos</p> <p>¿Cuál es la configuración experimental más adecuados para conseguir una buena absorción de CO₂ en la bebida?</p>	<p>Específicos</p> <p>Determinar la configuración experimental más adecuada para conseguir una buena absorción de CO₂ en la bebida.</p>	<p>Específicos</p> <p>Empleando como configuración un Venturi, una columna de relleno y un tanque de almacenamiento de bebida final permiten conseguir una buena absorción de CO₂ en la bebida.</p>	<p>Variable independiente:</p> <p>X1= Presión de entrada al Venturi</p>	<p>Presión</p>	<p>bar</p>	<p>Manómetro</p>
<p>¿Cuáles son los valores de variables de proceso que permitan una buena absorción de CO₂ en la bebida empleando Venturi?</p>	<p>Determinar los valores de variables de proceso que permitan una buena absorción de CO₂ en la bebida empleando Venturi.</p>	<p>Las condiciones en las cuales se obtiene una absorción eficiente de CO₂ en bebidas similar a un sistema convencional empleando un Venturi son: temperatura de bebida 6 °C, presión de bebida 2 bar y presión de entrada al Venturi 3 bar.</p>	<p>X2= Presión del CO₂ en la bebida</p> <p>X3= Temperatura de la bebida</p>	<p>Presión</p> <p>Temperatura</p>	<p>bar</p> <p>°C</p>	<p>Manómetro</p> <p>Sensor de temperatura digital</p>

Fuente: Elaboración Propia