



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROYECTO DE GRADUACIÓN

AUTOMATIZACIÓN DEL CONSUMO Y MEDICIÓN DE CO₂ EN PLANTA DE
PRODUCCIÓN, EMSULA

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
INGENIERO EN MECATRÓNICA

PRESENTADO POR:
21341257 ALLAN FABRICIO CASTELLANOS RIVERA

ASESOR: ING. DARWIN REYES HERNANDEZ

CAMPUS SAN PEDRO SULA

ABRIL, 2018

Agradecimientos

A Dios y a la virgen María, que siempre me han acompañado y me han permitido llegar a la meta deseada.

A mis padres, quienes me han enseñado lo que es el amor y me han inculcado valores que me han formado como persona.

A mi hermana, Mariela, por brindarme su apoyo incondicional y ser la mejor hermana que podría tener.

A mis abuelos y tíos, que han sido parte de mi formación desde niño, gracias por su apoyo y confianza en todo momento.

A mis profesores, a quienes admiro mucho, gracias por compartir sus conocimientos.

A todo el personal de Embotelladora de Sula, S.A. por sus enseñanzas, calidad humana y apoyo incondicional.

A todos, mi mas sincero agradecimiento.

Índice

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
2.1	ANTECEDENTES	2
2.2	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	3
2.3	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	3
2.4	OBJETIVOS	3
2.4.1	<i>Objetivo general</i>	4
2.4.2	<i>Objetivos específicos</i>	4
2.5	JUSTIFICACIÓN.....	4
III.	MARCO TEÓRICO	5
3.1	DIÓXIDO DE CARBONO.....	5
3.1.1	<i>Mercado</i>	5
3.1.2	<i>Fuentes de Dióxido de Carbono</i>	6
3.1.3	<i>Funciones del Dióxido de Carbono en la bebida</i>	6
3.1.4	<i>Funciones del CO₂ en el Equipo de Producción</i>	7
3.1.5	<i>Proceso de Carbonatación</i>	8
3.1.6	<i>Métodos de control</i>	9
3.2	PRINCIPIOS DE MEDICIÓN DE FLUJO.....	10
3.2.1	<i>Principios de Medición</i>	11
3.2.2	<i>Medidores de flujo másico de efecto Coriolis</i>	12
3.2.3	<i>Ventajas y desventajas</i>	17
3.2.4	<i>Aplicaciones en la industria</i>	17
3.3	TRANSMISOR.....	19
3.3.1	<i>Variable medida</i>	20
3.3.2	<i>Funcionalidad del transmisor</i>	22
3.4	SELECCIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO	23
3.4.1	<i>Definiendo la aplicación</i>	23

3.4.2	<i>Seleccionando el medidor de flujo</i>	24
3.5	GESTOR GRAFICO DE DATOS UNIVERSAL – ECOGRAPH T	25
3.5.1	<i>Registro de datos</i>	26
3.5.2	<i>Software</i>	26
3.5.3	<i>Ventajas del Ecograph T</i>	27
IV.	METODOLOGÍA	28
4.1	VARIABLES DE INVESTIGACIÓN.....	28
4.1.1	<i>Variables Dependientes</i>	28
4.1.2	<i>Variables Independientes</i>	28
4.2	ENFOQUE Y MÉTODOS.....	28
4.3	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS	29
4.3.1	<i>Técnicas Aplicadas</i>	29
4.3.2	<i>Instrumentos Aplicados</i>	30
4.4	MATERIALES.....	30
4.5	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	31
V.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	32
5.1	INSTRUMENTACIÓN	32
5.2	INSTALACIÓN DE LOS MEDIDORES DE FLUJO	33
5.3	FORMATO PARA LA TOMA DE DATOS.....	34
5.4	TABULACIÓN DE DATOS	36
5.5	RESULTADOS	40
5.6	PRESUPUESTO DEL PROYECTO	41
VI.	CONCLUSIONES	42
VII.	RECOMENDACIONES	43
7.1	PARA LA EMPRESA	43
7.2	PARA LA UNIVERSIDAD.....	43
VIII.	BIBLIOGRAFÍA	44

IX. ANEXOS.....	47
ANEXO 1 - MEDIDOR DE FLUJO PARA LÍNEA DE PRODUCCIÓN NO. 1.....	47
ANEXO 2 - MEDIDOR DE FLUJO PARA LÍNEA DE PRODUCCIÓN NO. 2.....	47
ANEXO 3 - MEDIDOR DE FLUJO PARA LÍNEA DE PRODUCCIÓN NO. 3.....	48
ANEXO 4 - MEDIDOR DE FLUJO PARA LÍNEA DE PRODUCCIÓN NO. 4.....	48
ANEXO 5 - MEDIDOR DE FLUJO PARA LÍNEA DE PRODUCCIÓN NO. 5.....	49
ANEXO 6 - DISPLAY REMOTO DKX001 PARA LÍNEA DE PRODUCCIÓN NO. 5.....	49
ANEXO 7 - DIAGRAMA DE FLUJO DE PRODUCCIÓN	50

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 - Grafico del consumo de dióxido de carbono (Toneladas métricas).....	2
Ilustración 2 - Tecnología de llenado.....	8
Ilustración 3 - Origen y efectos de la fuerza de Coriolis en un plato giratorio.....	14
Ilustración 4 - El principio de medición de Coriolis.....	15
Ilustración 5 - Fuerzas de Coriolis y geometría de oscilación en tubos de medición.....	16
Ilustración 6 - Un punto de medición	20
Ilustración 7 - Ecograph T.....	25
Ilustración 8 - Medidor Proline Promass F 300 DN 40.....	33
Ilustración 9 - Medidor de flujo con desperfecto de fábrica.....	34
Ilustración 10 - Display Remoto DKX001.....	35

Índice de Tablas

Tabla 1 - Clasificación de medidores de flujo según BS EN 7405	12
Tabla 2 - Tipos de señales análogas	22
Tabla 3 - Áreas de aplicación de medidores de flujo	25
Tabla 4 - Cronograma	31
Tabla 5 - Formato para la toma de datos	36
Tabla 6 - Rendimientos del consumo de CO ₂ en los primeros 3 días.....	37
Tabla 7 - Rendimiento del consumo de CO ₂ después de 6 días.....	38
Tabla 8 - Rendimiento del consumo de CO ₂ después de 9 días.....	39
Tabla 9 - Rendimiento del consumo de CO ₂ después de 13 días	39
Tabla 10 - Presupuesto del Proyecto.....	41

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1: Fuerza de Coriolis.....	14
-------------------------------------	----

Glosario

- **Bebidas carbonatadas:** Es el producto obtenido por disolución de edulcorantes nutritivos y gas carbónico en agua potable tratada, pudiendo estar adicionada de saborizantes naturales y/o artificiales.
- **Cleaning in Place:** Limpieza de una instalación sin desmontar ningún equipo o tubería.
- **Disolución:** Mezcla que resulta de disolver un cuerpo o una sustancia en un líquido.
- **Dióxido de carbono:** Gas más pesado que el aire, formado por la combinación de un átomo de carbono y dos de oxígeno, que se produce en las combustiones.
- **Dosificación:** Regulación de la cantidad o porciones de otras.
- **Estándar de calidad:** Producto de referencia que facilita la tarea de fijar unas condiciones mínimas para los aspectos y características de un producto.
- **Fluido multifásicos:** Un fluido, generalmente líquido, que comprende más de una fase, tal como los líquidos a base de agua o base de aceite, el material sólido o gas.
- **Flujo:** Movimiento de un fluido.
- **Interfaz:** Conexión o frontera común entre dos aparatos o sistemas independientes.
- **Materia prima:** Todos aquellos recursos utilizados en la elaboración de productos.

I. Introducción

Según Vaillant (2010), la automatización industrial permite aumentar la producción, mejorar la calidad, la reducción de los costos y personal, cumplir con los requisitos medioambientales, etc. La automatización se ha entendido como una tecnología en la cual se aplican los sistemas mecánicos, electrónicos y computarizados, con el fin de operar y controlar la producción, de bienes físicos de consumo, además involucra una gran variedad de sistemas y procesos que se ejecutan con mínima o ninguna intervención del ser humano (Groover, 1987; Moreno, 2001; Piedrahita, 2001, citados por Vallejo, 2006).

En los últimos meses, el consumo de CO₂ en la planta de producción de Embotelladora de Sula, S.A. se ha incrementado, esto ha generado alzas en los costos operacionales. Hoy en día, la empresa no cuenta con un sistema automatizado de control y medición del consumo de CO₂, el cual es utilizado en la manufactura de bebidas carbonatadas en cada una de sus líneas. Por lo enunciado anteriormente, el propósito de este proyecto es automatizar el control de consumo de CO₂ para mejorar la eficiencia tanto en el aspecto económico como operacional. Además, crear un sistema de recopilación de datos descentralizada que permita medir el consumo de CO₂ en una sola interfaz, disminuyendo el tiempo requerido en la supervisión y generación de reportes diarios en toda la planta.

Otra de las razones para la realización de este proyecto, es brindar el mantenimiento a las tuberías de alimentación de CO₂ por las fugas que actualmente existen en ellas. Asimismo, este sistema le permitirá a la empresa supervisar el correcto funcionamiento de este proceso y contabilizar la cantidad total de CO₂ que se consume por las líneas de producción, ya que no cuentan con un sistema que reporte estos datos.

La estrecha relación competitividad y productividad ha llevado a que la automatización sea considerada como una estrategia y ventaja competitiva (Rueda, 2010 citado por Ovalle, Ocampo, & Acevedo, 2013).

II. Planteamiento del problema

2.1 Antecedentes

Embotelladora de Sula, S. A. es una empresa dedicada al envasado de bebidas carbonatadas y no carbonatadas. La empresa cuenta con ocho líneas de producción en donde se procesan bebidas con los estándares más altos de calidad e inocuidad. Actualmente, es la compañía manufacturera autorizada de producir las bebidas de Pepsi, Lipton, Gatorade, Mirinda, Seven Up y AMP. Además, produce sus marcas propias como Enjoy, Link y Quanty. Dentro del proceso de producción de bebidas carbonatadas, el dióxido de carbono es utilizado como una materia prima. (Centro de Capacitación CORINSA, 2011)

Como se puede apreciar en la Ilustración 1, en los últimos años, EMSULA ha tenido un incremento en el consumo total de CO₂ en sus líneas de producción, lo que ha generado un mayor costo operacional ya que la empresa tiene la necesidad de adquirir mayor cantidad de materia prima, el cual ha tenido un incremento de precio en el mercado internacional.

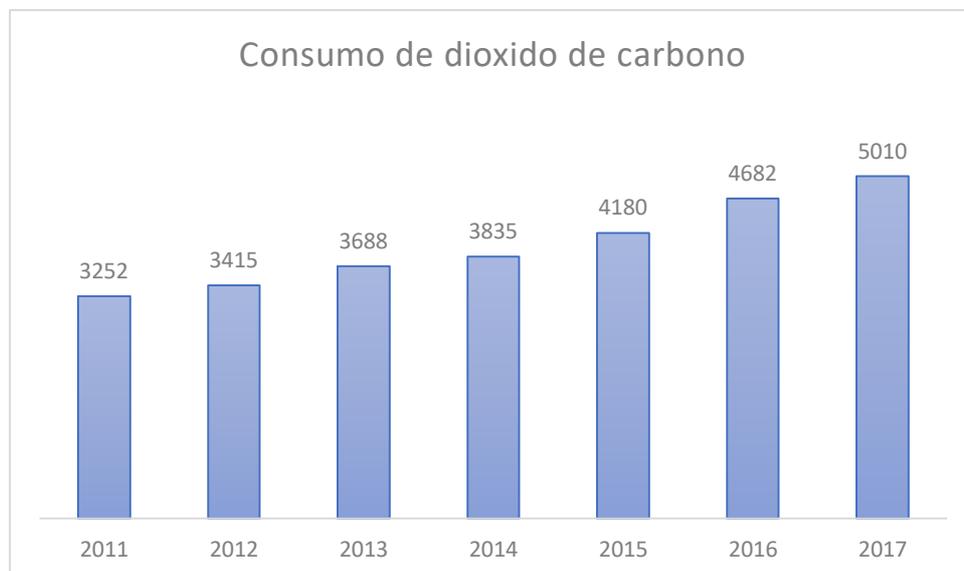


Ilustración 1 - Gráfico del consumo de dióxido de carbono (Toneladas métricas)

Fuente: Elaboración propia

La planta carece de un sistema de control que les permita recibir información sobre el consumo actual de CO₂ y controlar su consumo en las líneas de producción durante la manufactura de bebidas carbonatada.

2.2 Definición del problema

Las líneas de producción en la planta están presentando un mayor consumo de CO₂ durante la manufactura de bebidas carbonatadas. Debido a la falta de un sistema de control automático, la empresa requiere la asistencia de un operador para realizar cálculos teóricos del consumo de CO₂ y así poder llevar un registro de la utilización.

El proceso debe ser elaborado en cada una de las líneas de manufactura y repetirse cada hora. Esto conlleva a retrasos para el operador, falta de precisión en el cálculo teórico de consumo y de uso eficiente del CO₂ en la planta.

2.3 Preguntas de investigación

- ¿Cuáles son las causas no justificadas del alto consumo de CO₂ en la planta de producción de bebidas carbonatadas?
- ¿Cuál equipo de medición es el más adecuado para esta aplicación en EMSULA?
- ¿Cómo se puede mejorar la eficiencia operacional al automatizar el sistema de control y medición del consumo de CO₂?

2.4 Objetivos

Según Sampieri (2014) "los objetivos de investigación señalan a lo que se aspira en la investigación y deben expresarse con claridad, pues son las guías del estudio".

A continuación, se plasman el objetivo general y los objetivos específicos concernientes al proyecto:

2.4.1 Objetivo general

Desarrollar la automatización del consumo y medición de CO₂ en la planta de producción de bebidas carbonatadas EMSULA para mejorar la eficiencia operacional del proceso.

2.4.2 Objetivos específicos

- Determinar las causas no justificadas del alto consumo de CO₂ en las líneas de producción de bebidas carbonatadas.
- Seleccionar el equipo más adecuado operacionalmente para la medición de CO₂.
- Establecer el proceso de instalación y programación del sistema de consumo y medición de CO₂ en la planta de producción de bebidas carbonatadas.
- Estimar los indicadores de la eficiencia operacional del proceso de consumo y medición de CO₂ en las líneas de producción de bebidas carbonatadas.

2.5 Justificación

El contenido de CO₂ en la bebida repercute sobre todo en las cifras de rendimiento y en la rentabilidad del proceso de embotellado: como ser el consumo de CO₂ o duración de los tiempos de reposo y de descarga (Südzucker AG, 1997, citado por Blüml, 2006).

Embotelladora de Sula, S.A. al ser una empresa que produce bebidas carbonatadas, se hace necesario contar con un sistema capaz de realizar el control del consumo y medición de CO₂ durante el proceso de manufactura en la planta, con el fin de mejorar la eficiencia en el manejo de la materia prima. Además, registrar la cantidad exacta de CO₂ que se consume de los tanques de acumulación.

Para la empresa resulta de gran importancia contar con un sistema de este tipo, ya que optimizará la relación que existe entre el costo-producción y elimina la necesidad de un operador humano para el cálculo de consumo de CO₂.

III. Marco teórico

El presente capítulo contiene el sustento teórico del proyecto. Se define la importancia del dióxido de carbono en las bebidas carbonatadas, el funcionamiento de un medidor de flujo y el proceso de selección y las funciones que cumple el transmisor y el registrador video gráfico.

3.1 Dióxido de Carbono

El dióxido de carbono, también llamado anhídrido carbónico, es un compuesto químico formado por la combinación de un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno. Puede existir en los tres estados: líquido, gaseoso y sólido. Su fórmula química es CO_2 . Se disuelve fácilmente en la mayor parte de los líquidos. Su versatilidad ha hecho que tenga muchas aplicaciones en el área de la industria (Vega, 2011).

3.1.1 Mercado

Hoy en día el dióxido de carbono es un subproducto de muchos procesos industriales: producción de amoníaco sintético, producción de hidrógeno, fermentación y síntesis de ciertos productos químicos con presencia de monóxido de carbono.

En el estado gaseoso el dióxido de carbono se utiliza en la producción de compuestos químicos como urea y etanol. Otra aplicación importante es la recuperación de petróleo, como es utilizado en los Estados Unidos actualmente.

El dióxido de carbono líquido es el que más usos tiene. Con él se obtienen atmósferas inertes para el manejo y transporte de alimentos. Es muy útil en la extinción de incendios por ser más pesado que el aire y su capacidad de desplazar el oxígeno. Mejora el crecimiento de las plantas en invernaderos, aplicación muy usada en Reino Unido y Holanda. Por ser muy soluble en agua, se utiliza en el proceso de elaboración de bebidas carbonatadas alcohólicas y no alcohólicas. Sirve para la fabricación de moldes fundidos, para la elaboración de la aspirina y la extracción de carbón en las minas.

Como solido se usa para el manejo de alimentos, principalmente frutas y verduras. Su uso ha disminuido con el desarrollo de nuevas tecnologías para el manejo del gas en su estado liquido (Sanchez Alarcon, Pujol, & Estrany Coda, 2006).

3.1.2 Fuentes de Dióxido de Carbono

Las principales fuentes de emisiones de dióxido de carbono son las naturales y las originadas por las actividades humanas.

1. Fuentes Naturales: Respiración de los seres vivos, descomposición de materias orgánicas e incendios forestales naturales.
2. Fuentes antropogenicas: Combustion de combustibles fosiles, hornos quemadores de cemento y procesos de fermentacion para la produccion de bebidas.

3.1.3 Funciones del Dióxido de Carbono en la bebida

El dióxido de carbono gaseoso es uno de los elementos mas importantes del atractivo de las bebidas carbonatadas. La correcta proporción de dióxido de carbono en la bebida mejora su sabor y apariencia. El dióxido de carbono imparte un sabor picante, ligeramente acido al producto terminado; además mejor la apariencia visual de la bebida. Cada producto en particular debe ser carbonatado al nivel mas adecuado para ese sabor.

Durante el llenado el gas esta presente en diferentes fases: por ejemplo, el anhídrido carbónico hace parte de una gran variedad de bebidas, además se usa como gas de presurización para el deposito de la bebida o como gas de barrido de los envases antes del llenado (Rammert, 1993, citado por Blüml, 2006).

Además de estas importantes contribuciones al sabor y a la apariencia del producto, el dióxido de carbono actúa en cierta medida como preservativo. Según Imholte & Imholte-Tauscher (2000) "mientras esto no disminuye la necesidad de que se sigan estrictamente los procedimientos de saneamiento, el CO₂ proporciona al producto una garantía de protección sanitaria adicional, por tanto, alarga su vida". Según Back (2001), "El anhídrido carbónico

protege generalmente contra un crecimiento de gérmenes – pero con la restricción que en las bebidas refrescantes mixtas en algunos casos el solo contenido de CO₂ no permite determinar si la bebida esta protegida contra gérmenes”.

3.1.4 Funciones del CO₂ en el Equipo de Producción

Según PepsiCo International (2005), “El dióxido de carbono gaseoso además de carbonatar el producto contribuye al proceso de producción en si:

- Desplaza el aire del agua y del producto durante el proceso.
- Proporciona la contrapresión necesaria llenar ciertos tipos de envase.
- Desplaza el aire del cabezal de las latas antes de la operación de sellado”.

La presión de llenado es determinada por la presión de equilibrio del CO₂. El ajuste correcto de la presión de llenado evita la disolución del CO₂ en la bebida durante el proceso de llenado. Una consecuencia de la disolución de las burbujas de dióxido de carbono en la bebida después de retirar la botella de la válvula de llenado puede ser la formación excesiva de espuma con derrame y por lo tanto pérdida del producto (Blüml & Fischer, 2006).

Según el principio de obturador de fuga, puede detectarse el nivel de liquido con un emisor de señales especial y mandar con estas señales el llenador o el vacío del deposito (Deppert & Stoll, 2000).

En la siguiente ilustración se puede apreciar los componentes de las válvulas en las llenadoras de bebidas carbonatadas.

1 Grundstellung Basic position

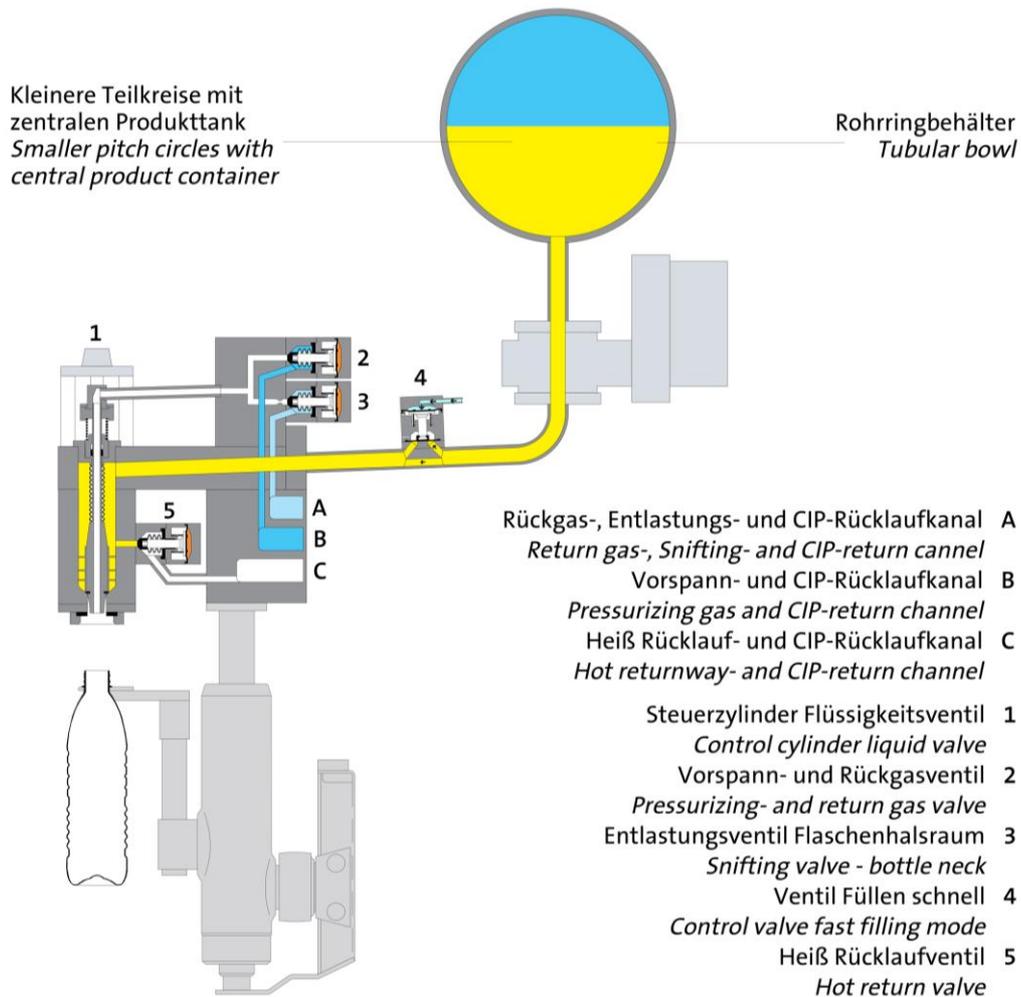


Ilustración 2 - Tecnología de llenado

Fuente: (Krones AG, 2012)

3.1.5 Proceso de Carbonatación

La función primaria de la unidad de carbonatación consiste en añadir dióxido de carbono al producto. La bebida debe carbonatarse a un nivel tal que después de llenarla y tajarla los resultados del producto estén dentro de los estándares para la carbonatación de ese producto (PepsiCo International, 2005).

Algunas unidades de carbonatación incorporan enfriamiento en el mismo tanque o unidad. El producto puede carbonatarse previamente ligeramente con una inyección de CO₂ y después de exponerse directamente a una atmosfera de CO₂ enfriándolo simultáneamente. Otros sistemas separan la carbonatación y el enfriamiento. Las tres formas mas utilizadas de tecnología de carbonatación incorporan una o una combinación de:

- CO₂ convencional (exposición atmosférica)
- CO₂ por inyección
- CO₂ por eyección

Generalmente, estos sistemas se combinan para que se conserven los niveles de carbonatación dentro de los estándares y la bebida carbonatada se conserve estable para minimizar el espumeo en la llenadora. El diseño del sistema de CO₂ también debe tomar en cuenta si el llenado es a bajas temperaturas o temperatura ambiente.

Como hace notar von Bockelmann & von Bockelmann (2001) "la garantía de calidad también da como resultado un nivel de confianza que el fabricante tiene en la calidad del producto que comercializa directa o indirectamente al consumidor".

3.1.6 Métodos de control

Los procesos industriales exigen el control de la fabricación de los diversos productos obtenidos. En todos estos procesos, es absolutamente necesario controlar y mantener constantes algunas magnitudes, tales como la presión, caudal, etc. Los instrumentos de medición y control permiten el mantenimiento y la regulación de estas constantes en condiciones mas idóneas que las que el propio operador podría realizar (Solé, 2011).

La capacidad del agua o de la bebida para absorber el dióxido de carbono gaseoso depende en gran parte de la eficiencia de la unidad de carbonatación.

Otros factores que afectan la absorción de CO₂ incluyen:

- Tipo de producto

- Temperatura del producto
- Presión de CO₂
- Tiempo y superficie de contacto
- Contenido de Aire

Como plantea la Comisión Europea (2001), "Si la temperatura del agua aumenta y se desea conservar la misma absorción de CO₂, se debe aumentar la presión del gas. Inversamente, si la temperatura del agua o de la bebida que entra a la unidad de carbonatación disminuye, el CO₂ se solubiliza más, la presión debe disminuirse para mantener los volúmenes de carbonatación dentro de los estándares".

Los controladores automáticos de CO₂ compensan las fluctuaciones de temperatura, de presión y de flujo. Esto permite que la unidad de carbonatación produzca una absorción constante de CO₂ gaseoso. Tales controles son estándares en las unidades de proceso modernas, que pueden trabajar como unidades básicas o con registradores instalados para detectar variaciones en la temperatura, presión, flujo y volúmenes finales de CO₂ gaseoso absorbidos por el producto durante las horas de operación.

3.2 Principios de Medición de Flujo

Como dice Dulhoste (2014), "la medición de flujo se hace necesaria por dos razones principales:

- Para determinar las proporciones en masa o en volumen de los fluidos introducidos en un proceso.
- Para determinar la cantidad de fluido consumido por el proceso con el fin de computar costos."

Según Grote & Feldhusen (2011), "para determinar la velocidad de flujo en medios que contienen CO₂ es necesario tener en cuenta que en ningún punto del trayecto de circulación la presión esté por debajo de 1.5 tanto del valor de la presión parcial del CO₂ ya que de otra

manera se pueden presentar desprendimiento de gases". Esto a su vez, repercute en las propiedades de espumado y en el comportamiento durante el embotellado además de disminuir la calidad de la bebida.

3.2.1 Principios de Medición

Citando a Baker (2000), "El flujo es la variable que mas se mide comúnmente en la actualidad en la industria. El agua, gas natural, vapor, petróleo, químicos, aguas residuales y procesos de vapor son algunos de los fluidos que son medidos cada día". Los diversos periódicos, revistas científicas y libros que aparecen anualmente en la materia son una indicación de lo importante que se ha vuelto la medición de flujos. Como expresa Bohl (2002), "Ninguna tecnología única satisface todas las diversas aplicaciones, por lo tanto, existen cientos de diseños basados en los diez principales principios de operación. Cada tecnología o diseño tiene beneficios y características claves". Todas ellas son capaces de cubrir el amplio rango de condiciones operativas de las plantas.

El estándar BS EN 7405 nos brinda las clasificaciones de los medidores de flujo, selección del medidor de flujo y las reglas para optimizar la selección para los medidores de flujo de tubo cerrado. Este estándar utiliza diez grupos básicos para clasificar todos los tipos de la medición de flujo. Los números mas bajos representan las técnicas mas antiguas. Todas las técnicas antiguas sustraen energía y las técnicas mas modernas añaden energía. En la actualidad, existe una tendencia hacia el uso de medidores que no cuente con partes móviles, debido a que estos ofrecen mayor capacidad de ajuste, menor caída de presión y desgaste mínimo.

La Tabla 1 nos muestra la clasificación de los medidores de flujo según el estándar BS EN 7405.

Tabla 1 - Clasificación de medidores de flujo según BS EN 7405

Group	Description	Category (Energy ...)
1	Differential pressure meters	extractive
2	Other DP meters (VA, Pitot, etc.)	extractive
3	Displacement meters	extractive
4	Turbine meters	extractive
5	Vortex meters	extractive
6	Electromagnetic meters	additive
7	Ultrasonic meters	additive
8	Coriolis mass meters	additive / extractive
9	Thermal meters	additive
10	Miscellaneous meter types	additive / extractive

Fuente: (Endress+Hausser Flowtec AG, 2004)

La tabla anterior diferencia entre las dos clases de medidores:

- Los que extraen energía del flujo
- Los que añaden algo al flujo para inferir el índice de flujo de la propiedad agregada.

Cuando la energía es extraída, surge una caída de presión. La mayoría de los medidores se clasifican dentro de esta primera categoría. Cuando la energía es añadida, la caída de presión es mínima. En el método de extracción de energía, se coloca un rotor en la corriente. Esto es utilizado para convertir la energía potencial del flujo a energía cinética la cual es utilizada para inferir la medición de flujo (Wagner, 2001).

En el segundo método, el de adición de energía, la energía puede ser en la forma de flujo magnético, sonido o calor. El flujo actúa según la cantidad agregada y el cambio es utilizado para inferir o medir el flujo.

3.2.2 Medidores de flujo másico de efecto Coriolis

En muchos sectores de la industria, se debe medir el flujo másico en lugar del volumen. En la industria del procesado de alimentos, por ejemplo, los productos tales como las pastas, las pulpas y el yogur son medidos por peso, no por volumen. Por lo tanto, la etiqueta en el empaque le dice al consumidor el peso del producto, en lugar del volumen. Una razón para

eso es que el volumen de la mayoría de los fluidos puede variar ampliamente bajo influencias físicas como presión, temperatura y densidad.

Según Liptak (2003), "la medición y control de procesos son fundamentales para generar los mejores resultados posibles en lo que concierne a la utilización de recursos, máquinas, desempeño, rentabilidad, protección medioambiental y seguridad, entre otros, en una unidad productiva".

La masa de un fluido no se ve afectada por estas influencias, por lo que la medición del flujo másico tiene algunas ventajas que la medición volumétrica simplemente no puede igualar. Este es un aspecto de particular importancia para la medición fiscal en dosificación y fluidos dosificadores.

La masa de un cuerpo, por lo general, se termina pesando. Desde el punto de vista de la ingeniería, sin embargo, existen grandes dificultades por superar cuando se pesa directamente una masa que fluye continuamente a través de un sistema de tuberías. Esta es la razón por la cual en las últimas décadas se ha visto surgir un principio de medición que permite que el flujo másico en tuberías se mida directa y continuamente, es decir, la medición del flujo másico según el principio de Coriolis. En algunas aplicaciones, tiene más sentido aplicar este principio que determinar la masa indirectamente midiendo el flujo y la densidad del volumen.

El principio de Coriolis fue descrito en 1836 por el científico francés Gaspard Gustave Coriolis; es el efecto que se observa en un sistema de referencia en rotación cuando un cuerpo se encuentra en movimiento respecto a un sistema de referencia. Este efecto consiste en la existencia de una aceleración relativa del cuerpo en dicho sistema de rotación. Esta aceleración siempre es perpendicular al eje de rotación del sistema y a la velocidad del cuerpo.

El principio de Coriolis hace que un objeto que se mueve sobre el radio de un disco en rotación tienda a acelerarse con respecto a ese disco si el movimiento es hacia el eje de giro o alejándose de este, como se puede apreciar en la Ilustración 3.

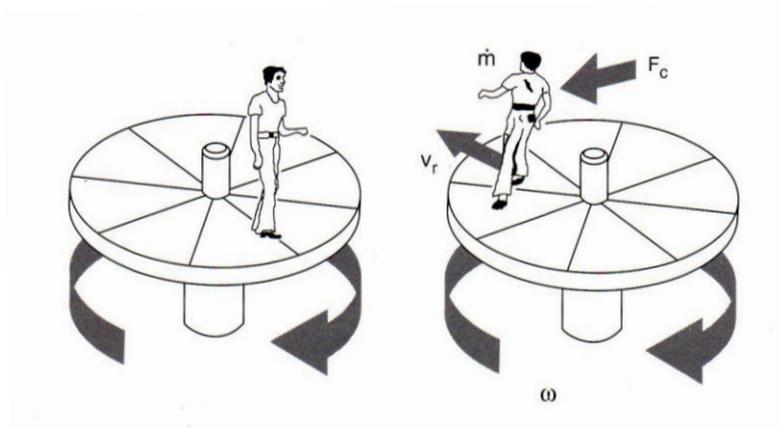


Ilustración 3 - Origen y efectos de la fuerza de Coriolis en un plato giratorio

Fuente: (Endress+Hausser Flowtec AG, 2004)

La fuerza de Coriolis es una fuerza resultante que aparece cuando un cuerpo está en movimiento con respecto a un sistema de rotación y se describe su movimiento en ese referencial. La fuerza de Coriolis es diferente de la fuerza centrífuga, ya que esta es siempre perpendicular a la dirección del eje de rotación del sistema y a la dirección del movimiento del cuerpo vista desde el sistema en rotación.

En términos matemáticos, la fuerza Coriolis es proporcional a la masa del cuerpo (m), velocidad de rotación (ω) y la velocidad del cuerpo en el sistema de rotación (v_r):

$$F_c = 2 \cdot m \cdot \omega \cdot v_r$$

Ecuación 1: Fuerza de Coriolis

Fuente: (Endress+Hausser Flowtec AG, 2004)

En un medidor de flujo masico de efecto Coriolis, las partículas de masa individuales se ven influenciadas de la misma forma que el cuerpo de la persona en el plato giratorio en la Ilustración 4. El movimiento giratorio descrito anteriormente que genera la fuerza de Coriolis

se reemplaza en el medidor de flujo al excitar el tubo de medición para que oscile a su frecuencia de resonancia.

- En flujo cero, cuando el fluido está parado, no hay movimiento lineal. Por lo tanto, no se producen fuerzas de Coriolis (a).
- Una vez que la masa está fluyendo, el movimiento inducido por la oscilación en el tubo de medición se superpone al movimiento lineal del fluido que fluye. La fuerza de Coriolis hace que los tubos de medición "giren" (b, c). Los sensores en el flujo de entrada y salida (A, B) registran la diferencia en el tiempo en este movimiento, en otras palabras, registran la diferencia de fase. Cuanto mayor es el flujo de masa, mayor es la diferencia de fase, ver la Ilustración 5.

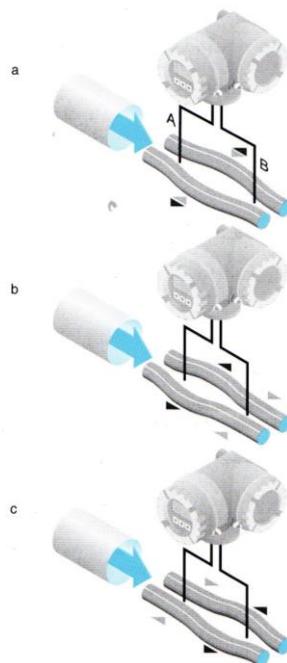


Ilustración 4 - El principio de medición de Coriolis

Fuente: (Endress+Hausser Flowtec AG, 2004)

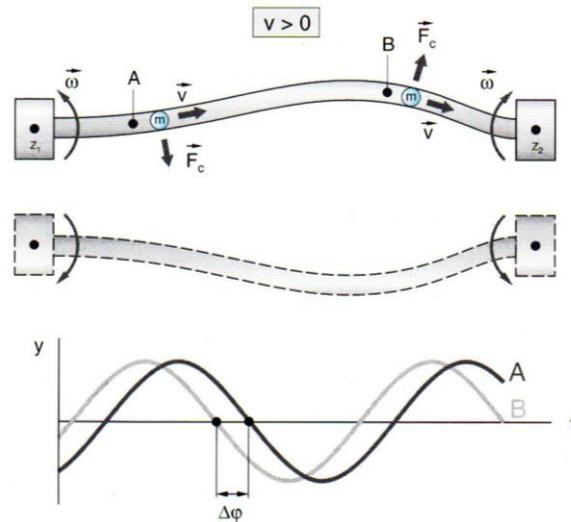


Ilustración 5 - Fuerzas de Coriolis y geometría de oscilación en tubos de medición

Fuente: (Endress+Hausser Flowtec AG, 2004)

Una consideración importante al aplicar los medidores Coriolis es la posible presencia de influencias externas tales como las vibraciones de las tuberías. Las vibraciones en los sistemas de tuberías generalmente se encuentran dentro del rango de 50 a 150 Hz (Altendorf & Berrie, 2004).

Como dice Navarro (2004), "los disturbios en la medición son aquellos que pueden encontrarse por causa de exactitud y variaciones al medir la señal de salida de un proceso". Los errores en la medición pueden afectar de forma negativa ya que engañan en la lectura dando un valor diferente al verdadero.

Los tubos de medición se excitan continuamente a su frecuencia de resonancia. Tan pronto como cambia la densidad del flujo, y por lo tanto la masa del sistema oscilante, la frecuencia de excitación se ajusta. Por lo tanto, la frecuencia de resonancia es una función de la densidad del fluido y puede usarse como una señal de salida adicional.

La temperatura de los tubos de medición se determina para calcular el factor de compensación debido a los efectos de la temperatura. Esta señal corresponde a la temperatura del proceso y también está disponible como señal de salida.

3.2.3 Ventajas y desventajas

Ventajas:

- Principio universalmente aplicable para medir el flujo de líquidos y gases.
- Medición directa del flujo másico (sin necesidad de compensación de presión y temperatura).
- El principio de medición es independiente de la densidad del fluido y la viscosidad.
- Muy alta precisión de medición ($\pm 0.1\%$).
- Concepto de sensor múltiple: medición simultánea del flujo másico, la densidad y la temperatura medida al mismo tiempo.

Desventajas:

- Inversión inicial relativamente alta.
- El desembolso para la instalación puede ser considerable, según el diseño y fabricante.
- Rango de temperatura limitado: por lo general de -50 a $+350$ °C.
- Utilidad restringida si el contenido de gas del fluido es alto y en el caso de fluidos multifásicos.
- Los tamaños mas grandes pesan en algunos diseños.

3.2.4 Aplicaciones en la industria

Como afirma Vetter (2001), "Las ventajas de la medición del flujo másico de Coriolis son evidentes, ya que este principio de medición no se ve afectado por factores físicos como la conductividad, la presión, la temperatura, la densidad y la viscosidad". Los recorridos rectos de entrada y salida son innecesarios, un hecho que puede ser extremadamente ventajoso cuando el espacio es escaso. Por lo tanto, no es sorprendente que los medidores de flujo

Coriolis se encuentran en aplicaciones y sectores muy diferentes de la industria, como ser los productos químicos y farmacéuticos. Prácticamente, todos los fluidos se pueden medir.

Los medidores Coriolis registran simultáneamente la densidad del flujo y el flujo másico, y con la ayuda de sensores de temperatura también pueden controlar la temperatura del fluido. Por ello, este tipo de medición se puede designar como la medición de múltiples variables (Sanchez, 2015).

Las principales variables medidas; el flujo másico, la densidad y la temperatura, se pueden utilizar para calcular y visualizar otras variables tales como el flujo volumétrico, los contenidos de sólidos arrastrados, las concentraciones o los valores de densidad derivada. Los modernos sistemas de medición están equipados para calcular y emitir estas variables medidas secundarias directamente a través del mismo transmisor. Las características de estos dispositivos Coriolis abren nuevos horizontes:

- Mezcla y dosificación de varias materias primas
- Procesos de control
- Medición de fluidos con densidad de cambio rápido
- Control y monitoreo de la calidad del producto

Estas son algunas de las razones por las cuales el principio de Coriolis se ha establecido como una técnica de medición comprobada en los últimos 10 años. Los medidores de Coriolis se utilizan con frecuencia en procesos químicos, principalmente a causa de lo siguiente:

- Método directo de medición de masa con una alta precisión
- Muy versátil debido a la amplia gama de materiales de tubos de medición
- Alta seguridad debido a la contención secundaria

Muchas aplicaciones se encuentran en la industria alimentaria, por ejemplo, para dosificar cantidades mínimas de ingredientes y para el llenado. Los medidores Coriolis también se están generalizando cada vez más en aplicaciones de medición de gas a baja presión y alta presión.

Desde hace algún tiempo, las ventajas descritas anteriormente han abierto nuevos campos para los medidores de flujo basados en el principio de Coriolis. Debido a esto, el mercado de los medidores de Coriolis continuará creciendo al ritmo actual o incluso se expandirá aun mas en los próximos años.

3.3 Transmisor

Estamos inmersos en un mundo en que todo, o casi todo, se basa en la electricidad, por lo tanto, la forma mas cómoda para transmitir una señal desde un sensor a una maquina será mediante una señal eléctrica transmitida por un cable que una sensor y elemento de control (Penin, 2007).

El transmisor generalmente procesa la señal para representar la variable física medida por el sensor, la convierte en una señal de salida estandarizada para registrar, controlar u operar el sistema. Además, proporciona una indicación local de las lecturas medidas.

Los transmisores están equipados con funciones de software que les permite adaptar el medidor a las condiciones de operación y al proceso en general. Las ventajas son:

- Señales estandarizadas, por lo que los valores medidos se transmiten fácilmente
- Diseño unificado de dispositivos receptores de medición y control
- Los transmisores modulares son como bloques de construcción para crear configuraciones personalizadas para abordar tareas altamente complicadas en el control de procesos.

Los diagramas de flujo de tuberías e instrumentación representan el equipo que conforma una planta. Los iconos y símbolos se utilizan para presentar el diseño y la función de un sistema de ingeniería en procesos. Esto se aplica a la designación de la tarea y método de operación de los dispositivos utilizados para medir, instrumentar y controlar, lo que generalmente llamamos un medidor. En la Ilustración 6 se puede observar un ejemplo de un punto de medición.

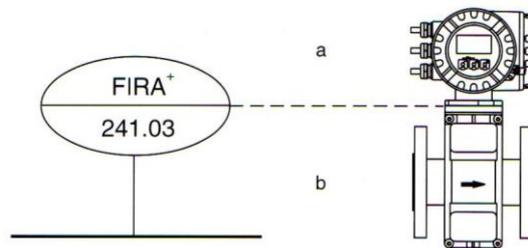


Ilustración 6 - Un punto de medición

Fuente: (Endress+Hausser Flowtec AG, 2004)

3.3.1 Variable medida

Según Bjønnes & Bloch Jensen (2004), "La generación de la variable medida en el transmisor es un proceso de tres etapas. La señal bruta entrante del sensor es detectada, procesada por el transmisor y emitida como una señal convertida y estandarizada para su utilización de una forma u otra".

Los transmisores están disponibles para medir variables eléctricas (incluyendo voltaje, corriente, potencia y resistencia) y variables no eléctricas (como propiedades mecánicas, neumáticas, térmicas, ópticas o químicas). El sensor genera la señal primaria para el procesamiento posteriormente.

En gran medida, la señal del principio de medición es la que determina el esfuerzo requerido para que el transmisor procese la variable de proceso (física) registrada por el sensor. El transmisor amplifica la señal y generalmente la convierte de analógica a digital. Los transmisores modernos generalmente incorporan microprocesadores, por lo que ofrecen una gran cantidad de funciones configurables y de gran conveniencia:

- Ajuste y monitoreo del punto cero
- Ajuste y monitoreo de la amplificación de la señal medida
- Corrección de las desviaciones relacionadas con la producción
- Corrección de interferencia durante la medición

- Corrección de la deriva específica del dispositivo
- Selección basada en frecuencia de la señal de medición mediante filtros
- Cálculo de variables que no se miden directamente
- Autocontrol y verificación de integridad
- Generación de valores límite y umbral de alarma
- Cálculos matemáticos complejos

Después de procesarse en el transmisor, la señal se convierte en una señal y salida eléctrica estandarizada.

La variable medida se visualiza como una lectura por el medidor (por medio de la pantalla integrada) y/o esta disponible como una señal de salida estandarizada. La disponibilidad de estas señales estandarizadas para la transmisión de valores medidos en un rango de medición definido contribuye de manera significativa a la enorme versatilidad mundial. Las interfaces estandarizadas aseguran que los dispositivos de visualización, registro y control unificados y los controladores de orden superior de los tipos utilizados en todo el mundo se puedan conectar a los transmisores.

La conversión analógica / digital es una función cada vez más común integrada en los transmisores, por lo que una señal digital a menudo está disponible con (o en lugar de) la señal analógica convencional. La Tabla 2 muestra las señales análogas más utilizadas actualmente.

Tabla 2 - Tipos de señales análogas

Signal mode Signal type	Description
Current (output)	<ul style="list-style-type: none"> – Range: 0/4–20 [mA] – Applied function: Current intensity proportional to measured variable – Use / application: Preferred signal worldwide, signal output of measured variable over a defined range
Frequency (output)	<ul style="list-style-type: none"> – Range: 0 to 10 [kHz] – Applied function: Frequency proportional to measured variable – Use / application: Same type as current signal, signal output of measured variable over a defined range
Pulse (output)	<ul style="list-style-type: none"> – Range: 0 to 10000 [p/s] – Applied function: Pulse of defined valence – Use / application: Totalizing function in several industries
Relay (switch output)	<ul style="list-style-type: none"> – Voltage range: Typically 24/230 [V] – Switching power: Typically up to 1 [A] – Applied function: Defined switching contact – Use / application: e.g. limit-value function (time-lag response)
Optocoupler (switch output)	<ul style="list-style-type: none"> – Voltage range: Typically 24 [V] – Switching power: Typically up to 500 [mA] – Applied function: Defined switching contact – Use / application: e.g. Alarm function (low power)
Current (input)	<ul style="list-style-type: none"> – Range: 4–20 [mA] – Applied function: Current intensity proportional to measured variable (e.g. of temperature transmitter) – Use / application: Signal for higher-order calculations, e.g. for heat quantities
Optocoupler (switch input)	<ul style="list-style-type: none"> – Voltage range: Typically 24 [V] – Applied function: Defined contact function – Use / application: e.g. for resetting a totalizer or for triggering batching processes

Fuente: (Endress+Hausser Flowtec AG, 2004)

3.3.2 Funcionalidad del transmisor

Los transmisores modernos deben cumplir con la legislación vigente y los estándares de la industria. Por lo tanto, ha habido un constante cambio y expansión en los modos de visualización y operación, y aun mas en el ámbito de la funcionalidad. Los instrumentos

mecánicos eran la norma mas antigua, pero la mayoría de los medidores cuentan con pantallas digitales o incluso compatibles con pantallas graficas. Los potenciómetros casi han desaparecido, así como los puentes; los transmisores modernos cuentan con paneles de control y teclados fáciles de usar.

Algunos transmisores de nueva generación tienen funciones de alarma con soporte de correo electrónico o mensaje de texto para enviar valores a destinatarios remotos.

A menudo, los requisitos de seguridad pueden ser extremadamente estrictos, por lo que los transmisores digitales modernos tienen protección con contraseña para evitar el acceso no autorizado a funciones parametrizadas.

3.4 Selección de medidores de flujo

¿Cuál medidor de flujo es el mas indicado para una aplicación en particular? Según Kirk, Weedon, & Kirk (2005), la respuesta a esta pregunta no es fácil debido al incremento de dispositivos de medición disponibles en el mercado, diferentes requisitos de instalación y la falta de información en cuanto a comparación entre las características de los diferentes dispositivos de medición de flujo.

3.4.1 Definiendo la aplicación

En muchas aplicaciones de proceso, una indicación de flujo puede ser todo lo que se requiere. Para estos casos, se puede comprar un indicador de flujo a una fracción del costo de un medidor de flujo. Si se requieren alarmas de nivel bajo o alto, estos mismos indicadores se pueden equipar con interruptores para satisfacer esta necesidad.

Si lo único que se necesita es una lectura con una precisión del 5 al 10%, bastara un simple indicador de presión diferencial que utilice obstrucciones o cambios de sección en la tubería. Sin embargo, si se requiere una indicación superior al 5%, se requiere un medidor de flujo.

Antes de intentar cualquier forma de selección, el usuario debe saber como o tener una buena estimación de lo siguiente:

1. Propiedades químicas y físicas del fluido y de los agentes de limpieza, según corresponda
2. Rango de caudales esperado o requerido
3. Rangos de presión y temperatura del fluido
4. Temperatura ambiente
5. Duración de la operación (continua o por lotes)
6. ¿Se requiere Cleaning in Place (CIP)?
7. Ubicación del medidor de flujo
8. Accesibilidad para mantenimiento o calibración
9. Consideraciones de seguridad
10. Exactitud requerida
11. Fondos disponibles para compra

Los factores como se detallaron anteriormente se colocan intencionalmente en este orden porque los primeros nueve determinan la precisión total alcanzable. Estos diez factores afectan el último y frecuentemente el factor más importante, a saber, los recursos financieros disponibles. En cierto modo, por lo tanto, esto se convierte en el procedimiento de selección. A menudo, sin embargo, ocurre lo contrario, con los fondos asignados a una medición de precisión sin que se aprecien las condiciones completas.

3.4.2 Seleccionando el medidor de flujo

Una vez que todos los factores de influencia se han aclarado y la aplicación se ha definido en detalle, es hora de considerar que medidores de flujo (o que principios operativos) serán los más adecuados para la aplicación en cuestión.

La Tabla 3 presenta una lista breve de ciertos tipos de medidores (grupos 1-12 según BS EN 7405) que se han utilizado con éxito en las aplicaciones enumeradas en la columna de la

izquierda. Se han elegido cuatro categorías principales con ejemplos típicos enumerados de cada área para ilustrar las amplias áreas de aplicación. El éxito se define como adecuado, condicionalmente adecuado y no adecuado.

Tabla 3 - Áreas de aplicación de medidores de flujo

Liquid applications	Gr. 1	Gr.2	Gr. 3	Gr. 4	Gr. 5	Gr. 6	Gr. 7	Gr. 8	Gr. 9	Gr. 10
Clean liquids (e.g. water)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Liquids with low flow rates (< 2 l/min, < 2 gal/min)	✓	✓	✓	✓	-	✓	?	✓	✓	?
Liquids with high flow rates (> 20,000 l/min; 5280 gal/min)	✓	-	?	✓	?	✓	✓	-	-	-
Flow in large diameter pipes (DN > 500/24")	✓	-	-	?	-	✓	✓	-	-	✓
Non-conductive liquids (e.g. oils, solvents)	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓
Hot liquids > 200 °C / 390 °F (e.g. process chemicals)	✓	?	-	✓	✓	-	?	✓	?	✓
Viscous liquids > 50 cP (e.g. hydrocarbons, paints)	?	-	✓	-	-	✓	?	✓	-	?
Cryogenic fluids (e.g. liquid O2)	?	-	-	✓	✓	-	✓	✓	-	✓
Hygienic fluids (milk, beer, juices)	-	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	-	-
Gas applications										
Gas flow in general (e.g. air flow)	✓	✓	?	✓	✓	-	?	✓	✓	?
Gas with low flow rates (< 20 lit/min, < 5 gal/min)	?	✓	✓	?	-	-	-	✓	✓	✓
Gas with high flow rates (HVAC systems)	✓	-	-	-	?	-	-	-	✓	?
Hot gas flows (> 200 °C / 390 °F)	✓	-	-	?	✓	-	?	?	?	✓
Steam	✓	-	-	-	✓	-	?	?	-	✓
Miscellaneous applications										
Slurries, particulate flow (e.g. paint)	?	-	-	-	-	✓	?	?	-	-
Liquid/liquid mixtures (oil/water)	✓	-	?	?	✓	?	?	✓	-	?
Liquid/gas mixtures (water/air)	-	-	-	-	-	?	-	?	-	?
Corrosive liquids (acids or alkalis)	?	?	?	?	?	✓	✓	✓	-	-
Corrosive gas flow (e.g. HCl vapor)	?	?	-	?	?	-	-	?	-	-
Applications in mining (ore slurry, etc.)	?	-	-	-	-	✓	-	-	-	?
Powder/grain flows	-	-	-	-	-	-	-	-	-	?
Open channel applications										
General applications (e.g. canals, rivers)	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	✓
Sedimented flows (e.g. sewage, wastewater)	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-
Irrigation systems (rain/raw water)	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-

Fuente: (Endress+Hausser Flowtec AG, 2004)

3.5 Gestor grafico de datos universal – Ecograph T



Ilustración 7 - Ecograph T

Fuente: (Endress+Hausser AG, 2012)

Como expresa Herzog, Van Kasteren, & Salusbury (2002), "actualmente, los requisitos en la tecnología de medición van mas allá del registro de datos de los valores medidos". Los valores de medición deben poderse visualizar o procesar, los valores de alarma tienen que poderse monitorear y los datos deben poder archivarse seguramente.

3.5.1 Registro de datos

El registrador video grafico Ecograph T es una solución sencilla para registrar datos de forma segura y a prueba de manipulaciones. Al presentar hasta 12 entradas analógicas universales y varios modos de visualización, como curvas, gráficos en cascada y gráficos en barras, es un equipo de uso universal que puede utilizarse en muchas aplicaciones. Dispone adicionalmente de 6 entradas digitales con las que pueden registrarse o sincronizarse pulsos, tiempos de operación y estados de conmutación. Las mediciones registradas se guardan en una memoria interna de 128 MB y en una tarjeta SD.

Los datos pueden transmitirse automáticamente a sistemas primarios por medio de interfaces modernas, como por ejemplo el Ethernet, y distintas posibilidades de comunicación. Todo esto facilita una sencilla conexión con el sistema de control.

Se pueden asignar libremente hasta 30 valores de alarma a los distintos canales. Las infracciones de valores de alarma se señalan en pantalla y se guardan en la memoria del equipo. Además, dispone de 6 relés internos que pueden utilizarse para la emisión de alarmas. La flexibilidad del Ecograph T puede aumentarse aun mas incorporando opcionalmente 4 canales matemáticos. El equipo puede realizar distintos cálculos que se especifican de forma sencilla mediante el editor de formulas.

3.5.2 Software

El Ecograph T tiene una forma de operar muy intuitiva. La configuración de parámetros del registrador video grafico se realiza fácilmente mediante el servidor web que tiene integrado,

sin tener que instalar ningún software adicional (Endress+Hauser, S.A, 2012). Con este servidor web puede visualizarse también los datos instantáneos como los registrados. Adicionalmente, los datos registrados pueden seleccionarse, guardarse y visualizarse a prueba de manipulación en una base de datos o en la tarjeta SD.

3.5.3 Ventajas del Ecograph T

El video grafico Ecograph T cuenta con las siguientes ventajas:

- Versátil: Hasta 12 entradas universales para las señales de medición mas comunes
- Claro: Pantalla TFT de 5.7 pulgadas para la visualización de las mediciones en hasta cuatro grupos, pudiendo ser los modos de visualización digitales, tipo grafico de barras o curvas
- Rápido: Frecuencia de muestreo de 100 ms en todos los canales
- Compacto: Profundidad de instalación pequeña, ahorro en espacio y dinero
- Sencillas: Manejo intuitivo gracias al navegador y a la parametrización fácil de utilizar
- Seguro: Almacenamiento fiable al utilizar memoria interna o tarjeta SD independiente
- Informativo: Notificaciones por correo electrónico de alarmas e infracciones de valores de alarma
- Aptitudes del sistema: Interfaces comunes como Ethernet, RS232/485 y USB
- Comunicativo: Los datos pueden transmitirse a otros sistemas
- Inteligente: Cálculos mediante 4 canales matemáticos opcionales

IV. Metodología

Las variables pueden definirse como aspectos de los problemas de investigación que expresan un conjunto de propiedades, cualidades y características observables de las unidades de análisis, tales como individuos, grupos sociales, hechos, procesos y fenómenos sociales y naturales (Carrasco, 2006).

4.1 Variables de Investigación

Estas se pueden dividir en independientes y dependientes. La variable que manipula el experimentador recibe el nombre de variable independiente. El objeto, proceso o característica a estudiar y que modifica su estado con la modificación de la variable independiente se llama variable dependiente (Echegoyen Olleta, 2012).

4.1.1 Variables Dependientes

La variable dependiente es el alto consumo del dióxido de carbono en las líneas de producción de bebidas carbonatadas.

4.1.2 Variables Independientes

Las variables independientes no se manipularon, se midieron para determinar el impacto que generaban a la variable dependiente. Las variables independientes bajo estudio afectan el consumo de la materia prima durante la producción.

- Procedimientos del proceso de envasado.
- Receta de bebida carbonatada.
- Tiempos de purga en las llenadoras.

4.2 Enfoque y Métodos

El enfoque mixto es un proceso que recolecta, analiza y vincula datos cuantitativos y cualitativos en un mismo estudio, en una serie de investigaciones para responder a un

planteamiento del problema, o para responder a preguntas de investigación de un planteamiento del problema (Tashakkori & Teddlie, 2010).

Durante la planeación y realización del proyecto se utilizó el método mixto, contando con características de ambos enfoques:

- Enfoque cuantitativo: Mediante la recopilación de datos se determinó las causas y operaciones que generan un mayor consumo de dióxido de carbono durante la producción de bebidas carbonatadas.
- Enfoque cualitativo: Se involucró al personal de la planta como ser, los operadores, supervisores y jefes de línea, ya que ellos contaban con un mayor conocimiento del proceso y planificación de la manufactura de diversos productos que se elaboran en las líneas.

4.3 Técnicas e Instrumentos Aplicados

A continuación, se detallan los instrumentos y técnicas aplicadas durante el desarrollo del proyecto.

4.3.1 Técnicas Aplicadas

La recolección de datos se realizó mediante las siguientes técnicas:

1. Solicitud de cotizaciones a proveedores
2. Análisis de documentos
3. Internet
4. Datos obtenidos de los medidores de flujo másico

Se realizaron solicitudes de cotización a proveedores de equipo y tecnología de medidores de flujo y accesorios eléctricos para la instalación y operación del sistema de medición de consumo. La información obtenida mediante estas comunicaciones es de carácter cuantitativo como, por ejemplo, el precio de los equipos y fechas de entrega.

El análisis de documentos tiene como propósito comprender todo el material referente a fichas técnicas de los equipos, manuales de operación y manuales de instalación.

El internet, como uno de los principales medios para recolectar información, se utilizó para recolectar documentación referente a los procesos de carbonatación y llenado de bebidas carbonatadas, así como los últimos avances tecnológicos.

Los datos obtenidos de las lecturas de los medidores de flujo másico son de carácter cuantitativo y utilizado para el análisis de consumos por las líneas de producción.

4.3.2 Instrumentos Aplicados

La fórmula de calidad para el dióxido de carbono de PepsiCo se utiliza para realizar cálculos de contenido de dióxido de carbono por unidad producida en la planta. Esta fórmula es utilizada para llevar un control teórico del consumo de CO₂ en la planta de producción de las bebidas carbonatadas.

4.4 Materiales

Dentro de los materiales que se utilizaron para la instalación del sistema de medición y consumo de CO₂ se encuentran:

- Cable de control – Belden Cable Par Trenzado Multi-par Blindado 18 AWG
- Cable de alimentación – Belden Cable Par Trenzado Multi-par Blindado 18 AWG
- Breaker de 2 Amp.
- Borneras de conexión de 6 mm
- Medidores de flujo másico Proline Promass F 300 DN 40 Y DN 50
- Display Remoto DKX001 Endress+Hauser

V. Resultados y Análisis

El presente capítulo contiene el análisis y resultados obtenidos del proyecto. Se muestran los resultados de la selección del tipo de medidores de flujo, su instalación, así como el análisis de los datos de medición obtenidos.

5.1 Instrumentación

Para el proceso de selección de medidores de flujo, se utilizó como referencia el manual de medición de flujos de Endress+Hausser. También, se tomaron en cuenta las propiedades físicas del fluido, el caudal de flujo de la materia prima, la presión en las tuberías, duración de la producción, la ubicación de instalación de los medidores y la exactitud requerida para la medición.

El dióxido de carbono se utiliza en un estado gaseoso a bajo caudal en producción continuas de 24 horas por 7 días a la semana. La ubicación adecuada para la instalación de los medidores de flujo es en la tubería de alimentación de cada llenadora. Se requiere una alta precisión en la medición debido a que la información será utilizada para llevar un control de consumo de dióxido de carbono en la planta.

Con toda esta información, se procedió a seleccionar los medidores de flujo de efecto Coriolis ya que cuentan con una alta precisión y están diseñados para ser utilizados en este tipo de aplicaciones en la industria.



Ilustración 8 - Medidor Proline Promass F 300 DN 40

Fuente: (Endress+Hausser AG, 2017)

5.2 Instalación de los medidores de flujo

Para comenzar, se decidió realizar la instalación del sistema de instalación en las tuberías de alimentación de dióxido de carbono en cada una de las llenadoras de las líneas de producción. De esta manera, la toma de datos del consumo de dióxido de carbono sería mas precisa a la hora de llevar el control de consumo.

Durante la instalación de los medidores de flujo, se pudo apreciar que uno de los medidores de flujo vino con defecto de fabrica en la tarjeta de alimentación. Este medidor se instaló en la Línea de Producción No. 4. Se realizó el reclamo al fabricante para que se enviara una nueva tarjeta electrónica de alimentación, pero el medidor de flujo estuvo deshabilitado durante la toma de muestras en la planta, por lo que se siguió utilizando el calculo teórico para el consumo de esta línea. En la Ilustración 9 se puede apreciar el medidor de flujo deshabilitado.



Ilustración 9 - Medidor de flujo con desperfecto de fábrica

Fuente: Elaboración propia.

5.3 Formato para la toma de datos

La propuesta del proyecto incluía la instalación de un gestor de datos Ecograph T que permitiría la gestión de datos del consumo del dióxido de carbono de manera descentralizada para llevar un control de la materia prima en la planta. La instalación de este dispositivo se aplazó para un proyecto futuro que será realizado en la planta.

Debido al inconveniente, la toma de datos se realizó de manera manual, tomando lectura de los consumos por línea en la pantalla de cada medidor de flujo. También, se realizó la compra de un Display Remoto DKX001 para el medidor de flujo de la Línea de Producción No. 7 para facilitar la lectura de los medidores ya que el medidor de flujo se instaló en la línea de alimentación en la parte superior de la planta. En la ilustración de abajo se puede apreciar el Display Remoto.



Ilustración 10 - Display Remoto DKX001

Fuente: (Endress+Hausser AG, 2017)

Para realizar el análisis de la eficiencia en los consumos del dióxido de carbono, se realizó la recopilación de datos de muestra por un periodo de 13 días, siendo tomadas 8 horas diarias para un total de 104 horas.

En la elaboración del formato de datos se tomo en cuenta la Línea de Producción, el producto que se elaboro, la cantidad de cajas elaboradas, el consumo de dióxido de carbono en base a los medidores de flujo de efecto Coriolis, el consumo de dióxido de carbono en base a la formula teórica y la diferencia entre ambos consumos.

A petición de la empresa, se elaboro una segunda tabla con la lectura inicial y final en los tanques de almacenamiento de CO₂ y un calculo de rendimiento general para la planta. En la Tabla 5, se puede apreciar el formato utilizado.

Tabla 5 - Formato para la toma de datos

Linea	Producto			Cajas	CO2	CO2 (Teorico)	Diferencia
CO2	Inicial	Recarga	Final	Consumo	Rendimiento	Diario	Acumulado

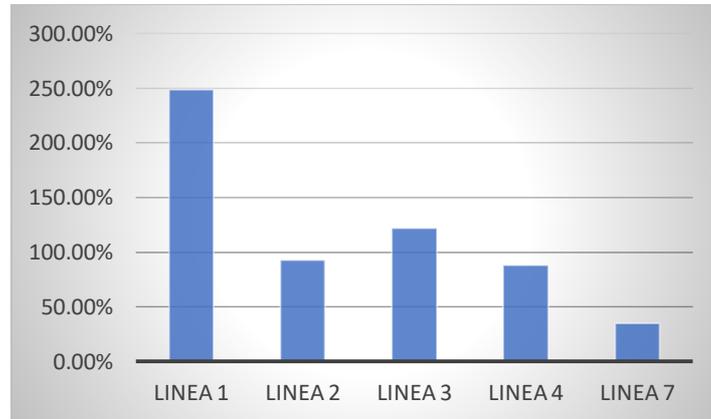
Fuente: Elaboración propia.

5.4 Tabulación de datos

Se procedió a tabular los datos recopilados para determinar el rendimiento del consumo del dióxido de carbono por las líneas de manufactura en base a su producción planificada y así analizar que líneas presentaban un consumo de materia prima mayor a lo calculado teóricamente. Las lecturas se organizaban por fecha de producción y por presentación elaborada.

Durante la toma de datos en los primeros días se procedió a realizar la comparación de datos entre los datos recopilados con los medidores de flujo de efecto Coriolis con los datos cálculos por medio de la formula teórica. En la tabla siguiente se pueden apreciar los resultados de esta comparación.

Tabla 6 - Rendimientos del consumo de CO2 en los primeros 3 días



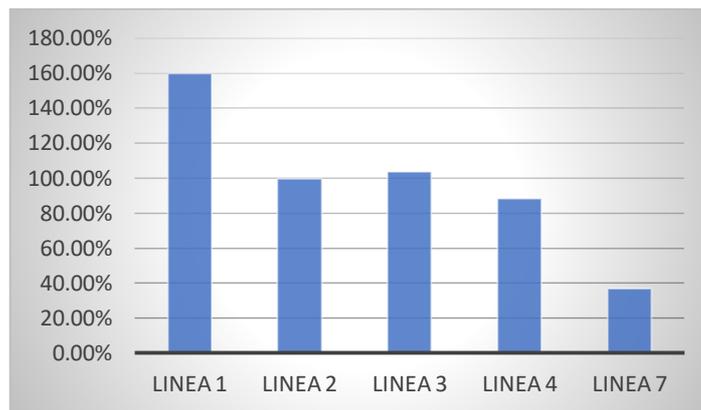
Fuente: Elaboracion propia.

El resultado principal no fue el esperado. Trascendió que en la Línea de producción No. 1 el rendimiento del consumo de la materia prima era de un 248.63% valor muy por encima del esperado y con divergencia del valor calculado. También se presentaba este caso en la Línea de producción No. 3 con un 122.13% de rendimiento del consumo.

Las líneas de producción No. 2 y No. 4 presentaban un buen rendimiento y ambos valores no divergían tanto de los valores calculados por medio de la formula. La Línea de producción No. 7 presentaba un rendimiento bastante bajo con 35.17%.

En base a estos primeros resultados se procedió a hacer revisión de la formula teórica para aumentar la certeza de los datos teóricos resultantes.

Tabla 7 - Rendimiento del consumo de CO₂ después de 6 días



Fuente: Elaboración propia.

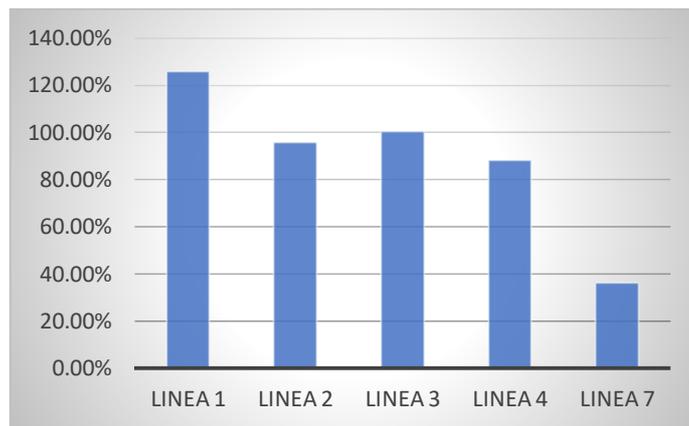
Después de haber realizado ciertos cambios en la fórmula para los cálculos teóricos se procedió a realizar nuevamente el cálculo de rendimiento del consumo del dióxido de carbono.

Esta vez, el rendimiento de la Línea de producción No.1 disminuyó notablemente, aunque todavía presentaba un valor bastante alto con un 160%. Comenzó a ser evidente el bajo rendimiento que presentaba la Línea de producción No. 7 al mantener un valor del 37%.

Cabe notar que el valor de la Línea de producción No. 3 no varió debido a que esta se encontraba fuera de operación debido a un paro planificado para un proyecto de actualización.

De igual forma, se procedió a seguir revisando la fórmula para seguir aumentando la certeza de los resultados en los cálculos.

Tabla 8 - Rendimiento del consumo de CO2 después de 9 días

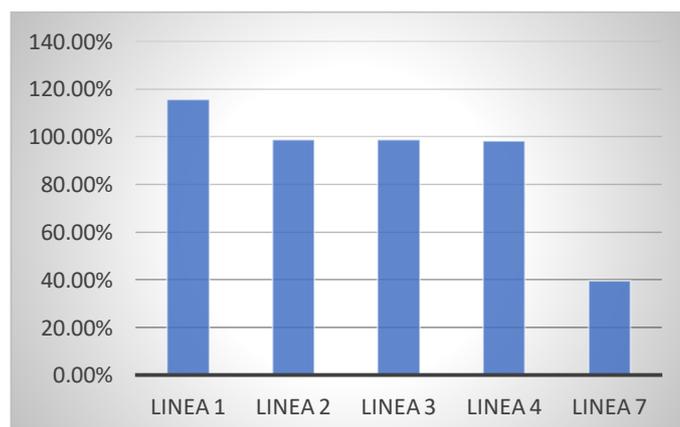


Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizados los ajustes en la fórmula se procedió a calcular nuevamente el rendimiento en las líneas de producción en la planta.

Las mejoras en los resultados de la Línea de producción No. 1 fueron evidentes, aunque todavía se contaba con un valor bastante alto en el rendimiento con un 125.87%. La Línea de producción No. 7 todavía contaba con un rendimiento bastante bajo con un 36.27% por lo que se procedió a planear un paro para brindarle mantenimiento a la línea y encontrar la causa de su bajo rendimiento.

Tabla 9 - Rendimiento del consumo de CO₂ después de 13 días



Fuente: Elaboración propia.

Al terminar los 13 días de muestra, los resultados habían mejorado considerablemente. La línea de producción No. 1 todavía contaba con un valor alto de 115.63%. Luego de haber realizado un mantenimiento general en la línea de producción No. 7 el rendimiento del consumo del dióxido de carbono aumentó a un 39.64%, valor mucho más bajo de lo esperado.

5.5 Resultados

Se realizó la instalación de los medidores de flujo de efecto Coriolis en las líneas de producción de bebidas carbonatas en la empresa Embotelladora de Sula, S.A. Debido a una ampliación futura que tendrá el proyecto no se realizó la compra e instalación de los gestores gráficos de datos, pero se detallaron todos los materiales necesarios para su futura instalación en la planta.

Al comenzar a comparar los datos recopilados de la fórmula teórica y los reales por medio de los medidores de flujo se pudieron observar altas discrepancias entre ambos, resultando en rendimientos del consumo del dióxido de carbono demasiado altos en algunas líneas, especialmente la línea de producción No. 1. Este caso ocurre principalmente en las presentaciones pequeñas como son la 12 Oz y 6.5 Oz.

También, se determinó que el rendimiento en la línea de producción No. 7 es muy bajo por lo que se realizaron mantenimientos generales en las máquinas e inspecciones en las tuberías. No se encontraron fugas y fallas graves por lo que se realizó una solicitud de servicio al fabricante para realizar una inspección más detallada en el sistema de alimentación de dióxido de carbono en la maquinaria.

Debido al poco tiempo con el que se contó para la recopilación de datos y análisis de resultados la empresa todavía mantiene en observación la línea de producción No. 7 en búsqueda de seguir mejorando el rendimiento del consumo de la materia prima.

En base a recomendaciones realizadas por el fabricante, se hizo la propuesta de disminuir los tiempos de purga en las llenadoras. Esta acción aumentó el rendimiento del consumo del

dioxido de carbono en las lineas de produccion llegando a los valores deseados de rendimiento por parte de la empresa.

5.6 Presupuesto del proyecto

El presupuesto de este proyecto esta compuesto principalmente por los componentes electricos al igual que los medidores de flujo con sus accesorios.

Tabla 10 - Presupuesto del Proyecto

PRESUPUESTO			
ITEM	Cantidad	Precio por unidad	Precio total
Cable Belden Par Trenzado Multi-par Blindado 18 AWG	2	L 8,000.00	L 16,000.00
Breaker de 2 Amp	5	L 650.00	L 3,250.00
Borneras de Conexion de 6 mm	10	L 25.00	L 250.00
Medidores de flujo másico Proline Promass F 300 DN 40	4	L 342,300.00	L 1,369,200.00
Medidores de flujo másico Proline Promass F 300 DN 50	1	L 386,534.00	L 386,534.00
Display Remoto DKX001 Endress+Hauser	1	L 5,500.00	L 5,500.00
		Total	L 1,780,734.00

Fuente: Elaboracion propia.

VI. Conclusiones

Como dice James & Slater, (2013) "la conclusión debe proporcionar un resumen, sintético pero completo, de la argumentación, las pruebas y los ejemplos consignados en las dos primeras partes del trabajo. Debe relacionar las diversas partes de la argumentación, unir las ideas desarrolladas."

- A través del análisis de los datos recopilados se determinaron las causas no justificadas del alto consumo de CO₂ en las líneas de producción de bebidas carbonatadas.
- Se seleccionaron como equipo los medidores de flujo de efecto Coriolis Proline Promass F 300 debido a que era el equipo más adecuado operacionalmente para la medición de CO₂.
- Se establecieron los puntos de medición más adecuados para los medidores de flujo en las líneas de producción para obtener mayor precisión en la recopilación de datos, quedando pendiente la instalación de los gestores gráficos para la segunda fase del proyecto debido a la proyección a futuro que tiene la empresa.
- Se estimaron los indicadores del rendimiento operacional del proceso de consumo y medición de CO₂ en las líneas de producción de bebidas carbonatadas.

VII. Recomendaciones

En el presente capítulo se enumeran las recomendaciones para mejora realizadas a la empresa y a la universidad.

7.1 Para la empresa

- Implementar el mantenimiento preventivo para el equipo crítico y auxiliar, con el objeto de reducir el número de incidentes o fallas y que deban ser solucionados con un mantenimiento correctivo.
- Mantener un mejor control de toda la información técnica de la planta y que esté a disposición del personal de mantenimiento para futuras referencias ya sea para mantenimiento o proyecto.

7.2 Para la universidad

- Brindar talleres de instrumentación industrial para que los estudiantes se familiaricen con los diferentes equipos que existen en la actualidad y que son de importancia en la industria.
- Mejorar el equipamiento de laboratorio de la universidad para que los estudiantes puedan realizar más prácticas y puedan seguir adquiriendo más conocimientos.
- Realizar más visitas académicas a las industrias para que el estudiante conozca el ambiente industrial y su equipamiento.

VIII. Bibliografía

- Altendorf, M., & Berrie, P. (2004). Flow Measuring Principles. En R. Furness, P. Bloomer, & M. Hull, *Flow Handbook* (pág. 137). Reinach, Basel-Landschaft: Endress+Hauser Flowtec AG.
- Back, W. (2001). *Neu = Empfindlich*. Salzburg: Brauwelt.
- Baker, R. C. (2000). *Flow Measurement Handbook*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bjønnes, H., & Bloch Jensen, F. (2004). Special Applications. En R. Furness, P. Bloomer, & M. Hull, *Flow Handbook* (págs. 186-187). Reinach, Basel-Landschaft: Endress+Hauser Flowtec AG.
- Blüml, S., & Fischer, S. (2006). *El mundo de los envases*. Hamburg: Kronen AG.
- Bohl, W. (2002). *Technische Strömungslehre*. Würzburg: Vogel-Fachbuch / Kamprath Series.
- Carrasco, S. (2006). *Metodología de la investigación científica*. Lima: Editorial San Marcos.
- Centro de Capacitacion CORINSA. (2011). *Manual de Induccion*. San Pedro Sula.
- Deppert, W., & Stoll, K. (2000). *Aplicaciones de la Neumatica*. Mexico D.F.: Alfaomega, S.A.
- Dulhoste, J. F. (2014). *Instrumentación*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Echegoyen Olleta, J. (2012). *Filosofía Contemporanea*. Madrid: Edinumen.
- Endress+Hauser, S.A. (2012). El gestor de datos universal Ecograph T. *Componentes del sistema y registradores*, 8-9.
- European Commission. (2001). Community Methods for the analysis of wines. *Comission Regulation (EEC) 2676/90*, 161.
- Grote, K.-H., & Feldhusen, J. (2011). *Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin: Springer-Verlag.
- Herzog, M., Van Kasteren, R., & Salusbury, J. (2002). *Establishing a balanced maintenance strategy for field instrumentation*. Reinach, Basel-Landschaft: Endress+Hauser Flowtec AG.
- Imholte, T. J., & Imholte-Tauscher, T. K. (2000). *Engineering for Food Satety and Sanitation*. Medfield: Technical Institute of Food Safety.

- James, E. A., & Slater, T. (2013). *Writing your Doctoral Dissertation or Thesis Faster: A Proven Map to Success*. Thousand Oaks: SAGE Publications, Inc.
- Kirk, F. W., Weedon, T. A., & Kirk, P. (2005). *Instrumentation*. Orland Park: American Technical Publishers, Inc.
- Liptak, B. G. (2003). *Instrument Engineers' Handbook, Vol. 1: Process Measurement and Analysis*. Boca Raton: CRC Press.
- Navarro, R. M. (2004). *Ingeniería de Control*. Mexico D.F.: McGraw-Hill / Interamericana Editores S.A de C.V.
- Ovalle, A., Ocampo, O., & Acevedo, M. (2013). Identificación de brechas tecnológicas en automatización industrial de las empresas del sector metalmecánico de Caldas, Colombia. *Ingeniería y Competitividad, Volumen 15, No. 1*, 171-182.
- Penin, A. R. (2007). *Sistemas SCADA*. Barcelona: Marcombo, S.A.
- PepsiCo International. (2005). Practicas Operacionales. En *Manual de Calidad* (págs. 149-150). New York: PepsiCo International.
- PepsiCo International. (2005). Procesos de Manufactura. En *Manual de Calidad* (pág. 447). Nueva York: PepsiCo International.
- Rammert, M. (1993). *Zur Optimierung von Hochleistungsfüllanlagen für CO₂-haltige Getränke*. Paderborn.
- Südzucker AG. (1997). *Handbuch Erfrischungsgetränke*. Mannheim: Südzucker AG.
- Sampieri, R. H. (2014). *Metodología de la investigación*. Mexico D.F.: McGraw-Hill / Interamericana Editores S.A de C.V.
- Sanchez Alarcon, J. A., Pujol, R. O., & Estrany Coda, F. (2006). Planta para la recuperacion de dióxido de carbono de los gases de combustion. *Tecnica Industrial*, 35-36.
- Sanchez, A. L. (2015). Modelo de soporte para medidores de flujo tipo Coriolis aplicado a America Latina. *Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica*, 34-37.
- Solé, A. C. (2011). *Instrumentación Industrial*. Mexico D.F.: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
- Tashakkori, A., & Teddlie, C. (2010). *Handbook of Mixed Methods in Social & Behavioral Research*. Thousand Oaks: Sage.

- Vaillant, Y. L. (2010). *Implementación del control y supervisión de la planta de recuperación de CO₂ de la cervecería Antonio Díaz Santana*. Santa Clara: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Vallejo, B., & Vallejo, S. (2006). Aspectos generales de la automatización industrial del sector farmacéutico. *Rev. Col. Cienc. Farm. Vol. 35 (1)*, 47-48.
- Vega, L. F. (2011). *El CO₂ como recurso*. Barcelona: Fundación Gas Natural.
- Vetter, G. (2001). *Handbuch Dosieren*. Essen: Vulkan-Verlag.
- von Bockelmann, B., & von Bockelmann, I. (2001). *Long-Life Products: A Guide to Quality*. Åkarp: Dr. Bernhard von Bockelmann.
- Wagner, W. (2001). *Strömung und Druckverlust*. Würzburg: Vogel-Fachbuch / Kamprath Series.

IX. Anexos



Anexo 1 - Medidor de flujo para Línea de Producción No. 1

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 2 - Medidor de flujo para Línea de Producción No. 2

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 3 - Medidor de flujo para Línea de Producción No. 3

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 4 - Medidor de flujo para Línea de Producción No. 4

Fuente: Elaboración propia.



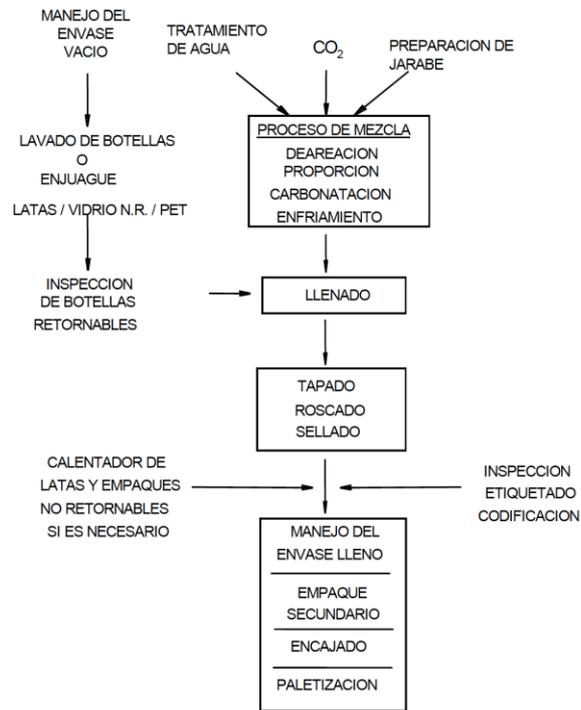
Anexo 5 - Medidor de flujo para Línea de Producción No. 5

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 6 - Display Remoto DKX001 para Línea de Producción No. 5

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 7 - Diagrama de Flujo de Producción

Fuente: (PepsiCo International, 2005)