



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Estudios de Postgrado

Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento

**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN PARA EL CONTROL Y
ESTANDARIZACIÓN DE AIREACIÓN DE MOSTO Y LEVADURA PARA EL PROCESO DE
UNA PLANTA DE FERMENTACIÓN EN UNA INDUSTRIA CERVECERA**

Ing. Miguel Angel Colindres Ramos

Asesorado por el Mtro. Ing. Daniel Angel Figueroa García

Guatemala, mayo de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN PARA EL CONTROL Y
ESTANDARIZACIÓN DE AIREACIÓN DE MOSTO Y LEVADURA PARA EL PROCESO DE
UNA PLANTA DE FERMENTACIÓN EN UNA INDUSTRIA CERVECERA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. MIGUEL ANGEL COLINDRES RAMOS
ASESORADO POR EL MTRO. ING. DANIEL ANGEL FIGUEROA GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN ARTES EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

GUATEMALA, MAYO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADORA	Mtra. Inga. Rocío Carolina Medina Galindo
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Carlos Alejandro Alegre Ordóñez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN PARA EL CONTROL Y
ESTANDARIZACIÓN DE AIREACIÓN DE MOSTO Y LEVADURA PARA EL PROCESO DE
UNA PLANTA DE FERMENTACIÓN EN UNA INDUSTRIA CERVECERA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 12 de enero de 2022.


Ing. Miguel Angel Colindres Ramos




Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.466.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN PARA EL CONTROL Y ESTANDARIZACIÓN DE AIREACIÓN DE MOSTO Y LEVADURA PARA EL PROCESO DE UNA PLANTA DE FERMENTACIÓN EN UNA INDUSTRIA CERVECERA**, presentado por: **Ing. Miguel Angel Colindres Ramos**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Ingeniería de mantenimiento después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana

The signature of Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada is written in blue ink over a large, faint circular seal of the University of San Carlos. To the right of the signature is an official oval stamp. The stamp contains the text "UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA" at the top, "DECANA" and "FACULTAD DE INGENIERÍA" in the center, and a small star at the bottom.

Guatemala, mayo de 2023

AACE/gaoc

Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, - Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Post-Grado Maestría en Sistemas Mención Ingeniería Vial. Carreras: Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas. Licenciatura en Matemática. Licenciatura en Física. Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM). Guatemala, Ciudad Universitaria, Zona 12. Guatemala, Centroamérica.



EEPFI-1735-2022

Guatemala, 9 de noviembre de 2022

Profesional
Miguel Angel Colindres Ramos
Carné: 201222720
Maestria En Ingenieria De Mantenimiento

Distinguido Profesional Colindres Ramos

De manera atenta hago constar que de acuerdo con la aprobación del coordinador de maestría y docente-revisor doy el aval a su Informe Final y Artículo Científico titulado: **"PROPUESTA DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN PARA EL CONTROL Y ESTANDARIZACIÓN DE AIREACIÓN DE MOSTO Y LEVADURA PARA EL PROCESO DE UNA PLANTA DE FERMENTACIÓN EN UNA INDUSTRIA CERVECERA"**.

Con base en la evaluación realizada hago constar la originalidad, calidad, coherencia según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobados por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014**. Cumpliendo tanto en su estructura como en su contenido, **por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación**.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"



MSc. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti

Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 9 de noviembre de 2022

M.A. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimado M.A. Ing. Alvarez Coti

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **PROPUESTA DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN PARA EL CONTROL Y ESTANDARIZACIÓN DE AIREACIÓN DE MOSTO Y LEVADURA PARA EL PROCESO DE UNA PLANTA DE FERMENTACIÓN EN UNA INDUSTRIA CERVECERA** del estudiante **Miguel Angel Colindres Ramos** quien se identifica con número de carné **201222720** del programa de Maestría En Ingeniería De Mantenimiento.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 042014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014**. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Mtra. Inga. Rocio Carolina Medina Galindo
Coordinador
Maestria En Ingenieria De Mantenimiento
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, 28 de octubre de 2022

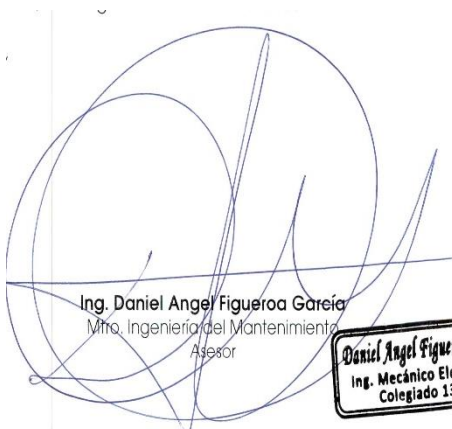
M.A. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrados
Presente

Estimado M.A. Ing. Alvarez Coti

Atentamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que como asesor del estudiante Miguel Angel Colindres Ramos, carné número 999005344, he procedido a la revisión del trabajo de graduación cuyo título es "PROPUESTA DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN PARA EL CONTROL Y ESTANDARIZACIÓN DE AIREACIÓN DE MOSTO Y LEVADURA PARA EL PROCESO DE UNA PLANTA DE FERMENTACIÓN EN UNA INDUSTRIA CERVECERA", para optar al grado académico de Maestro en Artes en Ingeniería de Mantenimiento, he procedido a la revisión del mismo.

En tal sentido, en calidad de asesor doy mi anuencia y aprobación para que el estudiante Colindres Ramos, continúe con los trámites correspondientes,

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.



Ing. Daniel Angel Figueroa Garcia
Mtro. Ingeniería del Mantenimiento
Asesor

Daniel Angel Figueroa Garcia
Ing. Mecánico Electricista
Colegiado 13087

ACTO QUE DEDICO A:

Mi padre	Por ser ese aliento incondicional, voz de la razón que trasciende fronteras y temporalidades.
Mi madre	Por ser la guía que latentemente direcciona mi camino, por una lucha y apoyo ilimitado que me ha ayudado a siempre continuar.
Mis hermanos	Dulce, Fernando, Vivian y Jaqueline Colindres. Porque son mi modelo a seguir y patrones de vivencias.
Mi familia	Abuelos, tíos, primos, sobrinos, quienes, con palabras de aliento, por pequeñas que parecieran, apremiaron el camino en este tiempo.
Amigos	Alan Pacheco y Bryan Gatica por sus consejos y vivencias en este tiempo, por hacer de estos tiempos más amistosos y agradables.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	El alma <i>mater</i> que me permitió, así como a tantos otros estudiantes, ampliar los conocimientos.
Facultad de Ingeniería	Por estar a la vanguardia en el área técnica, capacitando a los profesionales de la industria dentro del país.
La industria del país	Por brindar espacios para que los profesionales de la industria puedan tecnificarse adecuadamente.
Al pueblo de Guatemala	Por brindar apoyo a la academia del país, por estar abiertos a que el estudiante pueda desarrollarse de la mejor forma posible.
Mi asesor	Mtro. Ing. Daniel Figueroa, por haberme guiado durante el trabajo de graduación.
Familia y amigos en general	Porque en todo momento han estado en un incondicional apoyo, por generar espacios oportunos de enfoque y distracción.

ÍNDICE GENERAL

INDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS	XV
OBJETIVOS.....	XVII
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO	XIX
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Automatización	1
1.1.1. Sistemas de control	2
1.1.1.1. Elementos de un sistema de control.....	3
1.1.1.2. Tecnologías aplicadas	4
1.1.1.3. Tipos de sistema de control, lazo cerrado y abierto.....	5
1.1.1.4. Variable	8
1.1.1.5. Tipo de señal	9
1.1.1.6. Equipos de control y actuadores.....	11
1.1.2. Automatización de sistemas de inyección de aire comprimido	14
1.1.2.1. Señal de entrada y señal de salida.....	14
1.1.2.2. PLC, programación y accionamiento ...	15
1.1.2.3. Punto de ajuste.....	16

1.1.2.4.	Controlador de proceso PID	17
1.1.2.5.	Accionador	18
1.1.3.	Instrumentación y medición de flujo	20
1.1.3.1.	Supervisión y control	21
1.1.3.2.	Recolección de datos	21
1.2.	Proceso de fermentación	22
1.2.1.	Fermentación de cerveza	23
1.2.1.1.	Fermentación a alta temperatura	23
1.2.1.2.	Fermentación a baja temperatura	24
1.2.2.	Aireación en mosto.....	25
1.2.2.1.	Parámetros en aireación de mosto.....	25
1.2.3.	Propagación de levadura.....	26
1.2.3.1.	Parámetros en aireación de levadura..	27
1.2.3.2.	Cosecha de levadura y aireación	28
1.2.4.	Tanques de fermentación.....	28
1.2.5.	Consecuencias de un débil control en la inyección de aire en fermentación de cerveza	31
1.3.	Mantenimiento predictivo en zonas de aireación	31
1.3.1.	Alimentación de histórico de parámetros.....	34
1.3.2.	Justificación del costo de implementación.....	34
1.3.3.	Parámetros de proceso en válvulas de control.....	36
1.3.4.	Análisis de fallas.....	37
1.3.5.	Intervención de mantenimiento	37
1.3.6.	Inspección de fugas por ultrasonido acústico.....	38
1.4.	Marco contextual de la Industria cervecera en Guatemala	39
1.4.1.	Inicios de la industria en Guatemala	40
1.4.2.	Evolución de la industria cervecera en Guatemal ...	41
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	43

2.1.	Visita de reconocimiento.....	46
2.2.	Parámetros y límites de las variables de operación	50
2.3.	Recopilación de la información.....	51
2.4.	Recopilación de datos tras una intervención de una variable..	55
2.5.	Plan de mantenimiento de las zonas de aireación	57
3.	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	59
3.1.	Presentación de resultados	59
3.1.1.	Presentación de datos de aireación de mosto	60
3.1.2.	Presentación de datos de aireación de levadura en almacenamiento	63
3.1.3.	Presentación de datos de aireación en propagación de levadura	66
3.2.	Discusión de resultados.....	68
3.2.1.	Comparación con antecedentes	77
4.	DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN.....	79
4.1.	Elementos del sistema de control propuesto	79
4.1.1.	Instalación.....	81
4.1.2.	Instrumentación para control	86
4.2.	Propuesta de Mantenimiento basado en condición	87
4.2.1.	Inspección de variables	88
4.2.2.	Análisis por ultrasonido para detección de fugas....	89
4.2.3.	Rutina de Inspección de variables	92
4.2.4.	Matriz del modo de fallas	95
	CONCLUSIONES	97
	RECOMENDACIONES.....	99
	REFERENCIAS	101

APÉNDICES.....	109
ANEXOS.....	115

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama de proceso sistema lazo abierto	6
2.	Diagrama de proceso sistema lazo cerrado	7
3.	Gráfico de una señal digital	10
4.	Gráfico de una señal analógica	11
5.	Gráfica tiempo de reacción	18
6.	Válvula de desplazamiento proporcional.....	19
7.	Tanque cilíndrico de fermentación.....	29
8.	Geometría de un tanque	30
9.	Espectro de audio	39
10.	Proceso estándar de fabricación de cerveza	44
11.	Instalación control inyección de aire a proceso.....	46
12.	Pantalla de medición características de inyección de aire	47
13.	Control de aire en propagación de levadura	48
14.	Control de inyección de aire en levadura	49
15.	Formato orden de trabajo esterilización e inspección de línea zona de aireación.....	58
16.	Gráfico de control de flujo de aire en inyección en mosto	61
17.	Gráfico de control de presión de aire en inyección en mosto.....	62
18.	Gráfico de control oxígeno disuelto en mosto	63
19.	Gráfico de control de flujo de aire en levadura	65
20.	Gráfico de control de presión de aire en levadura.....	65
21.	Gráfico de control de flujo de aire en propagación	67

22.	Gráfico de control de presión de aire en propagación	68
23.	Diagrama de cajas y bigotes del flujo de aire para la inyección de aire	70
24.	Diagrama de cajas y bigotes del oxígeno disuelto en mosto	70
25.	Diagrama de cajas y bigotes del flujo de aire para la inyección de aire luego de la intervención realizada.....	71
26.	Diagrama de cajas y bigotes de oxígeno disuelto en mosto luego de la intervención realizada	72
27.	Relación flujo de aire y oxígeno disuelto en mosto, previo a control constante del flujo de aire	74
28.	Relación flujo de aire y oxígeno disuelto en mosto, posterior al control constante del flujo de aire	75
29.	Diagrama de instalación de dispositivos	81
30.	Regulador de presión de aire en línea	82
31.	Válvulas manuales de bola	83
32.	Caudalímetro con principio vortex para detección de gases y vapores	84
33.	Válvula de control proporcional de desplazamiento lineal	85
34.	Posicionador de válvula	86
35.	Regulador de presión proporcional	87
36.	Ejemplo de gráfico de control del flujo de aire	89
37.	Orden de trabajo y registro para análisis por ultrasonido de las estaciones de aireación	91
38.	Inspección en campo por ultrasonido aéreo	92
39.	Ejemplo de gráfico de cajas y bigotes del registro de flujo de aire	94

TABLAS

I.	Variables de investigación	XX
----	----------------------------------	----

II.	Clasificación de variables.....	8
III.	Clasificación de las señales de proceso.....	9
IV.	Clasificación de actuadores	13
V.	Tipos de propagación.....	27
VI.	Matriz de modo de fallas	36
VII.	Gastos promedio de hogar en guatemala 2020	41
VIII.	Datos de aireación de mosto.....	52
IX.	Datos de aireación de levadura en almacenaje	53
X.	Datos de aireación en propagación de levadura	54
XI.	Datos de aireación de mosto bajo intervención de válvula de aguja para regulación flujo de aire	55
XII.	Valores óptimos para aireación de mosto y levadura.....	59
XIII.	Medidas de tendencia central para la aireación de mosto	60
XIV.	Medidas de tendencia central para la aireación de levadura	64
XV.	Medidas de tendencia central para propagación de levadura	66
XVI.	Grado de correlación entre flujo de aire y oxígeno disuelto en mosto..	73
XVII.	Registro y estadística descriptiva de los datos.....	93
XVIII.	Matriz de fallas para la zona de aireación	95

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CA	Corriente alterna
CC	Corriente continua
CO ₂	Dióxido de carbono
%	Fracción de cien
°C	Grados Celsius
hL	Hectolitro
L/min	Litros por minuto
pH	Medida de alcalinidad o acidez de una solución
bar	Medida de presión equivalente a 1 atmósfera
mmol	Mili mol, cantidad de sustancia igual a una milésima de un mol
mA	Miliamperio
mL	Mililitro
VVM	Volumen de aire sobre volumen medio por minuto

GLOSARIO

Aireación	Acción de inyectar aire a un medio por un periodo de tiempo.
Controlador	Programa o dispositivo que permite interactuar un actuador.
DIN	Instituto alemán de normalización.
Estado	Situación de un objeto o persona en un momento dado.
<i>Feed</i>	Alimentación de una señal.
Fermentación	Proceso bioquímico en que un organismo se transforma en otra sustancia.
Glucosa	Monosacárido o azúcar presente en un medio.
Levadura	Hongo con enzimas capaces de generar fermentación alcohólica.
PID	Proporcional integrativo derivativo.
PLC	Controlador lógico programable.

PC	Computadora personal.
RPM	Revoluciones por minuto.
SCADA	Control, supervisión y adquisición de datos.
<i>Set point</i>	Punto de ajuste.
<i>Span</i>	rango de medición, tomado entre el punto superior e inferior.

RESUMEN

La automatización de procesos y control de variables permite a las industrias tener etapas productivas eficientes, procesos estándares y con trazabilidad de cómo se estuvo operando en cierto periodo de tiempo. En una industria fabril de cerveza para consumo masivo se propuso la automatización del sistema de inyección de aire en mosto y levadura en una unidad con válvulas manuales.

Para el desarrollo del proyecto se realizaron visitas de reconocimiento y levantado de datos para conocer la eficiencia del equipo; se hizo una intervención en la cual se controlaron las variables, para luego hacer un experimento de corrección en forma inmediata, lo que mejoró la estabilidad del proceso, mostrando correlación entre variables de interés y se evidenció la necesidad de un control automatizado.

Se moduló un sistema para la automatización y retroalimentación de la inyección de aire. Asimismo, se propuso el mantenimiento basado en condición para estas unidades de dosificación de aire.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

En la elaboración de cerveza hay dos etapas dentro del proceso de fermentación en las cuales se ha definido que es necesario airear, inyectar aire a presión y a flujo constante. Las dos etapas son: preparación de mosto y preparación de levadura. Es de gran importancia contar con un proceso controlado y estable para asegurar el éxito de la maduración de la cerveza y obtener la calidad requerida de esta. A la fecha de investigación, el control de la variable de flujo de aire se estaba ejecutando con una válvula de aguja, la cual es para uso preciso, pero está sujeta a distorsiones por el entorno; ya sea vibraciones de motores cercanos o inclusive el error humano por parte de los operadores del área. Si por cualquiera de los motivos anteriormente citados la válvula se mueve y cambia el estado del aire no se cuenta con el proceso para control de la variable necesario como para detectar un desfase, lo que ocasionaría tener un tanque de aproximadamente 6 000 hl con problemas y un posible reproceso. Por ello se ha planteado automatizar el sistema con un controlador de presión, una válvula de desplazamiento lineal de 4 a 20 mA para apertura y *setear* el valor deseado para obtener gráficos de control y *feedback* de la variable.

Este inconveniente ocurre de la siguiente manera: uno, cuando se ha terminado la cocción de mosto y este se ingresa al tanque fermentador, esto sucede unas nueve veces al día durante seis días a la semana. Dos, para iniciar con el ciclo de manejo de levadura para fermentar, una vez a la semana se prepara este insumo. Por lo tanto, los límites de investigación son los de automatización de flujo del gas con la instrumentación adecuada, conocer los

flujos aceptados de la variable y determinar cómo varía el desfase por alteraciones en la inyección de aire. Las posibles causas son: la falta de actualización de la tecnología usada, la válvula actual es de accionamiento mecánico únicamente, la instalación de los dispositivos de lectura es incorrecta y la actual interfaz del proceso no contempla el control de la variable de inyección de aire, derivado de estas causas se obtienen los siguientes efectos: el actual equipo limita la automatización del proceso, la válvula mecánica de agua pone en riesgo la operación por error humano, lectura inadecuada de la variable de control y no se puede controlar la variable de interés desde la sala de control.

La pregunta central de investigación es ¿Qué sistema de automatización se puede establecer para el control de aireación de mosto y levadura del proceso de fermentación en una industria cervecera?

Las preguntas orientadoras son:

- ¿Cuáles son las condiciones actuales de operación del sistema de aireación a la fecha de investigación?
- ¿Cuál es la metodología adecuada de operación y control de inyección de aire en mosto y preparación de levadura en la etapa de fermentación?
- ¿Qué diseño de instrumentación permite la automatización de la variable de flujo de aire en inyección de mosto y levadura?

OBJETIVOS

General

Establecer un sistema de automatización para control y estandarización de la etapa de aireación en mosto y levadura en el proceso de fermentación en una industria cervecera.

Específicos

1. Identificar las condiciones de operación del sistema de aireación de mosto y levadura a la fecha de investigación.
2. Determinar la adecuada operación y control de inyección de aire en mosto y preparación de levadura en la etapa de fermentación.
3. Elaborar el diseño de automatización de la variable flujo de aire y control en línea en inyección en mosto manejo y propagación de levadura.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

El estudio fue realizado en una ruta cuantitativa, con un alcance descriptivo en un diseño pre experimental de una medición luego de la intervención con preprueba y posprueba para la aireación de mosto y no experimental para los manejos de levadura, el cual es longitudinal. Se realizaron mediciones de los parámetros del proceso de inyección de aire en las etapas de aireación de mosto, almacenaje y propagación de levadura en una industria cervecera, se tomaron datos de política del proceso en diciembre del 2021, se tomó registro de datos desde septiembre del 2021 y se estuvo tomando mediciones en campo a partir de agosto del 2022. No se modificaron los parámetros ni la operación, pero sí se intervino en dos ocasiones en la aireación de mosto en cuanto a operar verificando el proceso en todo momento y cuando se presentaba una desviación en sitio fue rectificada. Con ello se obtuvo estadísticos de tendencia central para conocer el estado de la etapa de aireación y se generaron tendencias de parámetros para ayudar con comprobar el grado de correlación entre parámetros, establecer el control del proceso, asimismo, se proyectó un diseño para el mantenimiento basado en condición de las zonas de aireación, con la finalidad de conservar adecuadamente todo el mecanismo, tanto elementos en contacto con el proceso como los dispositivos de control.

Las unidades de análisis las constituyen las zonas de aireación de mosto, almacenamiento de levadura y propagación de levadura de una industria cervecera. Las tres zonas de aireación comparten una distribución similar en cuanto a disposición y funcionamiento, variando en cuanto al flujo de aire necesario para cada proceso según requerimiento de los mismos. La tabla I muestra el cuadro de variables y la relación que existe entre estas.

Tabla I. **Variables de investigación**

No.	Variable independiente	Variable dependiente
1	Presión de aire	Proceso metabólico de levadura
2	Caudal de aire	
3	Oxígeno disuelto en mosto	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Las fases de investigación se realizaron en la ruta:

- Revisión documental: la búsqueda de los documentos que son el sustento para de esta investigación se realizó en Google académico, e-libro y Redalyc. De los motores de búsqueda en línea se tuvo alcance a artículos científicos, trabajos de graduación y libros que se relacionan con los temas principales de investigación. Las palabras levadura, mosto, aireación, transferencia, oxígeno, aeróbico, cerveza y metabolismo fueron la clave de búsqueda. La indagación de temas y recopilación se ejecutó en el lapso de junio a diciembre del 2021.
- Instrumentos de recolección de información: fueron contruidos luego de las visitas de reconocimiento, información tabulada que se establecieron antes de la investigación, adicionalmente, la experiencia de campo y acompañamiento de asesoría. Esta información es un compendio de parámetros que son necesarios conocer entre los cuales están el caudal de aire necesario, transferencia de oxígeno, presión de aire y correlación entre estas variables. Se presentaron formatos de tablas vacías las cuales fueron la guía de la recopilación de la información durante el todo el trabajo de campo. Como resultado del trabajo en sitio, se añadieron apartados que resultaron necesarios determinar para la investigación

- Trabajo de campo: se inició con dos primeras visitas de reconocimiento del proceso, en la primera se comprendió el flujo del proceso, mecanismos y dispositivos que lo comprenden; durante la segunda visita de reconocimiento se logró establecer la importancia de la etapa de acondicionamiento de levadura, asimismo, la política de las variables implícitas, entiéndase máximos, mínimos o intervalos. Posterior a determinar los valores de ajuste y el flujo de proceso se fue al sitio a recolectar datos y tabularlos. También en sitio se hizo una visita para controlar exhaustivamente el proceso y así simular una sistematización de corrección de la variable. Por último, se realizó una investigación paralela de la condición de mantenimiento realizada previo a la investigación y de los elementos de control para la sistematización de la etapa de aireación.
- Redacción de informe final: luego del reconocimiento del proceso se procedió y el levantado de datos se procedió a hacer el análisis estadístico para conocer el comportamiento del proceso, correlación de variables e iniciar a modelar el proceso. El análisis estadístico comprende el estudio de las medidas de tendencia central del comportamiento de aireación, gráficos de control en el cual se observan los alcances de las variables contra los límites establecidos para el proceso, gráficos de cajas y bigotes para conocer qué tan centrados y precisos son los eventos suscitados en el proceso. Se logró determinar la correlación de las variables de flujo de aire y transferencia de oxígeno con lo cual se graficó la línea de tendencia para extraer la ecuación de la curva y así poder proyectar un evento si fuese requerido. Se finalizó con un diseño de sistematización de la variable de flujo de aire para que el proceso se logre establecer en el tiempo y la calidad del producto se logre conservar y poder proceder a llevar trazabilidad en esta etapa. Se culminó esta etapa con la recomendación de mantenimiento basado en condición para estas zonas de aireación en

las cuales es necesario evaluar constantemente cómo se comportan las variables para recomendar una intervención en sitio por un mecánico o electricista para que se trabajen los inconvenientes que presente la instalación por pequeña que sea. Este mantenimiento basado en condición demanda que constantemente se estén revisando gráficos de proceso para que se diagnostique correctamente qué elemento pueda iniciar a presentar un fallo y así eliminar las causas raíz que generan los inconvenientes que se pueden ir agravando en el tiempo.

INTRODUCCIÓN

La investigación tratada muestra una sistematización porque genera el escenario para el control adecuado, regulación en tiempo real para valores de la variable de flujo de aire en zonas de aireación a mosto y levadura, bajo límites denominados *set point*, así como una metodología de mantenimiento basado en condición para estas zonas de aireación que demandan intervención cuando existen tendencias de desvío. El problema de investigación es que el sistema utilizado hasta la fecha de investigación es manual, no se autorregula ni deja un histórico de comportamiento. La aplicación de la automatización por vía de un lazo de control cerrado constituye la forma adecuada para minimizar un impacto cuando suceden desviaciones no deseadas en el sistema como lo pueden ser interferencias en la presión de aire o fugas que disminuyen el flujo de aire comprimido reduciendo así un impacto negativo en la preparación de mosto y de levadura.

La propuesta se realizó a través de las siguientes fases: revisión documental acerca de los procesos de fermentación y la importancia del control de aireación para el arranque metabólico de la levadura, así como también de la estructura de automatización para un proceso de control de gas; trabajo de campo en el cual se hizo el registro de datos, se tabularon los valores de las variables principales de presión, caudal de aire y transferencia de oxígeno, para lo cual se usó instrumentos como flujómetro, manómetro y un cabezal de medición de oxígeno disuelto en cerveza; posteriormente se realizó el trabajo de gabinete el cual consistió en el análisis estadístico de datos, generación de tendencias y verificación de la correlación de las variables de flujo de aire y transferencia de oxígeno disuelto en mosto. En esta sección también se hizo la

propuesta de automatización del proceso para que la variable se auto ajuste a medida que las variables van tomando valores alejados de los parámetros deseados, se formó también la metodología de mantenimiento basado en condición, focalizado para las unidades de aireación.

El capítulo I muestra el marco teórico el cual es el sustento teórico para comprender el proceso de fermentación en el cual a través de la levadura el mosto convierte los azúcares presentes en él los alcoholes necesarios para obtener cerveza, se amplían los conceptos básicos de elementos de automatización y dispositivos de control para regulación de fluidos gaseosos, así mismo se conceptualiza la densidad de la industria cervecera en Guatemala, su evolución y densidad en los últimos años. Por último, se comparten metodologías de inspección y verificación como mantenimiento basado en condición.

El capítulo II presenta el desarrollo de la investigación en el cual se hizo el trabajo de campo que consistió en visitas de reconocimiento, conocimiento de políticas de operación y el levantamiento de datos necesarios para poder conocer el estado a la fecha de investigación del proceso de aireación en mosto y levadura para determinar qué tan desviado se encuentra el proceso.

El capítulo III presenta la discusión de resultados en el cual se pudo observar que el proceso de aireación de mosto tiene una diferencia en el flujo de aire por debajo de $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$, esto genera problemas en transferencia de oxígeno lo cual puede ocasionar que el transcurso metabólico de la levadura no sea correcto y no pueda procesar adecuadamente los azúcares para fermentar, al hacer una prueba en la cual se corregían inmediatamente las desviaciones de caudal se pudo comprobar que se estabiliza de mejor forma la transferencia de oxígeno y se tienen datos más centralizados.

En el capítulo IV se presenta la propuesta de solución, la cual plantea que la automatización de la etapa de regulación de flujo de aire hacia el mosto, almacenamiento y propagación de levadura bajo un lazo de control cerrado el cual ayude a autorregular el flujo de aire contribuirá a que exista una correcta transferencia de oxígeno para los medios descritos y la levadura pueda hacer se pueda activar y tener un metabolismo adecuado para una fermentación estable y obtener un producto final que se encuentre en parámetros de calidad altos y dentro de lo requerido. Dado que es un proceso delicado porque pequeñas fugas pueden afectar fuertemente, también se planteó un proceso de mantenimiento basado en condición en el cual se busca que la conservación de la instalación sea adecuada y se anticipe a fallas en el proceso.

1. MARCO TEÓRICO

La industria cervecera es dinámica y cada vez más exigente, lo que demanda procesos eficientes y estandarizados. Dentro de las etapas de elaboración de cerveza se encuentra la fermentación. En ella hay dos subprocesos que son bastante delicados, los cuales son los de aireación de mosto y de levadura. Ambos involucran inyección de aire bajo ciertos parámetros.

La propagación de la levadura es quizá uno de los subprocesos de elaboración de cerveza más importantes, pues tiene como finalidad incrementar la biomasa disponible para dar apertura al proceso de fermentación. La propagación y la inyección de aire en mosto deben ser controlados adecuadamente, puesto que, inician la etapa de fermentación la cual es clave para esta bebida alcohólica (Albarracín, 2020).

El proceso de control de la variable de inyección de aire es un punto crítico de control para el mosto y manejo de levadura previo a iniciar el proceso de fermentación de cerveza.

1.1. Automatización

La industria cada vez se encuentra más sumergida en sistemas más dinámicos, eficientes y competitivos. Han sido notorias las mejoras en los procesos de control de calidad y especificaciones técnicas. La automatización ha logrado que los procesos sean flexibles y con ahorro de tiempos y costos (García, 2011).

Un proceso automatizado proporciona a una industria confiabilidad, estandarización y confiabilidad de cómo ciertos parámetros varían en un proceso y oportunidad de verificar cómo evoluciona un proceso. Se puede determinar cuándo se puede causar una anomalía o desviación de este.

Tal y como menciona Izaguirre (2012), las industrias modernas presentan necesidades de obtención de sistemas controlados que generen información de valor para una organización, para que luego se envíen a servidores y los datos se almacenen para su posterior análisis, basando la automatización en representación, crear complementos de control y almacenaje de información. La primera función será lectura en vivo del proceso y variables de interés en dos formas; una, lectura del valor tomado la variable de forma instantánea, dos la creación de un gráfico de comportamiento. Luego de la lectura están la intervención de la variable en dónde se ejerce una rectificación bajo un *set point* si en dado caso es necesario. Por último, es deseable obtener la historia en el tiempo que se considere conveniente para la trazabilidad de la variable.

Tal y como se ha visto anteriormente lo que busca la automatización, de manera estratégica, es tener procesos repetitivos y minuciosos operados por dispositivos, pero trasfondos también se puede obtener estandarización, visión en vivo, rectificación, intervención y posterior revisión de una variable de interés en procesos diversos.

1.1.1. Sistemas de control

Para entender primariamente qué es un sistema de control, se le debe entender como a un mecanismo que ejerce una actividad sobre un sistema. Se puede decir de forma genérica que un sistema de control es en el que se tienen

inputs y el sistema de control ejecuta actuaciones (Ñeco, Reinoso, García, Aracil, 2013).

Para ejemplificar la anterior definición se puede mencionar el sistema de enfriamiento de los vehículos, que mediante un termostato se ejercen actividades como encender la ventilación forzada, cuando la temperatura alcanza un límite superior, para ayudar a que el circuito de agua en el radiador pierda energía y la temperatura disminuya para que pueda haber un mejor intercambio en la camisa del block del motor. Mediante el *termoswitch* cuando la temperatura del agua desciende a valores permisibles por la computadora del vehículo se desconecta el ventilador. Es así como el sistema de control ha ejercido su tarea para alcanzar un objetivo y mantener parámetros estables.

Los sistemas de control como lo comenta Izaguirre (2012) de control se encuentran caracterizados por los medios técnicos, controladores y computadoras; comunicación, bases y buses de datos; automatismo, el enlace y la programación. Los sistemas de control digitales se agrupan en sistemas de control distribuido, control por microprocesadores y los sistemas de control supervisado y adquisición de datos SCADA cuyo código está destinado a llevar un control por un ordenador sobre un proceso de campo.

Este último concepto da un alcance más profundo en la técnica de automatización y cómo los sistemas de control ejercen influencia en un sistema para alcanzar un objetivo propuesto.

1.1.1.1. Elementos de un sistema de control

Ñeco *et. al.* (2013) define que los elementos mínimos para que un sistema de control opere son: variable, conocida como señal de salida; planta o sistema,

o elementos que ejecutarán una operación; sensor, captura el valor de una variable en un momento dado; señal, con la que la variable será leída; actuador, ejerce trabajo; controlador, comanda el trabajo. De manera que es necesario tener una variable que medir en un sistema para que se detecte como se encuentra en cualquier momento y generar un trabajo requerido en momentos prefijados por un programa o código.

Otros autores como Entrena (2015) lista más elementos, y añade a los mencionados previamente, la red de alimentación, para alimentar de energía al sistema; armarios eléctricos cuya función es proveer una atmósfera protectora a los dispositivos eléctricos que hacen ejecutar el control de un sistema; Pupitre o mando de control, que es la pantalla para que un operador pueda ejercer control en el sistema; cableado, los encargados de transmitir señales, pre actuadores que se usan en casos especiales.

Aunque ambos autores citados previamente listan y detallan a profundidad los elementos de un sistema de control, lo que hay tener claro es que se debe llevar un orden secuencia en definir primeramente la variable a controlar y manipular, la señal y sensor adecuados a utilizar en el sistema para posteriormente diseñar el circuito y dimensionar los instrumentos a usar en la lectura de la variable y los dispositivos que ejercerán trabajo en el sistema.

1.1.1.2. Tecnologías aplicadas

En cuanto a tecnologías para automatización de procesos se pueden identificar dos: lógicas cableadas y lógicas programables. Entrena (2015) infiere en que las tecnologías cableadas son las que se pueden encontrar en circuitos en los que se usan contactores y relés para hacer el control de un circuito. La finalidad de los dispositivos como los contactores es abrir o cerrar circuitos y

elementos como los relés activan protecciones para interrumpir circuitos en momentos definidos. Mientras que, las tecnologías programables adoptan en sus controles vía un software que tiene un código de ejecución y esto lo consiguen a través de dispositivos como los PLC y mediante una PC el control se puede hacer remotamente.

Izaguirre (2012) castellanos menciona que dentro de las tecnologías programables se pueden encontrar los sistemas lógicos y los sistemas diferenciales. Los sistemas lógicos usados para eventos discretos en los que se requieren procesos donde se asegure la secuencia lógica y ordenada, en estos no interesa leer una variable en todo momento sino respetar un proceso con sus secuencias. Los sistemas diferenciales son usados cuando interesa monitorear continuamente una variable como podría ser el caso de la presión en una línea de vapor.

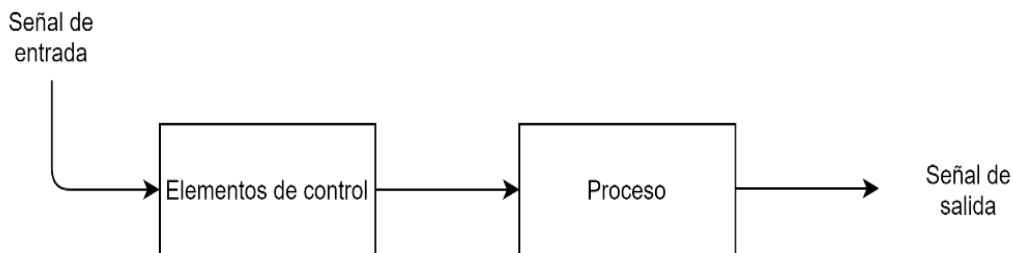
Cabe mencionar que, en las tecnologías programables no es que indiquen que no usen cableado. como en las lógicas cableadas, también la transferencia de datos se logra a través de ellos, pero el control es llevado a cabo por un PLC o un software con un código que ejecuta sistemas complejos; en tanto que en las lógicas cableadas es un dispositivo el que genera el control limitado en opciones.

1.1.1.3. Tipos de sistema de control, lazo cerrado y abierto

Los sistemas básicos de control son los de tipo lazo abierto o cerrado, también conocidos como bucle abierto o cerrado. Como lo explica Vasquez (2016), los sistemas de lazo abierto son aquellos en los que la señal de salida no ejerce ninguna acción sobre el control del proceso. Ñeco *et. al.* (2013) hace la observación que en los sistemas de bucle abierto el controlador o regulador al

realizar su trabajo no considera los valores de la señal de salida, tampoco compara una señal de referencia para tomar una decisión en algún punto. En la figura 1 se visualiza el diagrama de un sistema de control abierto, de este diagrama se puede visualizar que el sistema de lazo abierto es sencillo y se puede asociar a un proceso de abertura o posicionamiento de una válvula *on-off*, donde no es de suma importancia los valores del proceso sino tomar un valor lógico y ejecutarlo.

Figura 1. **Diagrama de proceso sistema lazo abierto**



Fuente: Entrena. (2015). *Instalación de equipos y elementos de sistemas de automatización industrial*.

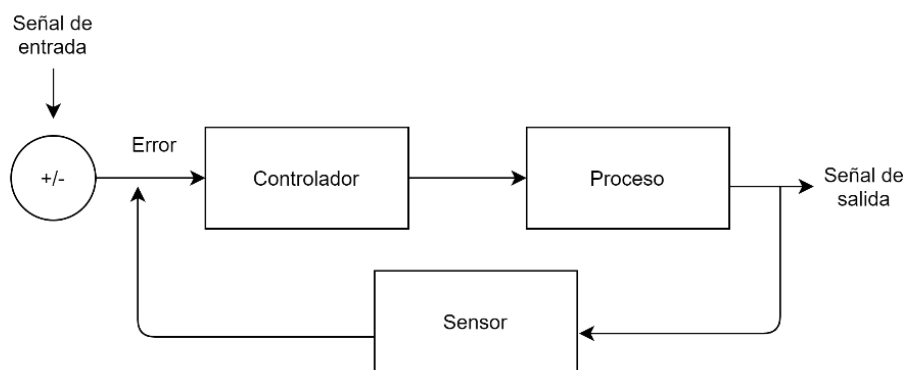
En cuanto que, en los sistemas de lazo cerrado hay influencia de la señal de salida sobre la variable que se encuentra en control del sistema. El control se hace mediante la comparación del valor de la variable de interés con una señal referencia y es en función de esta diferencia que el controlador ejerce un trabajo sobre la variable a través de actuadores (Ñeco *et. al.*, 2013).

La retroalimentación se hace mediante una señal de error actuante es esta la diferencia entre el valor de la señal de entrada y el *feed*, esta señal entra al

controlador y este lo que trata es reducir un error en el valor de la señal de salida a un valor requerido. Esto continuamente lo ejecuta el sistema (Vasquez, 2016).

En la figura 2 se puede ver el diagrama de proceso cerrado y visualizar la diferencia con el de lazo abierto y corroborar que la señal de salida genera retroalimentación en la salida para que el controlador pueda rectificar el proceso si en dado caso hay una desviación no deseada.

Figura 2. Diagrama de proceso sistema lazo cerrado



Fuente: Ñeco *et. al.* (2013). *Apuntes de sistemas de control.*

En continuación con los ejemplos de válvulas, se puede inferir luego de haber contextualizado lo anterior que, para una válvula con posicionador reguladora de flujo o presión, usará un sistema de lazo cerrado. Debido a que una variable continuamente en el tiempo toma valores según los fenómenos del ambiente y será esta válvula la que disminuya el error o regrese la variable a valores permisibles previamente ajustados.

1.1.1.4. Variable

Una variable en un sistema es todo aquel valor caracterizado que está relacionada a un sistema y cuyos valores están controlados. La complicación de una variable y la forma en poder detectarla y dimensionarla dicta la complejidad del sistema de control (Izaguirre, 2012).

Entonces una variable puede ser algo desde una presión de un fluido, la temperatura de trabajo de un proceso, la cantidad de corriente en un circuito y tan fácil de detectar como la posición de un émbolo o tan complejo de medir como el punto de rocío de un gas.

En la tabla I se puede observar la división que se ha hecho por parte de Izaguirre y cómo ha clasificado las variables según su naturaleza dentro un sistema.

Tabla II. Clasificación de variables

Tipo de variable	Descripción
De control	Es aquella variable que busca estar cerca continuamente a un valor establecido llamado <i>set point</i> .
De manipulación	Busca corregir perturbaciones, señal de salida de un actuador.
Perturbadora	Genera inestabilidad al provocar cambios indeseados en el sistema.
Medida	Toda aquella que, aunque no es necesario medir si es requerido medir, monitorear o visualizar
Calculada	Es la variable que surge luego de realizar cálculos a través de otras variables.
Introducidas manualmente	Son los valores que fueron ingresados por terceros al sistema para alimentarlo

Fuente: Izaguirre (2012). *Sistemas de automatización*.

1.1.1.5. Tipo de señal

La señal que ingresan los sistemas de control como lo define Neco *et. al.* (2013) puede que tengan características definidas según la inherencia de un sistema. Izaguirre (2012) comenta que dado que una variable representa la magnitud de una señal física que es lo que caracteriza el proceso es importante definir y clasificar los tipos de variables que se pueden encontrar en los procesos y estrictamente en el sentido general se puede clasificar a las señales como aperiódicas, periódicas y de procesos estocásticos, todas pueden ser continuas o discretas. La tabla II describe una detallada clasificación de las señales.

Tabla III. **Clasificación de las señales de proceso**

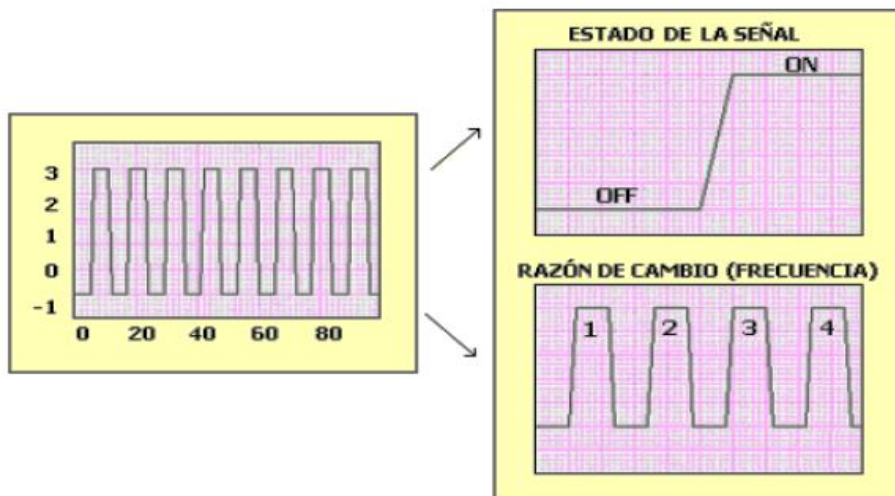
Tipo de señal	Descripción
Aleatorias	Aquellas que por su instante de medición generan incertidumbre.
Determinísticas	Valores especificados para un instante de tiempo dado.
Reales y complejas	Según si representan números reales o complejos.
Continuas	De dos estados, ON-OFF, medición de pulsos que se asocian a una señal.
Analógicas	Su valor varía y manifiesta con respecto al tiempo, normalmente se representan como funciones sinusoidales.
Discretas	Aquellas cuyo valor están definidas en ciertos intervalos de tiempo como muestreo de una señal continua.
Cuantificadas	Son señales discretas donde los valores de amplitud han sido limitados a un número de valores cuantificados.

Fuente: Tello (2017). *Introducción a las señales y Sistemas*.

En la industria existen dos señales mayormente encontradas en los procesos, las cuales son las digitales y analógicas y es importante entender la diferencia entre ellas. En la figura 3. Se puede apreciar el comportamiento de la

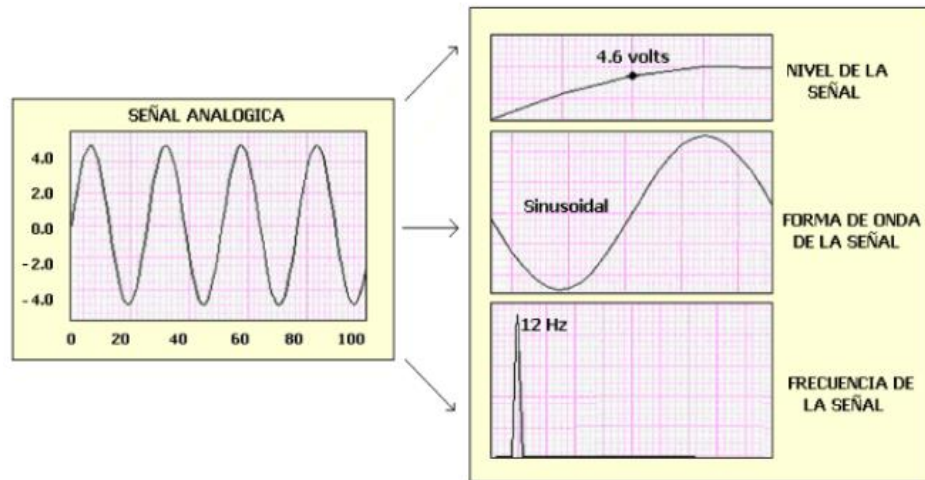
señal digital, en la cual se puede observar que ocurren pulsos en un intervalo de tiempo, esta señal alcanza una amplitud a través del tiempo donde se encontrará la frecuencia. Estas señales analógicas muestran el estado de un proceso, el cual se traduce en *on* u *off* que se pueden ejemplificar con una válvula de paleta en el cual, cuando está en la posición cerrada el estado es *off* y cuando está abierta el estado es *on*. Y como vaya cambiando en el tiempo es la frecuencia de la señal. La amplitud representa normalmente valores de voltaje ya sea en corriente continua o alterna.

Figura 3. **Gráfico de una señal digital**



Fuente: Izaguirre (2012). *Sistemas de automatización*.

Figura 4. **Gráfico de una señal analógica**



Fuente: Izaguirre (2012). Sistemas de automatización.

En la figura 4 se ve el esquema de cómo actúa una señal de tipo analógica. Se puede apreciar que estas señales tienen una forma sinusoidal, cuya amplitud es la cantidad de voltaje alcanzado. En la figura también se puede apreciar que estos gráficos se pueden desarrollar para generar los espectros cuyo valor instantáneo de onda en el dominio de la frecuencia alcanzada. Una característica importante de mencionar que es una lectura constante o continua es por ello que se tiene un gráfico con valores diferentes a través del tiempo.

1.1.1.6. Equipos de control y actuadores

El control de un sistema de automatización se puede ejecutar mediante reguladores analógicos o digitales. El tipo de regulador a usar irá dictaminado por según los valores que adquieran las variables, los reguladores analógicos procesan las señales de variables continuas, se registra la variación de la señal de interés. Mientras que los reguladores digitales convierten o codifican una señal

analógica a una de tipo digital para que un controlador digital pueda leer la señal que le envía el regulador (Entrena, 2015).

La importancia de estos dispositivos radica en que son los reguladores los que estabilizan un proceso y mantienen una variable en valores dentro de límites previamente fijados.

Izaguirre (2012) explica que los reguladores digitales han llegado a un punto en el que se aplican con seguridad a medios atmosféricos peligrosos, como los que riesgos de explosión, protegen también los circuitos de probables cortos, se minimiza así el riesgo.

Hasta ahora se ha explicado el elemento del circuito que ayuda a que una variable tome valores constantes en el tiempo. Pero ¿cuál es el que general el trabajo en el tiempo? Esta tarea la desempeñan los actuadores. Tal y como lo describe Entrena (2015) los actuadores realizan movimientos en un mecanismo para alterar el sistema en la que una variable se encuentra controlada. De manera que, son estos los dispositivos que ejecutan funciones físicas para conservar un estado o alterarlo con la finalidad de que la variable se encuentra estable según límites fijados a través del tiempo.

La tabla III ha descrito las cuatro principales divisiones de actuadores que hay según su naturaleza de funcionamiento, se asocian los funcionamientos de la tabla con los de sistemas de aire se puede decir que el actuador para un sistema de estos sería una mezcla entre neumático, para lograr un posicionamiento rápido y lineal de una válvula y electrónico para ajuste de la regulación.

Tabla IV. **Clasificación de actuadores**

Tipo de actuador	Descripción
Neumáticos	Operan bajo el principio de compresión de los gases (aire), desplazándose a través de recámaras. Los hay lineales, cilindros que desplazan aire actúan émbolos y los de tipo rotativos que desplazan mecanismos de tipo cremallera y piñón.
Eléctrico	Estos actuadores normalmente asocia a un mecanismo con un motor acoplado a este. Los motores los hay de: <ul style="list-style-type: none"> • Corriente alterna (CA), alimentados a redes de distribución industriales y comandados con variadores c. • Corriente continua (CC), como los alimentados por baterías. • Motores paso a paso, trabajan con la transformación de pulsos en rotación. • Servomotores de corriente continua, generan la acción por el circuito de control, tienen la ventaja de variar su rango de giro.
Electrónicos	Estos ayudan con alternación del estado del sistema, los principales son: <ul style="list-style-type: none"> • Arrancadores, generan control sobre la potencia de un motor en su arranque o en su parada para que estos sean lentos. Contribuyen a que no se generen picos altos en los inicios de los ciclos de un proceso que ayudan a disminuir costes. • Los variadores controlan la velocidad de operación de un motor de corriente alterna • Electroválvulas, accionadas por un solenoide normalmente son usadas para controlar el flujo de un fluido, en su mayoría de tipo <i>on/off</i>.
Hidráulicos	Usados para mover altas cargas por su principio de incompresibilidad y los hay de los siguientes tipos: <ul style="list-style-type: none"> • Cilindros que desplazan fluido entre recamaras para accionar un émbolo. • Motor hidráulico, transforma la presión en movimiento en un par motor

Fuente: Entrena (2015). *Instalación de equipos y elementos de automatización industrial*.

1.1.2. Automatización de sistemas de inyección de aire comprimido

En la automatización de sistemas de aire comprimido según Castelló, Barrera, Pérez y Betoret (2018) se necesitan los siguientes elementos: Compresor de aire, acumulador de aire comprimido, válvulas de paso, actuadores para regulación de presión o flujo o para ejecución de trabajo, y la máquina final. Dentro de los elementos listados se debe tomar en cuenta algunos otros dispositivos como lo son: secadores para eliminar exceso de humedad, filtros para eliminar las impurezas que pueda transportar el aire comprimido, separadores por si en la instalación son colocados lubricadores que sean estos los que ejecuten la tarea de separar el lubricante del aire, condensadores para atrapar las partículas de aire que puedan ir atrapadas en el flujo de aire.

Como se ha visto previamente se debe considerar todos los elementos que hacen funcionar un circuito pues todos son indispensables para llevar a cabo cierto trabajo. En cuanto a automatización existen dos elementos que tienen estas bondades: las válvulas de paso y los actuadores, que generan perturbaciones en el circuito para que una variable se estabilice o que se generen movimientos de desplazamiento.

Por último, queda definir que el accionador o actuador para regulación de flujo deberá ser un posicionador el sistema para obligar a la variable de flujo y de presión que se encuentren en rangos fiables.

1.1.2.1. Señal de entrada y señal de salida

En continuación con la idea del accionador para un sistema de regulación de flujo, fabricantes recomiendan un circuito con una electroválvula proporcional,

con una señal de presión o medición de flujo en la entrada del sistema medida por un convertidor p/i. dicho regulador modula una señal entre 4-20 mA que llega al controlador para que ajuste la apertura de una válvula de desplazamiento en secciones de 25 % de la carrera del émbolo, mediante el PID (Samson, 2007).

La señal también es de 4-20 mA. Y esta regresa al controlador para darle retroalimentación y que se cumpla un sistema de lazo cerrado para que la señal de salida genere control sobre el sistema en dado caso no se respeten los límites.

Como lo mencionan en la conferencia Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions (2012), las señales de 4 a 20 mA, o de 0 a 20 mA, en los instrumentos transmisores de presión son señales análogas normalizadas y representan versatilidad en el uso de diversos sistemas para control de ciertas variables. Por lo tanto, en el sistema que se mencionaba del lazo cerrado, tanto la señal de entrada como la de salida son señales análogas normalizadas.

1.1.2.2. PLC, programación y accionamiento

Los sistemas de tecnologías pueden ser cableadas o programables. Si se profundiza en las tecnologías programables los PLC (control lógico programable por sus siglas en inglés) tienen un papel centralizador, el cual es un equipo electrónico que se puede programar para que gobierne de un sistema (Daneri, 2008).

Izaguirre (2012) hace la mención que los PLC constan con buenas estructuras de lenguaje y por su naturaleza secuencial son aptos para tareas repetitivas donde se debe medir y enviar señales.

En cuanto a programación, dado a que estos dispositivos cuentan con hardware capaz a conexiones que susciten en las inmediaciones de los sistemas, un usuario puede ajustar y programar determinadas funciones. La programación la ejecuta de la siguiente forma: cargar estados de entrada alojándolos en la memoria del dispositivo. Al ejecutar un programa de control la memoria inicia a registrar el proceso de salida, estos estados son grabados también y son dados a las salidas físicas para que otros dispositivos las reciban y ejecuten tareas definidas, este proceso se repite cíclicamente (Daneri, 2008).

El PLC realiza el accionamiento como Daneri (2008) define, dentro del circuito de mando o de control, las salidas del mando de control son las entradas para que un circuito de potencia, conectado a alimentación eléctrica, ejecute tareas requeridas por un usuario quien las ha estructurado previamente. De tal forma que es sumamente importante entender la tarea que lleva a cabo el PLC pues es donde las señales llegan, para que este ejecute un programa y de ser necesario ajuste variables y se envían señales dentro de un sistema.

1.1.2.3. Punto de ajuste

El objetivo de automatizar un proceso o sistema es que una variable que se desea esté constante su magnitud por tiempos definidos o que varíe según un usuario desee. El valor o magnitud que debe alcanzar una variable en un sistema de automatización es llamado *set-point* como lo determinan Paez-Logreria, Ramírez-Cerpa, Días-Charris, Lopez-Torres y Miranda Pupo (2017) el punto deseado es ajustado para el sistema por un usuario para que posteriormente el controlador lógico programable calcule el valor ideal y sobre el proceso se van haciendo ajustes.

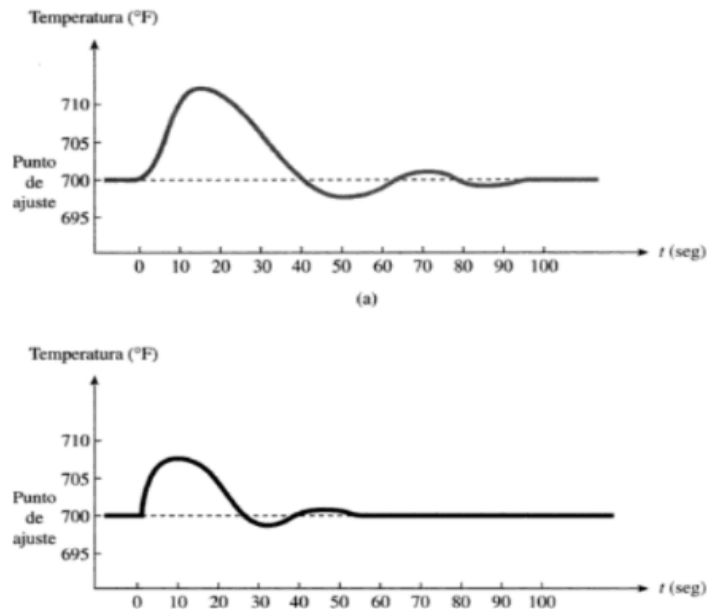
El valor de ajuste está dentro del lazo cerrado de control para que el PLC lo reconozca y a través del tiempo lo revise o controle a la vez que lo ajusta al haber una desviación, dicho ajuste lo ejecuta al enviar señales al accionador para que el sistema se estabilice.

1.1.2.4. Controlador de proceso PID

En la automatización de los procesos de lazo cerrado los PID o modo de control juegan un papel fundamental. Como lo explica Maloney (2006) los controladores de proceso lógicos se pueden encontrar en cinco modalidades: Encendido-apagado, proporcional integral, proporcional derivativo, Proporcional integral y derivativo, en los cuales el retardo de transferencia es de corto a mínimo.

Como se ve en la figura 5 el inciso a) pertenece a un modo de control proporcional y el inciso b) a un o derivativo, se ve que en el tiempo hay menos perturbación y se ajusta más rápidamente.

Figura 5. **Gráfica tiempo de reacción**



Fuente: Maloney (2006). *Electrónica industrial moderna*.

En cuanto a un controlador PID (proporcional integrativo derivativo) que como lo describe Maloney (2006) son de tipo integral más derivativo, lo que hace la computadora o programa con este control es hacer iteraciones de la parte integral derivativa para minimizar el error. La parte integral hace que el dispositivo haga correcciones gradualmente, en función en que un error ha estado presente se hacen correcciones cuando el error se localiza. Un PLC con módulos de entrada y salida analógicas puede usar el PID en procesos industriales.

1.1.2.5. Accionador

En sistemas de control y regulación de líquidos, gases o vapores es común encontrar como actuadores válvulas neumáticas con un desplazamiento lineal que controle presiones en el rango de 0 a 6 bar. Estas son usadas por su

precisión y su control en cierre de válvulas en caídas de presión. La versatilidad de estas válvulas permite que estén en rangos de diámetros de tubería desde los 15 hasta los 100 mm. en Norma DINN (Fisher, 2018).

Samson (2007) hace referencia que estos tipos de accionadores guardan una relación entre posición del émbolo de la válvula y una señal de mando o salida que enlaza el lazo cerrado. El trabajo lo ejecutan cuando se compara la señal de entrada que proviene del controlador o PLC, con la carrera del vástago, luego envían una señal de salida para constatar la posición.

En la figura siete se muestra la estructura base de una válvula de accionamiento lineal de diafragma comandada con aire para accionarse en escalas de 25 % en la posición del vástago, con señales analógicas de entrada y salida de 4 a 20 mA.

Figura 6. **Válvula de desplazamiento proporcional**



Fuente: Fisher. (2018). *Guía de selección de válvulas deslizantes Fisher*.

1.1.3. Instrumentación y medición de flujo

Para lograr que un sistema de control con lazo cerrado opere adecuadamente hay que tomar en cuenta los dispositivos que hacen la operación de sensores y transmiten la medición de la variable en el sistema, se convierte la señal en una forma física a otra. Los transductores se pueden clasificar en analógicos, cuya señal de salida es una función continua de tensión o corriente según la magnitud de la variable tomada; en cuanto a los transductores digitales son cuya señal se encuentra en forma de pulso o codificada de carácter binario. (Daneri, 2008).

La medición de caudal de un fluido se puede hacer con varios instrumentos y como lo describe Ordóñez y Trejos (2007) deben tenerse en cuenta los siguientes factores como mínimo para escoger el dispositivo: Rango de medición, exactitud requerida, tipo de fluido entre otros. El autor también describe que en cuanto a los principios básicos que se pueden encontrar se pueden clasificar en:

- Medidores de cabeza variable: como los de tubo Venturi, donde se origina una pérdida de presión cuando pasa por una reducción y relacionarlo con el caudal instantáneo; Placa orificio, al reducir la presión de un fluido que pasa a través de una garganta; tobera de flujo.
- Medidores de área variable: están el rotámetro, donde la altura que alcance un flotador dependerá del flujo que pase por el conducto; fluxómetro de turbina, un rotor excita una bobina magnética y la velocidad del rotor es directamente proporcional al flujo; magnéticos, basado en la ley de Faraday cuando en un conducto un flujo provoca un campo electromagnético que se traduce en caudal; ultrasónicos, contruidos con sondas emisoras y receptoras que envían ondas de ultrasonido y el tiempo

que conlleva en recibirse la onda es lo que traduce en velocidad de fluido dentro de un circuito, se convierte la velocidad en un caudal.

De manera que se ha visto que es necesario conocer el principio de medición de un instrumento y cómo enviará la señal de salida a un controlador para poder ver la fiabilidad del instrumento y saber que se actuará como es requerido.

1.1.3.1. Supervisión y control

La supervisión y control como lo explica Entrena (2015) se logra a través de software adecuado y lo logra en tiempo real. Gracias a un SCADA se puede obtener visualización en pantalla ya sea en sitio o en un computador en sala de control, desde un interfaz diseñado para un sistema se puede ejecutar mandos de regulación según sea requerido o se puede parametrizar para que cuando la magnitud de una variable llegue a cierto valor se provoquen alarmas de riesgo y redireccione a un operador dónde se encuentra el peligro.

Al llegar a este punto se ha de tener mucha perspicacia para que el programador que desarrolle la interfaz lo haga de forma intuitiva y comprensible para que se pueda operar cómodamente.

1.1.3.2. Recolección de datos

Luego que se ha diseñado la interfaz de operación, algunos sistemas de automatización se pueden adaptar para que incorporen o consten de memoria para que se guarde la parametrización, el programa que ejecuta el sistema y una parte de la memoria también se puede designar para que guarde el historial de la medición de variables (Entrena, 2015).

El espacio de memoria que se dedique a guardar el histórico de las variables, esto puede ser útil para trazabilidad y análisis de sensibilidad de la variable al momento que se quiera conocer el proceso en cierto punto pasado o generar reportes de cambios de estado de la variable.

1.2. Proceso de fermentación

McGilvery (1977) en su libro desde aquellos tiempos tenían bien definida la fermentación como el proceso en el cual ciertos microorganismos se comportan como lo hacen los músculos al ganar energía que se convierte en glucosa. Algunos microorganismos lo pueden hacer en carencia de oxígeno porque la naturaleza de ciertas bacterias es de morir al tener contacto con el oxígeno. Existen otros tipos de organismos conocidos como anaerobios facultativos que provocan fermentación en ausencia del oxígeno.

Kunze (2006) explica que la fermentación es esa etapa necesaria para transformar el Mosto en cerveza. Es el mosto el que lleva azúcares que se fermentan con la colaboración de levadura, se obtiene dióxido de carbono y etanol. En esta etapa hay procesos de transformación que contribuyen a obtención de aromas, olores y sabores requeridos, dichas transformaciones se logran con el metabolismo de la levadura. De manera que la fermentación es el proceso de obtener alcohol a través del ciclo de vida de la levadura.

La fermentación es un proceso de conversión químico en el que los azúcares generan el alcohol en una bebida, es un proceso natural y controlable en el cual los encargados de dicho proceso tienen la posibilidad de ajustar parámetros y obtener resultados a gusto propio. Por lo cual las posibilidades en sabores y resultados finales son amplias, pero requiere de alto control en el proceso.

1.2.1. Fermentación de cerveza

En fermentación de cerveza, los pasos más importantes son los de transformaciones. En la transformación según Kunze (2006) lo más importante es la fermentación de los azúcares provenientes del mosto, para que se conviertan en etanol y dióxido de carbono en colaboración con la levadura. Las etapas dentro de la fermentación se dividen en: fermentación y maduración, ocurren procesos clave de un paso al otro y están estrechamente relacionados.

En la fermentación de cerveza la levadura juega un papel fundamental, pues las células de levadura están en el medio para obtención de energía, ganar nutrientes y crear nueva materia celular para su reproducción. En cuanto a ingenieros que están a cargo del proceso, lo que les interesa del ciclo metabólico de la levadura es el alcohol y CO₂ para que se produzca la bebida embriagante para posteriores procesos (Kunze, 2006).

Como se ha visto en el proceso de fermentación hay dos etapas importantes, fermentación y posteriormente maduración. Pero la calidad de la cerveza se encuentra en el ciclo metabólico de las células de levadura y como con los azúcares del mosto que obtienen energía y generan alcoholes útiles para el proceso. La temperatura también juega un papel importante, pues es a ciertas temperaturas en las que las células de levadura toman energía, los procesos se dividen por la fermentación a temperatura alta o a baja.

1.2.1.1. Fermentación a alta temperatura

Kunze (2006) describe a este proceso como la fermentación que ocurre cuando en todo el proceso de fermentación ocurre en temperaturas normalmente arriba de los 12-16 °C. en estos procesos las levaduras desarrollan mayores

cantidades de productos de fermentación, principales alcoholes, los tanques son normalmente bajos pero anchos y con suficiente espacio para rebalses dado que las levaduras tienen más actividad en la creación de alcoholes. Dentro de las cervezas que se consiguen con esta fermentación se encuentran:

- Cervezas de trigo o de tipo Hefeweizen
- Cervezas tipo Berliner Weiße
- Cervezas tipo Alt (Altbier)
- Cervezas tipo Kösch
- Cervezas tipo Ale
- Cervezas tipo Stout
- Cervezas tipo Porter
- Cervezas tipo Belga.

1.2.1.2. Fermentación a baja temperatura

Kunze (2006) explica que la fermentación a baja temperatura fue desarrollada, entre otras invenciones, con la evolución de sistemas de refrigeración, la operación se da cuando toda la etapa de fermentación se da por debajo de los 16 °C. aunque la levadura presentó inconvenientes en sus inicios, se desarrolló bastante este método dado a que se obtuvo líquidos más cristalinos y sumamente agradables al paladar y una mejora en la digestión. Entre las cervezas a baja temperatura se encuentran:

- Cervezas tipo Pilsener
- Cervezas tipo Lager
- Cervezas tipo Export
- Cervezas negras
- Cervezas de festividades

- Cervezas tipo Märzen
- Cervezas tipo Bock
- Cervezas tipo Doppelbock
- Cervezas sin alcohol
- Cervezas dietéticas
- Cervezas ligeras (Light)
- Bebidas de malta.

1.2.2. Aireación en mosto

La aireación de mosto es una etapa interesante, pues al airear se encuentra en transferencia de oxígeno, pero es también conocida la frase que una cerveza oxidada es una cerveza arruinada. El proceso de aireación según Kunze (2006) es inyectar aire al mosto previo a pasar a tanques de fermentación y proveer oxígeno a las células de levadura para que lo consuman en un breve periodo de tiempo de unas dos a cuatro horas. Con lo explicado anteriormente se entiende que esta dosificación de oxígeno no será perjudicial ni para el mosto ni para la cerveza final.

1.2.2.1. Parámetros en aireación de mosto

Ya que se ha descrito qué es airear el mosto, ahora Kunze (2006) describe cómo debe ser el método: filtrar y esterilizar el aire a inyectar, pulverizarlo para una distribución fina a través del caudal de mosto en una cámara de intercambio. Para lograr una buena transferencia de oxígeno unos 8 o 9 gramos por cada litro, y esto se logra al dosificar aproximadamente 3 Litros de aire por cada 100 litros. El oxígeno se disuelve a una tasa de 47.4 mL por cada kilogramo de agua a 1 bar de presión a cero grados centígrados, mientras que lo hace a una tasa de 30

a 20 grados centígrados, por lo que la temperatura también juega un rol importante.

Como bien es sabido alrededor del 21 % de oxígeno se encuentra en el aire, por lo que, la inyección de aire debe ser eficiente y mejor si se tienen un caudal por arriba de los parámetros mencionados para garantizar una buena transferencia de oxígeno al mosto. Otro punto será el ingenio de la cámara de intercambio para asegurar la atomización del aire y cumplir con la transferencia de oxígeno requerida.

1.2.3. Propagación de levadura

La propagación de levadura es un proceso cuando se proporciona oxígeno a la levadura, ganando con esto elementos para generación celular, debe ser en el tiempo más corto posible y en condiciones estériles, lo que quiere decir con aire filtrado. De tal cuenta, las células de levadura llegan a un ciclo de metabolismo adecuado, traduciéndose en un proceso de fermentación y una cerveza rica en propiedades y calidad alta (Kunze, 2006).

La tabla IV describe la diferencia entre la propagación de levadura en el laboratorio y la de planta, la diferencia consiste en que la de laboratorio es el paso que desencadena o estimula la actividad de una colonia de células de levadura, en un medio en el que se sienten cómodas como lo es mosto. Cuando se tiene una colonia estable en un matraz es llevada a tanques de propagación industriales en los que con adición de mosto y con control de aire la colonia crece de manera exponencial y apta para iniciar las etapas de fermentación y maduración. Es importante observar que tanto en laboratorio como en planta se tiene presencia de aire, lo cual realza la importancia del control de esta variable.

Tabla V. **Tipos de propagación**

Tipo de propagación	Descripción
En laboratorio	Consiste en aislar células robustas del cultivo puro para que sean propagadas, se ejecuta con 5 mL de mosto que contiene una colonia de levadura, al trasladarlo a un depósito diez veces mayor llamado matraz, se introduce aire para estimular a las células de levadura bajo condiciones sumamente estériles.
En planta	Ocurre cuando el cultivo del laboratorio se lleva a los depósitos abiertos de la planta, en esta etapa existe el crecimiento exponencial de la colonia de levadura. En cada mL de mosto deberá haber entre 100 a 140 millones de células de levadura. En esta etapa deberá haber suministro de aire controlado puesto que deben tener oxígeno para iniciar el metabolismo, pero el azúcar del mosto inhibe la respiración de la levadura iniciando el proceso de fermentación.

Fuente: Kunze (2006). *Tecnología para cerveceros y malteros*.

1.2.3.1. Parámetros en aireación de levadura

Kunze (2006) ha listado los pasos en los que se debe tener sumo cuidado en aireación de levadura, con el objetivo de obtener un cultivo sano para una posterior fermentación adecuada, entre estos menciona:

- Dosificación de aire controlado para que tenga oxígeno, pero no demasiado pues el azúcar en el medio inhibe a la vez esta acción.
- Distribución uniforme del aire a inyectar sobre el medio.
- Condiciones estériles de operación para evitar contaminación.

- Propagar a temperatura entre 20-25 °C. posteriormente llevarla a temperatura de operación de fermentación (más bajas).

1.2.3.2. Cosecha de levadura y aireación

Pero ¿Qué pasa con la levadura que ha sido usada en fermentación luego que madure la cerveza? Como explica Kunze (2006) de los tanques fermentadores la levadura se debe precipitar al final del proceso y ser extraída, esto se le conoce como cosecha. Al tener la levadura cosechada en tanques diseñados para almacenamiento temporal de la levadura se debe tener a la levadura activa para ser usada en otro proceso de fermentación lo antes posible. Para estimular la levadura debe ser aireada con un parámetro bajo y estable para que las células de levadura puedan respirar.

La definición anterior deja expuesto nuevamente un proceso de inyección de aire, el cual debe ser estable, controlado minuciosamente para que el proceso delicado de las colonias de levadura se logre sin complicaciones, es en esta fase donde las células de levadura no fermentan, pero su actividad orgánica debe continuar, por lo que la dosificación de oxígeno les permite respirar y continuar su ciclo de vida.

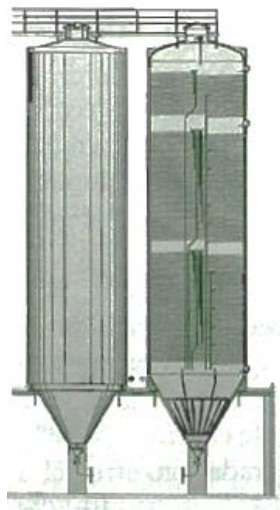
1.2.4. Tanques de fermentación

Los procesos de fermentación, en los que ocurre la transformación de mosto a cerveza verde y luego madura ocurren en tanques diseñados para este fin Kunze (2006) aclara que los diseños que mejor han optimizado este proceso son los tanques cilindro-cónicos, un cilindro cuya parte inferior termina en un cono. La forma cónica es la que mejor ha resuelto el inconveniente de extracción de levadura luego de ser usada y precipitada al final de este depósito. El material

es de acero inoxidable y la rugosidad interna del tanque también es importante y el material debe tener una rugosidad media aritmética menor a $0.8 \mu\text{m}$ de profundidad. Este aspecto se soluciona con pulidos.

La figura 7 muestra el esquema de cómo se aprecian los tanques de fermentación, apreciándose que donde termina la parte cilíndrica es donde están asentados, para lo cual se preparan cimientos circulares para este fin. Normalmente la parte cilíndrica se expone al ambiente y son aislados con su debido sistema de refrigeración, en la parte superior tiene domos para evitar esfuerzos altos y válvulas de alivio de presión y venteo, dado que en la parte superior se elevan los gases de dióxido de carbono generados durante el proceso; la parte cónica, en cambio, se encuentra normalmente dentro de un edificio, puesto que es en esta parte a un nivel inferior donde se da el manejo higiénico del líquido y es donde se encuentran la tubería necesaria para conducir el líquido y la levadura.

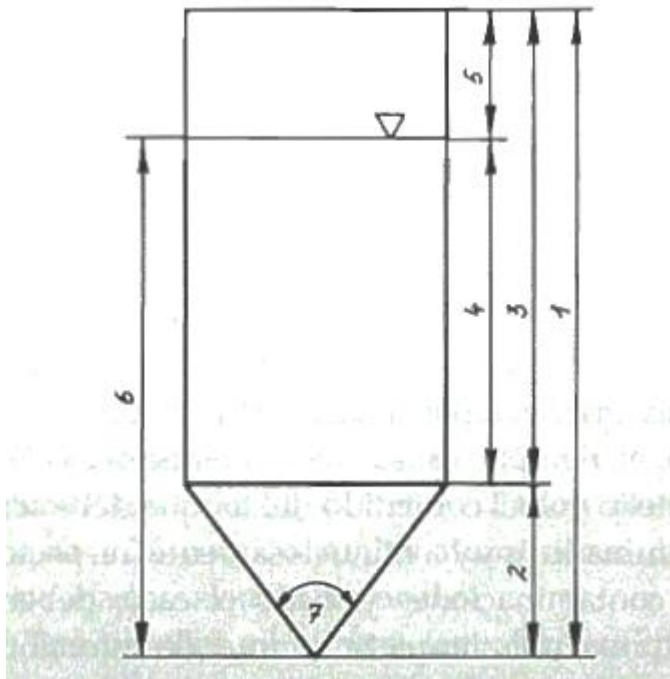
Figura 7. **Tanque cilindrocónico de fermentación**



Fuente: Kunze (2006). *Tecnología para cerveceros y malteros*.

La figura 8 muestra en dos dimensiones la geometría regular de un tanque de fermentación. Explicando ciertas alturas necesarias de entender. Kunze (2006) amplía las numeraciones del gráfico: 1, es la altura total del tanque; 2, es la altura que alcanza el cono; 3, es la altura solo de la parte cilíndrica; 4, es la altura que llega a alcanzar el mosto solo en el cilindro; 5, es la altura que normalmente asciende la espuma con los gases generados de la fermentación; 6, es la altura que alcanza el mosto desde el fondo del cono hasta la parte superior del cilindro; 7, es el ángulo que posee el cono. Una parte importante de analizar y considerar es el espacio que se debe dejar al ocupar un tanque y no rebalsarlo pues el espacio vacío es el que ocupará el gas y espuma resultado de una reacción anaeróbica de la levadura al fermentar.

Figura 8. **Geometría de un tanque**



Fuente: Kunze (2006). *Tecnología para cerveceros y malteros*.

1.2.5. Consecuencias de un débil control en la inyección de aire en fermentación de cerveza

Kunze (2006) afirma que en la aireación de mosto se debe garantizar una adecuada transferencia de oxígeno para que la levadura tenga ese aliciente para estimular la actividad celular. Dado que la ingesta del oxígeno por parte de la levadura se hace en un breve periodo de tiempo si no se garantiza un buen proceso de inyección de aire la levadura no tendrá una reserva de energía, debilitándose y generando gran porción de células muertas inservibles en el proceso.

En cuanto a la aireación y propagación de la levadura si no se le añade oxígeno o no es suficiente, la levadura no genera grasas y ácidos de regeneración celular, la propagación se puede detener abruptamente, se puede prolongar el tiempo de fermentación en los tanques, habrá una curva positiva en muerte celular.

1.3. Mantenimiento predictivo en zonas de aireación

Primeramente, se definirá el mantenimiento predictivo. El mantenimiento predictivo tal y como lo define Romeo (2018) realiza tareas de observación y funcionamiento de la maquinaria que es mantenida. Por lo tanto, el mantenedor debe ejecutar tareas de monitoreo de la condición o valor de variables para poder detectar cuando los valores superan umbrales o límites superiores o inferiores previamente fijados por los administradores del mantenimiento. Una de las técnicas por excelencia conocida es la medición de vibraciones en equipos.

El punto central de este tipo de mantenimiento es el monitoreo y alimentación de una base de datos para generar la estadística adecuada e ir

creando proyecciones del estado o sanidad de un equipo para determinar cuándo un equipo de mantenedores debe intervenir adecuadamente en un equipo.

Mobley (2002) explica que para el diseño de un programa de mantenimiento predictivo siempre debe estar basado en los pilares de basado en condición y basado en tareas basadas en tiempo. Los planes de mantenimiento predictivo deben contener los siguientes lineamientos para ser exitosos:

- Datos de falla: tener una base útil de las fallas ocurridas en determinados tiempos contribuye a prevenir recurrencia de las fallas, las bases de datos deben poder identificar y clasificar el problema, la causa raíz y la acción correctiva tomada para solucionar una avería. Si es posible el sistema debe ser tan robusto para poder identificar la relación entre la causa de la avería con el fallo mismo.
- Mejoramiento en la confiabilidad del equipo: este apartado busca que el rendimiento del equipo sea óptimo. Un principio que busca es la eliminación de fallas puesto que el tiempo en que el equipo está disponible para la actividad es lo que cuenta. Por lo que las gestiones de mantenimiento deben invertir más recursos en identificar las averías y evitarlas que usar tiempo en reparaciones en tiempos muertos de producción.
- Mejoramiento de procesos: las organizaciones deben entender en qué etapa se encuentran e identificar hacia dónde se quiere llegar en un determinado tiempo. Para esto se deben trazar objetivos realizables, medibles, entendibles, retadores, y alcanzables.

- Fallas que pueden ser prevenidas: este apartado se basa en los modos de falla, los efectos y el análisis de criticidad que describen las averías que pueden ser prevenidas o evitadas. Será necesario hacer análisis entre frecuencia de fallas, ocurrencia o probabilidad de suceso, la causa y la consecuencia si la avería ocurre.
- Mantenimiento orientado en prevención de averías: en esta etapa lo que se busca es evitar caer en fallas, se ha visto que una gran mayoría de fallas suceden por suciedad o falta de lubricación (inclusive lubricación inadecuada). Por lo que se pretende involucrar a personal operativo en tareas de mantenimiento para tareas de limpieza y lubricación con la debida capacitación.
- Personal: designar personal a tareas como lubricación dependerá del grado de complejidad de la planta. Por lo que en algunos casos hay que designar a tareas básicas pero importantes a roles que desarrollen tareas específicas como las de lubricadores. Si en una planta productiva un equipo es tan específico para tareas de lubricación, será oportuno evaluar el tener un puesto de trabajo designado y claramente capacitado para el desempeño de las atribuciones asignadas.
- Equipos de servicio: esta sección ayuda a comprender mejor cómo los equipos de trabajo pueden ser más eficientes sabiéndolos gestionar y entregándoles atribuciones específicas, variadas en el tiempo y dinámicos para que los mismos técnicos sean óptimos en sus tareas. Esta modalidad dependerá mucho de la operación de una planta productiva. La dirección es verificar que es lo más sano, conveniente para la operación y eficiente en costos.

1.3.1. Alimentación de histórico de parámetros

García (2011) explica que muchas organizaciones inician a abandonar la idea de mantenimientos sistemáticos por tipos más dinámicos. De manera que él ha fijado objetivos para monitoreo y seguimiento de una variable física, los cuales se listan a continuación:

- Vigilancia: monitorear el estado de una variable, y catalogarla como buena o mala y poder brindar escalas de qué tan buena o mala es la condición.
- Protección: en la medida que sea posible que el sistema genere una alarma para que se detecte cuando una variable llega a valores considerables como peligrosos.
- Diagnóstico de fallos: identificar la causa raíz de lo que está ocasionando una avería que se encuentra en un equipo.
- Pronóstico: trata de proyectar cuánto tiempo más puede estar en estado funcional una máquina y así programar el mantenimiento.

Se ha visto pues que el predictivo busca una forma integral de hacer las cosas, además de ser secuencial. Ir analizando la situación de un equipo y su degradación en el tiempo. Así se efficientiza todo el proceso con el uso correcto del recurso monetario.

1.3.2. Justificación del costo de implementación

El mantenimiento predictivo como filosofía de trabajo es por muchos temida en el sentido del costo que involucra. Dado que el monitoreo de condición

implica que se realicen ensayos de carácter no invasivos o no destructivos, los cuales deben ser aplicados, según necesidad, tendencia y criterio del encargado de mantenimiento, recurrentemente con el fin de determinar el grado de salud de los equipos.

Mobley (2002) aporta tres razones de peso para la justificación del costo de la implementación de mantenimiento predictivo: pobre calidad en producto terminado, cuando no se conoce la condición de elementos rodantes de un equipo las perturbaciones pueden trasladarse hacia el producto final incrementando reclamos y pérdida de calidad; Incremento del costo de combustibles y energía, ejemplificando este apartado se puede apreciar con fugas de vapor o de aire comprimido, los cuales elevan mucho los consumos de bunker o energía eléctrica, los cuales se pueden reducir con inspecciones periódicas y el equipo adecuado; costo de la actual estrategia de mantenimiento, las estrategias de mantenimiento preventivo y correctivo tienen carencias en atribuir correctamente los costos según el estado de un equipo, en cambio el predictivo es más eficiente al imputar costos a razones específicas, como el grado de desgaste de un equipo o el combustible que consume para llevar a cabo una operación.

Por lo tanto, cuando se decida la implementación de una estrategia de mantenimiento predictivo el mantenedor deberá ser audaz en respaldar muchas decisiones con herramientas financieras para demostrar el porqué de una inversión en servicios de aplicaciones de ensayos o equipos para realizarlos, dado que el costo de adquisición de estos seguramente será fuerte y altamente cuestionable por las altas direcciones a las cuales hay que tratar de presionar a que validan el funcionamiento de estas filosofías.

1.3.3. Parámetros de proceso en válvulas de control

Así como todos los equipos las válvulas de control presentan causas específicas como modo de fallo. Mobley (2002) explica que sea la válvula que sea, los problemas propios de estos dispositivos son las fugas por inconvenientes en sello, velocidad de respuesta o una avería en todo sentido. Pero cuando se tiene una válvula de control hay que direccionar la atención al actuador, pues, aunque parezcan problemas por presión o caudal del flujo puede que el inconveniente provenga del actuador. Por lo que una alternativa a que el equipo esté bien redireccionado es crear un cuadro de modo de falla de estos equipos que mapee los posibles fallos y las causas de las averías, así brindará a los mantenedores un sistema de verificación y descarte de problemas.

Basados en el cuadro de modo de fallas de Kobbey, la tabla V muestra las columnas y filas que puede tener una matriz de modo de fallas, para la clasificación y operativización de las clases de averías con su posible raíz.

Tabla VI. **Matriz de modo de fallas**

Possible problema	Raíz del problema		
	Falla en sello	Diafragmas rotos	Falla en actuador
Fugas	x		
No hay paso de fluido		x	x
Actuador no puedo operar		x	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

1.3.4. Análisis de fallas

El análisis de fallas o averías trata de identificar lo que ocasiona un problema y el grado de severidad, es por eso por lo que se recurre a técnicas avanzadas para diagnóstico. Mobley (2002) indica que también se identifica el número de síntomas que se presentan en un equipo y no necesariamente la raíz del fallo. Además, el análisis del modo de fallo está basado en asumir que ciertos fallos son comunes y específicos a máquinas.

Los análisis para ejecutar deberán ser específicos para la aplicación que se tiene y en muchas ocasiones se pueden usar más de una técnica, al hacer dichas técnicas complementarias las unas a las otras. Como ejemplo de una técnica que se puede aplicar a válvulas de control de flujo puede ser el ultrasonido. Específicamente el ultrasonido aéreo y estructural, el aéreo se puede usar para diagnóstico de sellos en juntas, sellado de diafragmas neumáticos, racores neumáticos en alimentación de diafragmas. El estructural puede usarse para analizar el comportamiento de émbolos o mecanismos internos de una válvula. El estudio y revisión del comportamiento y los resultados obtenidos para identificar la forma en que un mantenedor hará su trabajo es lo que se conoce como análisis de fallas y ayuda a preservar la vida de un equipo y trabajar de forma óptima.

1.3.5. Intervención de mantenimiento

El análisis de fallas o averías trata de identificar lo que ocasiona un problema y el grado de severidad, es por eso por lo que se recurre a técnicas avanzadas para diagnóstico. Mobley (2002) indica que también se identifica el número de síntomas que se presentan en un equipo y no necesariamente la raíz

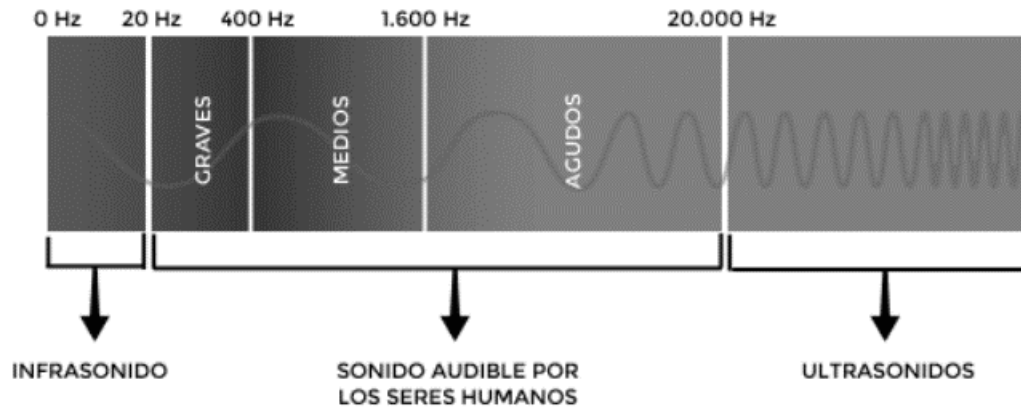
del fallo. Además, el análisis del modo de fallo está basado en asumir que ciertos fallos son comunes y específicos a máquinas.

De nueva cuenta los autores manifiestan que, la intervención de los mantenedores debe ser programada pero analítica, por eso el mantenimiento predictivo se basa en uso de herramientas y técnicas de alto costo que en el tiempo resulta ser más eficiente por un mejor uso de los recursos.

1.3.6. Inspección de fugas por ultrasonido acústico

Por definición y tal como lo comenta del Valle (2019) en su blog de programación de Arduino, informa que ultrasonido se considera para todo aquel que supera los 20,000 Hz tal y como se aprecia en la figura 9. Los sensores usados para la detección de fugas en procesos industriales normalmente se sitúan por encima de los 20,000 Hz. Y en cuanto a análisis por ultrasonido como lo define Amaya (2022) es una estrategia predictiva no destructiva en la cual su función es la inspección de componentes, en esta técnica se analizan los patrones donde se propagan señales de onda sonora de ultrasonido. Esta técnica es útil cuando las ondas sonoras de alta frecuencia se van detectando por el sensor del equipo que se esté usando, los componentes en buen estado emitirán un sonido bajo y en una instalación con fuga los sonidos perturbarán el sensor, dentro de las fugas que puede detectar esta técnica se encuentran las de aire.

Figura 9. **Espectro de audio**



Fuente: Valle (2019). *Sensor ultrasonidos Arduino para medir distancias*.

La ventaja de esta técnica es que al estar en medio de una zona en la cual el ruido es hecho por varias máquinas los sensores de los equipos de ultrasonido pueden detectar turbulencias de alta frecuencia que se produce cuando hay una fuga de un gas. Un fluido que se está fugando por un orificio, brida o ranura genera la alta turbulencia en un medio y aun teniendo un medio con gran cantidad de sonido por maquinaria en funcionamiento, esta fuga es perceptible e identificable por su naturaleza en medio de todo el sistema. Esta técnica ayudará a la alimentación de datos del mantenimiento basado en condición de una instalación.

1.4. **Marco contextual de la Industria cervecera en Guatemala**

En América Latina es iniciada formalmente en el siglo XIX, con la influencia de los españoles y portugueses. Los extranjeros que llegaban a las colonias iberoamericanas eran los que introducían estas costumbres y sus métodos para la creación de sus brebajes. Las bebidas que fueron tomando popularidad fueron la cerveza y el ron. En cuanto a la forma de producirlo eran los provenientes de

España o Portugal los que generaban las condiciones para la producción al no haber empresarios que se dedicaran a giros de negocio como estos (Reyna y Krammer, 2018).

1.4.1. Inicios de la industria en Guatemala

En Guatemala como lo explica Reyna y Krammer (2018) inicia en 1886 cuando los hermanos Mariano y Rafael Castillo Córdova crean una empresa que con el paso de los años es una de las principales del país. La cerveza de la empresa de los hermanos tuvo fuerte aceptación y es así como deciden importar maquinaria y materia prima desde Alemania para conseguir la mejor calidad posible.

El sector de bebidas en Guatemala se remonta a siglos pasados e inició a constituirse como industria fabril dentro del país a finales del siglo XIX, con la edificación de Cervecería Centro Americana y la creación de la fábrica de bebidas La Mariposa. Por aquel entonces eran procesos artesanales y las empresas que iniciaban a introducir bebidas refrescantes dentro de su catálogo de productos tenían influencia por empresas o inversionistas extranjeros, así como adquisición de franquicias (Comisión para el Esclarecimiento Histórico, 1999).

Jiménez (2019), en su reporte a la revista Forbes comenta que la empresa más grande de producción de cerveza en Guatemala en sus inicios se solía ver carretones y equipo rudimentario para trasegar cargamento de producto, a través de los años han adoptado las tecnologías de vanguardia para obtener calidad alta en sus procesos.

Es importante reconocer lo mucho que ha crecido y evolucionado la industria cervecera en el país. Pasando por procesos artesanales y poca

aceptación por el mercado, a ser una industria robusta adaptando muchas nuevas tecnologías.

1.4.2. Evolución de la industria cervecera en Guatemala

Adentrándose la segunda mitad del siglo XX en Guatemala se fue desarrollando tanto la industria fabril de bebidas carbonatadas como el mercado consumidor de estas. Es en este periodo también en el que se constituye formalmente la cámara de la industria de Guatemala y como comenta el portal web de esta institución.

En el informe de económico y comercial elaborado por la oficina Económica y Comercial de España en Guatemala (2020), para el primer trimestre del año 2020 el gasto de una casa promedio en Guatemala el consumo de alimentos es el primer rubro de gasto ocupando un 30.47 %; el consumo de bebidas no alcohólicas ocupa el octavo lugar con un peso del 3.03 %; en cuanto a bebidas alcohólicas el peso porcentual es de 1.2 % ocupando el décimo sexto lugar.

Tabla VII. Gastos promedio de hogar en Guatemala 2020

Gasto	%
Consumo de alimentos	30.47
Pago de alquiler	10.94
Servicios telefónicos	8.81
Servicio de comidas en restaurantes	6.9
Consumo de prendas de vestir	5.23
Transporte	4.61
Bienes y servicios conservación ordinaria del hogar	3.52

Continuación tabla VII.

Consumo de bebidas no alcohólicas	3.03
Bebidas alcohólicas	1.2
Calzado	1.68
Electricidad, gas y otros combustibles	2.63
Muebles y accesorios, alfombras y otros materiales para pisos	1.12
Productos, artefactos y equipo médicos	1.47
Servicios para pacientes externos	1.52
Servicios de hospital	1.54
Adquisición de vehículos	2.03
Servicios de recreación y culturales	1.09
Periódicos, libros y papeles y útiles de oficina	1.02
Cuidado personal	2.2

Fuente: Oficina Económica y Comercial de España en Guatemala. (2020). *Informe económico y comercial*.

La tabla VI muestra varios gastos en los que incurren las familias guatemaltecas. Esta información es valiosa analizarla puesto que una familia promedio por cada Q. 100.00 que recibe gasta Q. 1.20 en bebidas alcohólicas. Aunque el número no parezca tan importante al verlo reflejado con los Q. 1.47 que gastan en artefactos médicos, Q. 2.20 en cuidado o los Q. 1.09 que gasta en recreaciones varias o en temas culturales como lectura que se gastan Q. 1.02.

Esto indica la importancia que tiene en el gasto promedio de una familia el consumo de bebidas alcohólicas, específicamente cerveza, y como ha pasado de ser un producto destinado a embriagar, a ser un producto aceptado familiar y comercialmente ha adoptado una postura de producto *premium* y de maridaje con comidas selectas. A esto también se debe agregar que la aceptación ha sido por el conocimiento que el boom tecnológico ha tenido en el último siglo.

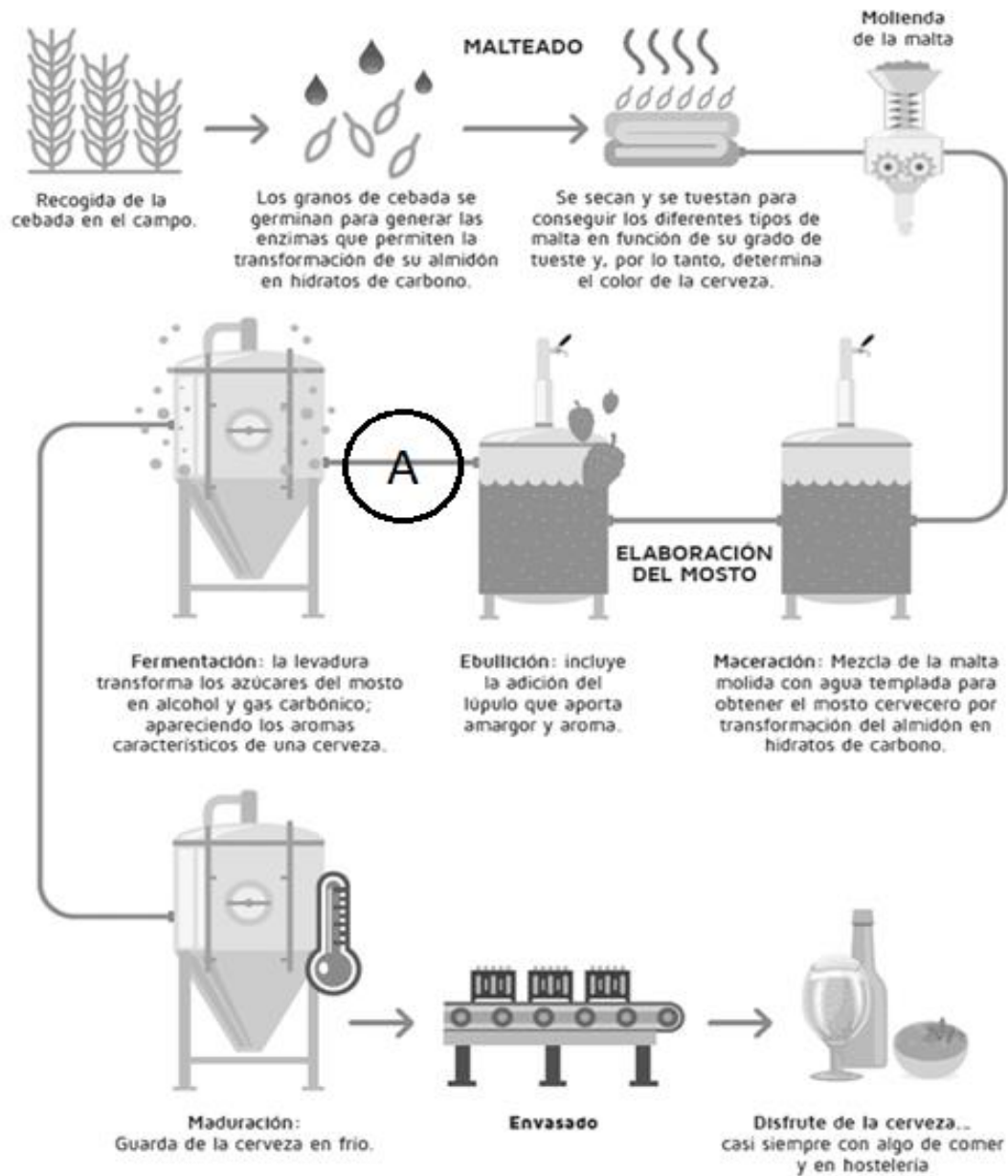
2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Previo a iniciar con la presentación de resultados obtenidos tras la inspección y reconocimiento de campo, se procederá a situar el proceso en el cual se llevó a cabo la ejecución de la investigación.

El proceso de elaboración de cerveza es complejo porque en él intervienen procesos de maquinado, procesos químicos y físicos que van transformando la materia prima en cada etapa para ir obteniendo un líquido cada vez más prolijo e inocuo; a medida que se avanza en el proceso se va teniendo monitoreo y control de la calidad del proceso y dependiendo de la etapa del flujo de este, se van tomando medidas para conocer el avance logrado con el cual se va liberando y progresando para que la bebida cumpla con los requisitos requeridos para distribución y consumo.

En el proceso se pueden encontrar los siguientes: molienda de cereales, maceración la cual se logra adicionando agua y temperatura, cocción de cereales los cuales al adicionarle lúpulo se obtiene un líquido al cual se le denomina mosto. El mosto pasa a una etapa de fermentación y maduración en cuya etapa al adicionar levadura y está al hacer su proceso metabólico logran generar alcohol y CO₂ el cual se extrae y al tener esta bebida ya se tiene la denominada cerveza, posteriormente para tener una cerveza más pulcra se puede o centrifugar o filtrar para que se tenga una cerveza más clarificada. Por último, se procede con la etapa de envasado para que se pueda distribuir al cliente. Cada una de estas etapas tiene gran importancia que se controle puesto que desviaciones pequeñas en cada uno de los procesos puede significar en pérdida de lotes de varios litros de cerveza, lo que se traduce en pérdida significativa de dinero.

Figura 10. **Proceso estándar de fabricación de cerveza**



Fuente: Cerveceros de España (2022). *Los países que más cerveza producen en Europa.*

La figura 10 describe claramente por medio de un mapa el proceso de fabricación de cerveza genérico. El alcance de esta investigación se centra en la

etapa A del esquema de la figura en mención, posterior al traslado de mosto desde la sala de cocción hacia los tanques de fermentación, pero, previo a que inicie la etapa de fermentación. Es en el punto A donde se adiciona levadura al mosto cuya función es que los azúcares que lleva el mosto sea el alimento para la levadura, en ese proceso metabólico la levadura produce alcohol en los grados requeridos para cerveza, se produce también gas carbónico el cual se extrae del proceso y según la complejidad de la industria puede ser recuperado para otros procesos paralelos.

Es de tal manera que se comprende el importante papel que juega la levadura en la fermentación de cerveza, este recurso se mantiene la mayoría del tiempo en esta etapa en que se logra la obtención de alcohol, aromas y sabores de una cerveza. No obstante, la levadura tiene etapas marcadas en las cuales debe ser estimulada con aire para que el oxígeno que se tiene en el medio sea el inicio de la actividad aeróbica y metabólica, esta transferencia se logra en etapas de cultivo de células, en el medio de mosto para que en él pueda encontrar suficiente oxígeno y en almacenamiento.

Así como es necesario que la levadura inicie su actividad molecular por medio de estímulos es requerido que la dosificación de aire sea estable y precisa, puesto que poco o mucho aire generan resultados indeseados los cuales repercuten igualmente en muerte de células de levadura: poco aire no logra estimular adecuadamente la colonia de células de levadura; mucho aire genera un medio turbulento tensiona la colonia de levadura al grado de no generar los estímulos deseados para que se inicie la actividad de metabolismo deseada.

2.1. Visita de reconocimiento

En noviembre del año 2021 se realizó la inspección inicial y exploratoria de los puntos en los que se hace aireación para la correcta activación aeróbica de levadura. En esta visita se pudo conocer los dispositivos que controlan la dosificación de aire, así como la instrumentación necesaria para la lectura de presión, caudal de aire, temperatura de operación y oxigenación donde corresponde.

Figura 11. **Instalación control inyección de aire a proceso**

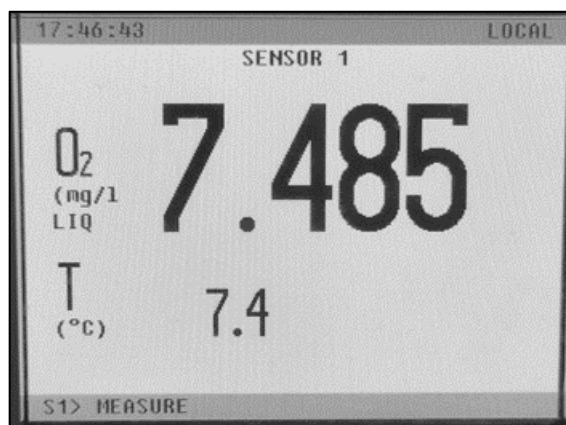


Fuente: [Fotografía de Miguel Colindres]. (Guatemala, Guatemala. 2021). Colección particular.
Guatemala.

En la visita, además de la propia instalación, se pudo determinar la forma en que se operan los equipos y las medidas de control que se tienen para operar obtener un proceso estable. La figura 11 muestra cómo la instalación hace la dosificación de aire para la posterior inyección del fluido en mosto. Al iniciar a la

derecha de la imagen se logra observar un manómetro el cual registra la presión de ingreso de aire, posteriormente un flujómetro que detecta el caudal que se tiene en la línea, luego se tiene un filtro de aire el cual ayuda a tener un fluido estéril, por último, se puede ver una válvula de aguja cuya función es la de regular el flujo de aire en la inyección posterior.

Figura 12. **Pantalla de medición características de inyección de aire**



Fuente: [Fotografía de Miguel Colindres]. (Guatemala, Guatemala. 2021). Colección particular.
Guatemala.

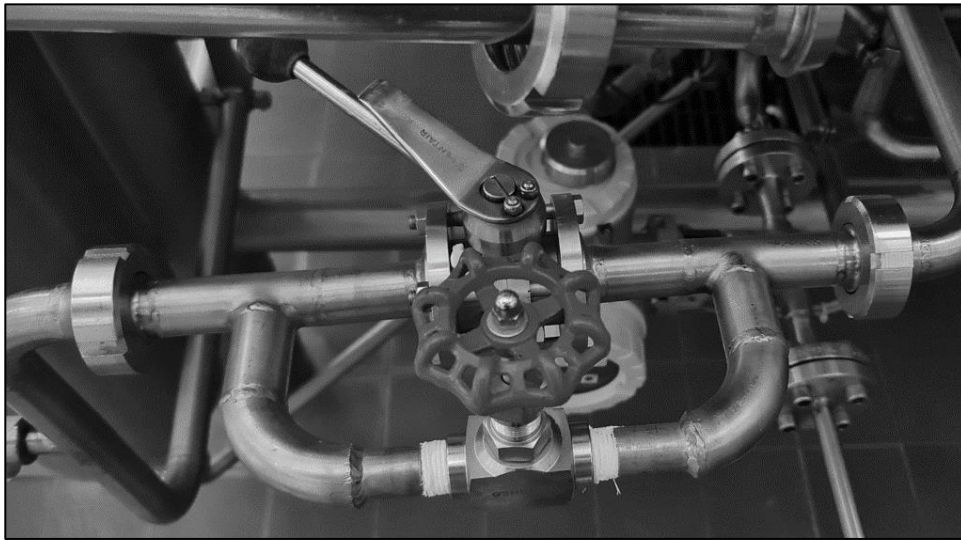
La figura 12 muestra otras dos variables que se controlan, desde un medidor montado en un panel situado cercano a la instalación de control de aire; las variables son oxígeno presente en mosto y la temperatura de este proceso. Al igual que la presión y el caudal de aire, estas dos variables también se monitorean constantemente.

De las cuatro variables explicadas anteriormente, es la de caudal de aire la única que el operador manipula por medio de la válvula de aguja, esta válvula tiene como objeto un ajuste fino al paso de aire. Sin embargo, es un proceso que no deja registro ni es auto regulable y queda el inconveniente que se debe tener

una alta supervisión por parte del operador del área para que no se pierda el ajuste en el flujo de aire el cual es clave para lograr la presencia de oxígeno necesaria en el proceso.

En cuanto a los procesos paralelos de levadura como lo son el de propagación y almacenaje se tiene también una regulación con válvula de aguja similar al de aireación y el resto de los equipos en similares condiciones, pero con una configuración en la instalación diferente por el diseño del equipo.

Figura 13. **Control de aire en propagación de levadura**

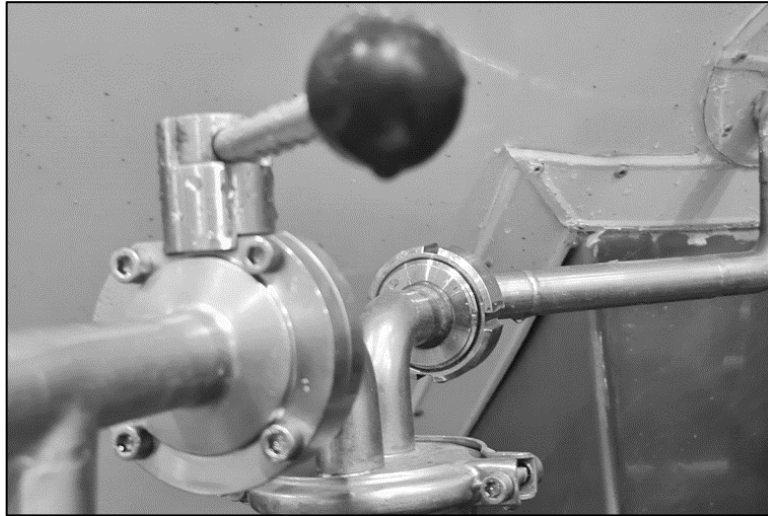


Fuente: [Fotografía de Miguel Colindres]. (Guatemala, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

La figura 13 muestra cómo en propagación se aprecia nuevamente la válvula de aguja que ya es usada en la primera instalación explicada, en propagación se repiten los mismos elementos: manómetro inicial que mide la presión de aire en el sistema, filtros que esterilizan el aire, la regulación de flujo por medio de la válvula de aguja, posteriormente el flujómetro y por último se

inyecta el aire. En un panel cercano al tanque de propagación se registra la temperatura y se lleva el control de oxígeno transmitido al fluido.

Figura 14. **Control de inyección de aire en levadura**



Fuente: [Fotografía de Miguel Colindres]. (Guatemala, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

La figura 14 muestra como en los tanques de levadura se tiene una válvula de paleta, la cual el operador controla para regular el flujo de aire, esta instalación es similar a las dos anteriores: un manómetro que registra la presión del sistema, filtros que esterilizan el aire, la válvula de paleta que restringe o apertura el paso de aire, y posterior a la válvula de paleta se tiene el flujómetro, el cual es crucial para conocer el caudal de aire que representa la variable más importante en este proceso, luego del medidor de flujo el aire se inyecta al tanque de almacenaje de levadura, paralelamente un panel ubicado a la par del tanque de levadura registra valores de temperatura y transferencia de oxígeno al fluido que se encuentra en almacenaje y agitación, la cual es la forma correcta de mantener viva la levadura en condiciones sanas.

2.2. Parámetros y límites de las variables de operación

En una segunda visita hecha en diciembre del año 2021 se volvió a ir a las áreas para un doble reconocimiento de equipos. Además, se obtuvo, en colaboración con los ingenieros encargados de producción, que los valores estándar para mantener una operación estable son los listados a continuación:

Para iniciar el proceso aeróbico de la levadura es necesario que los valores de aireación sean los siguientes:

- Presión de aire: 5 bares
- Caudal de aire: 8.3 a 8.8 m³/h
- A una temperatura por debajo de 16 °C
- Oxígeno disuelto por entre 18.5 a 20.5 mg/l

Para el almacenaje de levadura es necesario que los parámetros de aireación, recordar que la levadura no se puede dejar de oxigenar porque entraría en una fase de decadencia, sean los siguientes:

- Presión de aire: 5 bares
- Caudal de aire: 120 m³/h. mínimo
- A una temperatura por debajo de 2 a 4 °C

Para el proceso de propagación, también es necesario que se respeten los siguientes parámetros en la aireación, es en este proceso que inicia el crecimiento exponencial de la colonia de células de levadura:

- Presión de aire: 5 bares
- Caudal de aire: 1.20 m³/h. lo más cercano posible a este valor

- A una temperatura entre 13.5 a 14.5 °C

2.3. Recopilación de la información

En julio del 2022 se inició con el levantado de datos de los parámetros en proceso, cabe mencionar que se contó con datos que se obtuvieron de la memoria que deja el servidor de parámetros de caudal de flujo. Otro paquete de datos se tomó aleatoriamente entre los meses de julio, agosto e inicios de septiembre.

La tabla VIII muestra diez de las cincuenta y ocho, las primeras cinco y las últimas cinco de toda la secuencia; la tabla total se encuentra en el apéndice 2 en la cual se muestra el detalle de todas las tomas y de algunos puntos de referencia que se tienen. La tabla VII indica el flujo de aire en metros cúbicos por hora, a la presión indicada en bares y la temperatura del proceso en grados centígrados, con estos parámetros se obtiene el valor de oxígeno disuelto en mosto en mg/l, este último valor lo da un sensor en línea especializado para determinar este valor. La última fila de esta tabla indica la media de cada uno de los valores.

El flujo de aire en este proceso es clave porque indica indirectamente el nivel de transferencia de oxígeno al proceso, la temperatura también lo es porque indica el inicio del proceso de fermentación y la presión también es importante para asegurar un correcto flujo de aire en esta etapa.

Tabla VIII. **Datos de aireación de mosto**

No.	Flujo de aire (m ³ /h)	Presión de aire (bar)	Oxígeno disuelto (mg/l)	Temperatura (°C)
1	7,321	4,800	19,000	8,900
2	7,412	4,900	19,100	8,900
3	7,92	5,000	19,200	11,100
4	7,508	4,800	18,400	8,700
5	7,596	4,900	19,200	8,700
56	7,312	5,000	18,900	11,100
57	7,789	5,100	19,100	9,200
58	9,110	6,500	20,400	11,900
59	9,130	6,500	20,500	10,400
60	8,100	5,000	19,700	8,700
□	7,935	5,092	19,310	9,850

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La tabla IX muestra las variables recopiladas aleatoriamente en el proceso de aireación de levadura cuando este recurso está en etapa de almacenamiento y espera entrar de nuevo a una maduración nueva. Se muestran diez tomas de veinte y cinco totales, cabe resaltar que son cultivos diferentes dado que, en el tiempo un cultivo de levadura a medida que se va volviendo longevo pierde también características o bondades para el proceso de maduración y fermentación de la cerveza que se encuentra en este proceso.

El proceso de aireación de levadura en almacenamiento es de vital importancia para optimizar cultivos, puesto que cada cultivo tienen un costo alto y la levadura que se extrae de una fermentación es altamente recomendable para uso posterior, es en esta etapa en la que se toma muestra de la calidad y el estado del cultivo de levadura, por medio de análisis en el laboratorio de calidad se analizan la cantidad de células por mililitro y esto da un escenario del estado

general de la colonia de la levadura, todo este proceso de almacenamiento tendrá éxito sólo si y sólo si la aireación del cultivo se da bajo un escenario con variables controladas, de nueva cuenta el flujo de aire es el requerido para mantener sana la colonia del cultivo de levadura y sobre todo conservar una cantidad sana de células por unidad de volumen analizado. Por último, también cabe mencionar que en cada almacenamiento o recirculación es necesario tener una buena aireación para optimizar o prolongar la vida de la levadura en buen estado.

Tabla IX. **Datos de aireación de levadura en almacenaje**

No.	Flujo de aire (m ³ /h)	Presión de aire (bar)	Temperatura (°C)
1	123,145	5,500	4,500
2	122,852	5,400	4,100
3	120,412	5,400	4,300
4	119,515	5,100	3,900
5	124,012	5,500	3,800
21	123,157	5,200	4,000
22	121,158	5,100	3,300
23	123,876	5,000	3,800
24	119,145	5,000	3,800
25	123,764	5,100	3,900
\bar{X}	121,634	5,184	4,008

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La tabla IX también muestra la relación que hay en cuanto al flujo de aire y presión de este flujo, el cual es proporcionalmente directo, si se tiene una pobre presión se tendrá un pobre flujo de aire y la transferencia de oxígeno para tener una colonia de células de levadura sana puede verse fuertemente afectada. La tabla total se encuentra en el apéndice 2. De una similar manera la tabla IX describe la relación directa que se tiene entre la presión de aire y el flujo obtenido

en la línea de alimentación a levadura, por lo cual es importante también controlar la presión de aire, derivado que en esta línea se cuenta con filtros esterilizadores y si estos se obstruyen causará que la presión se eleve, pero el flujo será bajo, si se da este fenómeno se podrá determinar si hay inconveniente de saturación en dichos elementos filtrantes.

Tabla X. **Datos de aireación en propagación de levadura**

No.	Flujo de aire (m ³ /h)	Presión de aire (bar)	Temperatura (°C)
1	1,257	2,100	14,600
2	1,201	2,000	14,500
3	1,180	2,100	14,500
4	1,354	1,900	14,500
5	1,201	2,200	14,300
20	1,313	2,100	14,600
21	1,151	2,100	13,500
22	1,191	2,100	13,500
23	1,211	2,000	13,500
24	1,201	2,100	13,500
\bar{X}	1,313	2,100	13,400

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la tabla X se puede ver una relación similar a la de la tabla IX, pero con datos más bajos puesto que en el proceso de propagación se necesita que la oxigenación sea más baja dado que es en esta etapa que se inicia la actividad celular y alto impacto de oxígeno puede ser perjudicial para la salud de la colonia de células que se pretende reproducir. Cabe mencionar que todo el detalle de la tabla X se encuentra en el apéndice 3.

2.4. Recopilación de datos tras una intervención de una variable

Luego de la toma de datos del proceso de aireación de mosto, en una etapa de trasiego de mosto previo a fermentar se manipuló la válvula de aguja que controla el flujo de inyección de aire, esto con la idea que durante dos procesos diferentes se verificará que no cambiarán los valores de presión y de flujo de aire, así ver también cómo el oxígeno disuelto se comportaba. Los datos se muestran en la tabla XI. La intención con esta prueba fue explorar en ese proceso qué tanta intervención del operador es necesaria para hacer una inyección de aire a mosto estable, tanto en caudal de aire como en transferencia de oxígeno al mosto, cabe destacar que fue necesario que en sitio se estuviesen controlando las carátulas de los instrumentos de medición en todo momento para visualizar que tan necesario era la intervención cada cinco minutos.

Tabla XI. **Datos de aireación de mosto bajo intervención de válvula de aguja para regulación flujo de aire**

No.	Flujo de aire (m ³ /h)	Presión de aire (bar)	Oxígeno disuelto (mg/l)	Temperatura (°C)
1	9,141	6,500	20,300	7,500
2	8,961	5,300	19,900	7,600
3	8,771	5,100	19,500	7,600
4	8,601	5,000	19,300	7,600
5	8,501	5,000	19,300	7,500
6	8,521	5,000	19,400	7,500
7	8,551	5,000	19,200	7,500
8	8,771	5,200	19,400	7,500
9	8,889	5,000	19,600	7,400
10	8,498	5,000	19,200	7,400
11	8,665	5,000	19,300	10,100
12	8,665	5,000	19,300	10,600

Continuación tabla XI.

13	8,889	5,300	19,400	10,600
14	8,512	5,000	19,100	10,600
15	8,612	5,100	19,300	10,600
16	8,704	5,200	19,400	10,100
17	8,751	5,200	19,500	10,100
18	8,812	5,400	19,600	9,900
19	8,665	5,100	19,300	10,100
20	8,671	5,100	19,300	10,100

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La tabla XI describe veinte muestras de un proceso de inyección de aire, separadas en dos trasiegos diferentes y con tomas de datos cada 5 minutos, el total del proceso dura entre 52 a 57 minutos. Es así como al controlar la válvula de aguja en función de que en sitio al ver que, si descendía o si crecía el flujo de aire, se manipuló dicha válvula, para operar de manera que se tuviera un flujo lo más constante posible al igual que la presión de aire en la línea.

El experimento se tradujo en una cantidad de oxígeno disuelto en parámetros deseados, en datos mejor distribuidos y homogéneos. Asimismo, los datos generan un proceso confiable y estable. No obstante, para tener la etapa de inyección de aire dentro de todos los límites de control y con datos constantes es necesario un método de control continuo en función de preservar valores de caudal y presión.

2.5. Plan de mantenimiento de las zonas de aireación

Dentro de la organización se cuenta con planes robustos de mantenimiento preventivo, enfocados a generar pausas de producción para hacer cambios y reparaciones pertinentes en estos momentos si algún equipo lo requiere. Estas actividades se hacen con soporte del módulo de mantenimiento del sistema SAP. Los mantenimientos preventivos tienen rutinas de actividades con frecuencias reconocidas, al finalizar cada orden de trabajo en sistema se procede a hacer un cierre y va quedando un histórico de órdenes ejecutadas.

A pesar del modelo de mantenimiento descrito anteriormente, las zonas de aireación que se han manifestado en este capítulo solamente tienen una rutina de inspección y esterilización de la línea semanalmente, dicho plan se puede observar en la figura 15. La esterilización se hace para evitar que crezcan bacterias que puedan provocar contaminación futura, la inspección se hace con la finalidad de asegurar que la instalación se conserve en el mejor estado posible.

Si bien la rutina que se tiene como mantenimiento tiene una finalidad de conservación y sanidad, no genera un valor agregado para una etapa sumamente importante, pues se basa solo en el criterio del operador y mecánico de turno para evaluar y colocar los comentarios que ellos crean pertinentes en ese momento, así como también no se tiene una rutina de cambio de sellos u otro elemento que pueda ser necesario, este tipo de cambios se hacen con mantenimiento correctivo planificado.

También es necesario mencionar que el formato mostrado en la figura se estableció al verificar la actual lista de verificación, agregando según la experiencia de las visitas en campo actividades que se hacen adicionales y frecuencia y campos necesarios para que se tome una idea de cómo se hacen

las rutinas de limpieza o esterilización de la línea, así como las revisiones que hace el operador del área y cuando se tienen hallazgos se reportan a mecánico de turno y a ingeniero encargado de producción.

Figura 15. Formato orden de trabajo esterilización e inspección de línea zona de aireación

Rutina de inspección Zona de aireación A

Plan semanal de esterilización y verificación de componentes

Semana: _____ año: _____

Fecha: _____

**Departamento de fermentación
Zona de aireación**

Operador: _____

Ayudante: _____

No.	Actividad	Estatus	Observaciones y materiales
1	Cerrar el circuito de aireación para evitar paso a línea de trasiego mosto		
2	Verificar todas las juntas de bridas y sellos de filtros esterilizadores		
3	Dejar pasar vapor hasta alcanzar 100°C por 10 minutos		
4	Drenar todo el condensado que pudiese haber quedado reposado		
5	Verificar estado de manómetro y regulador de presión de la línea		
6	Verificar apriete de roscas de zona de inyección de aire		
7	Verificar que la fecha de recambio de elementos filtrantes no se haya vencido		

Reporte de actividades adicionales: _____

Nota: en estatus colocar una marca al haber realizado la acción descrita en actividad.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Presentación de resultados

La tabla XII describe los valores que debe alcanzar el proceso de aireación, tanto en flujo de aire como en presión de aire y transferencia de oxígeno disuelto en mosto; valores en función de la política de la gerencia de producción para obtener un proceso sano y óptimo de fermentación. Asimismo, estos datos es de suma importancia ponerlos en perspectiva pues contribuirán a dar idea a dónde se debe llegar en cada uno del proceso, a la vez que cuando se presenten datos se tome una idea del estado del proceso previo a la sugerencia de automatización del proceso.

Tabla XII. **Valores óptimos para aireación de mosto y levadura**

Política de aireación de mosto		
Flujo de aire (m ³ /h)	Presión de aire (bar)	Transferencia de oxígeno (mg/L)
Por encima de 8.5	5	Entre 18.5 a 20.5
Política de aireación de levadura		
Flujo de aire (m ³ /h)	Presión de aire (bar)	Transferencia de oxígeno (mg/L)
Por encima de 120	5	N/A
Política de propagación de levadura		
Flujo de aire (m ³ /h)	Presión de aire (bar)	Transferencia de oxígeno (mg/L)
Por encima de 1.20	2	N/A

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.1.1. Presentación de datos de aireación de mosto

Luego de la recopilación de información y la tabulación de datos, se presentan a continuación las tendencias que se obtienen tras analizar los mismos. La tabla XIII muestra los valores de tendencia central para la aireación de mosto, se presentan: la media, o promedio; la moda, el valor que más se repite en el registro; la mediana, el valor central; el cuartil 1, que indica hasta un valor de 7,609 m³/h se agrupa el 25 % de los datos; el cuartil 2, indica que llegando a los que 7,916 m³/h valor en el cual se agrupa el 50 % de los datos; el cuartil 3, que indica hasta donde se agrupa el 75 % de los datos, llegando hasta 8,350 m³/h; el cuartil 4 que indica el valor máximo que alcanza la aireación. Estos contribuyen a conocer cómo se distribuyen los valores de flujo, presión y transferencia, para determinar qué tan preciso y exacto es el proceso en mención.

Tabla XIII. **Medidas de tendencia central para la aireación de mosto**

Medida	Flujo de aire (m ³ /h)	Presión de aire (bar)	Transferencia de oxígeno (mg/L)
Media	7,975	5,139	19,353
Moda	7,508	5,000	19,200
Mediana	7,916	5,100	19,250
Cuartil 1	7,609	4,975	19,100
Cuartil 2	7,916	5,100	19,250
Cuartil 3	8,350	5,200	19,625
Cuartil 4	9,130	6,500	20,500

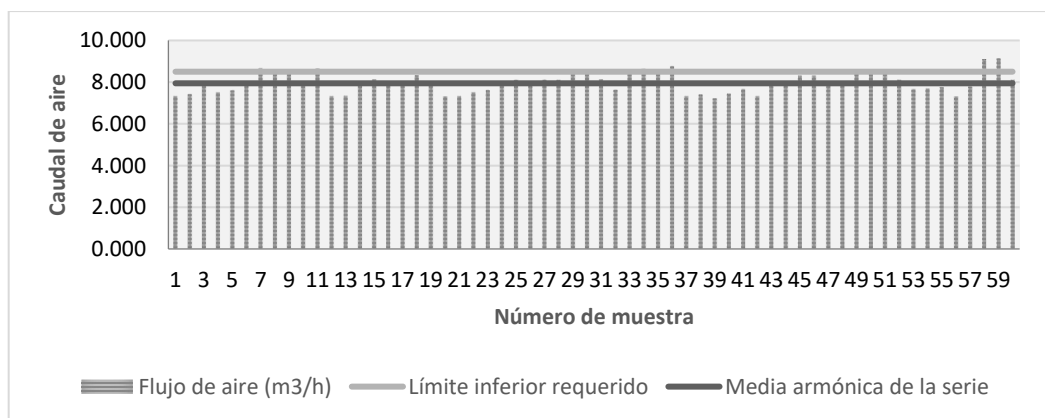
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Al revisar los datos de la tabla XIII y comparando con los datos requeridos que se muestran en la tabla XII en el apartado de política de aireación de mosto, se puede observar que en general el dato de flujo de aire no se logra como es

requerido, el promedio está unos 0.5 m³/h por debajo de lo deseado. Respecto al registro solamente un 25 % de los datos logra estar en orden, los datos que se registran luego del cuartil 3. El conjunto de datos que se tiene en el 25 % de los datos son de preocupación pues está por debajo tanto el flujo de aire como la presión de línea, la transferencia de oxígeno, aunque si está dentro del rango, está cercana al límite inferior permisible. A este segmento y a los del cuartil dos son conjuntos cuyo control se debe mejorar para evitar desviaciones posteriores del proceso que pueden complicar la evolución de maduración del mosto.

La figura 16 que se presenta a continuación, muestra la distribución de datos de flujo de aire en el total de tomas en m³/h que se obtuvieron del proceso, se presenta también el límite inferior requerido para el proceso (8.5 m³/h), observando que dicho valor lo alcanzan en un 25 % de las veces nada más. Además, se muestra la media armónica del caudal de aire el cual es de 7,947 m³/h, teniendo una diferencia negativa de 0.553 m³/h en promedio de toda la serie. La media aritmética es usada en esta ocasión por tener datos los cuales se analizan para ver el rendimiento en tiempos desiguales.

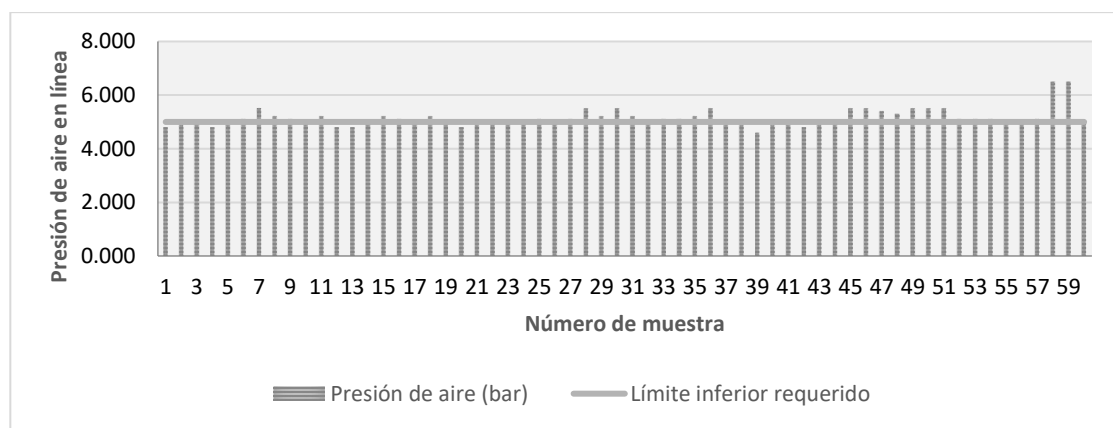
Figura 16. **Gráfico de control de flujo de aire en inyección en mosto**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

El figura 17 expone la situación con la presión de aire en la línea de inyección a mosto, la distribución de barras muestra que en su mayoría los datos alcanzan la política de 5 bar mínimos para este proceso, sin embargo, no se debe dejar fuera el análisis de los hechos que se está superando en muchas observaciones, pues el promedio de este valor es de 5,139 bar, pero hay hechos aislados de alta presión, los cuales se deben controlar para evitar saltos erráticos de inyección de aire o incluso dañar algún dispositivo de control posterior.

Figura 17. **Gráfico de control de presión de aire en inyección en mosto**

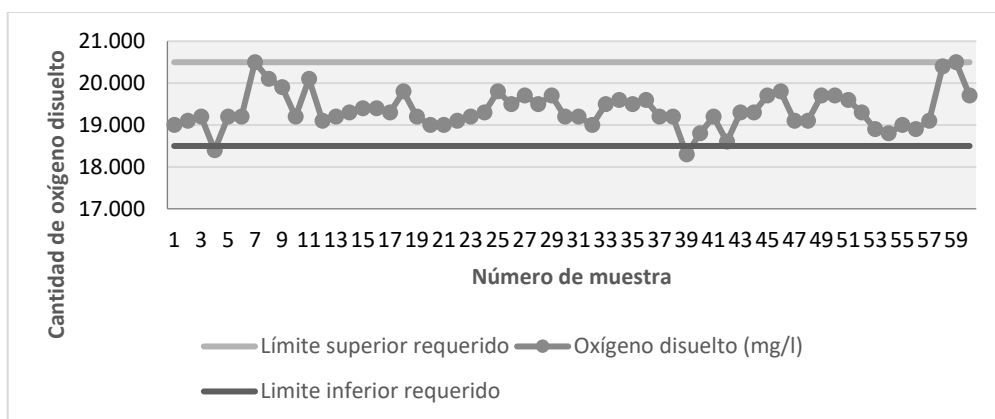


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la inyección de aire existe un tercer parámetro que para el proceso de aireación de mosto es de suma importancia controlar: el oxígeno disuelto en el mosto, esta variable tiene una alta relevancia dado que determina qué tan saludable será una colonia de células de levadura, dado que es este el proceso que arranca la actividad aeróbica de la levadura será necesario un buen flujo de aire para que puedan activarse correctamente las células. Si se tiene un pobre caudal de aire se tendrá una pobre transferencia de oxígeno en el mosto para que en este medio se logre que se reproduzcan las células de levadura y estas inicien la generación de alcoholes y de dióxido de carbono; en cambio si se tiene

un caudal demasiado alto provocará que las células se estresen y mueran lo que se traduce en las mismas consecuencias que tener una pobre transferencia de oxígeno. En la figura 18, se puede observar que en general se tiene una transferencia dentro del rango, pero si hay puntos que generan alarma especialmente la cantidad cercana al límite inferior y los tres puntos que llegan a alcanzar dicho límite.

Figura 18. **Gráfico de control oxígeno disuelto en mosto**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.1.2. **Presentación de datos de aireación de levadura en almacenamiento**

El segundo proceso que se analizará es el de aireación de levadura cuando esta es almacenada, luego de haber pasado un proceso de fermentación y se encuentra en espera a iniciar una nueva etapa de fermentación. Tras la recopilación de datos, la tabla XIV describe la media, la moda y la mediana; así como los cuartiles de la distribución de datos. En comparativa con la tabla XI y la política de aireación de levadura se puede observar que, analizando el flujo de aire, la media representa un valor sano, moda no existe pues ningún valor se

repitió, esto genera la incertidumbre que el proceso no es preciso y cuesta mucho replicarlo. En cuanto a los cuartiles todos están por arriba de lo deseado, exceptuando el cuartil 4 que se despega bastante.

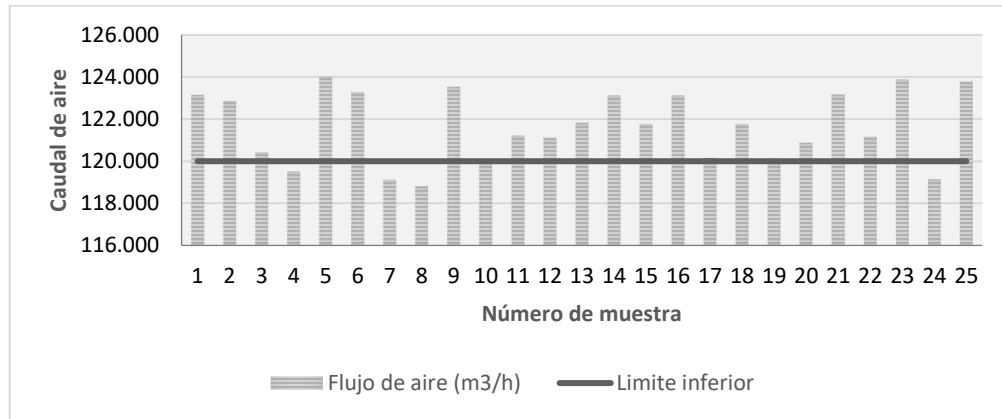
Tabla XIV. **Medidas de tendencia central para la aireación de levadura**

Medida	Flujo de aire (m³/h)	Presión de aire (bar)
Media	121,634	5,184
Moda	N/A	5,100
Mediana	121,751	5,100
Cuartil 1	120,157	5,000
Cuartil 2	121,751	5,100
Cuartil 3	123,145	5,300
Cuartil 4	124,012	5,500

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

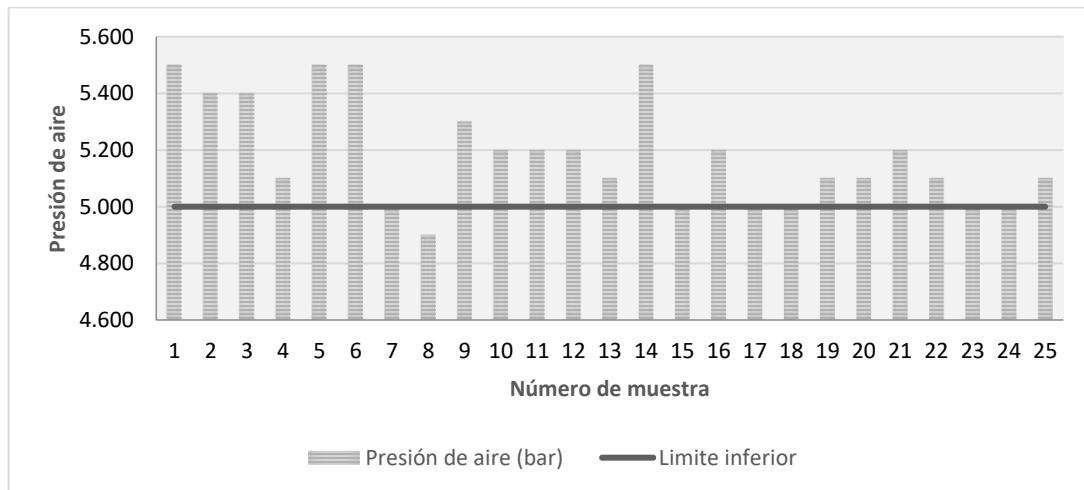
La figura 19 muestra como el flujo de aire en su mayoría alcanza el límite mínimo, en general este parámetro se alcanza con facilidad, el problema es la alta variabilidad del proceso lo que genera incerteza para replicar o estimar cómo se comportará una colonia de células de levadura en almacenamiento.

Figura 19. **Gráfico de control de flujo de aire en levadura**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 20. **Gráfico de control de presión de aire en levadura**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La figura 20, tal y como lo hace la figura 19, muestra un proceso en el cual se alcanza en su mayoría la presión deseada de línea, pero es muy errático e impreciso. Lo alarmante de esta gráfica es la variabilidad y la irrepeticibilidad del

proceso. Esto se ve más claro al observar la tabla XIII, en el registro de flujo de aire, pues la moda no se pudo obtener dado que no se repite en ninguna ocasión valores de caudal de aire, lo que sugiere que se necesita control continuo.

3.1.3. Presentación de datos de aireación en propagación de levadura

El tercer proceso que se analizará es el de propagación de levadura, dicho procedimiento busca que una pequeña colonia de células de levadura jóvenes inicie con la reproducción masiva para que puedan ser adicionadas al mosto en el proceso de fermentación y se generen los alcoholes necesarios en esta etapa. Podría decirse que es en esta etapa la primera vez que en la vida de la levadura que debe ser monitoreada la aireación para que despierte el proceso aeróbico de este microorganismo, dado que es una etapa inicial, la dosificación de aire debe ser muy precisa y etérea.

Tabla XV. **Medidas de tendencia central para propagación de levadura**

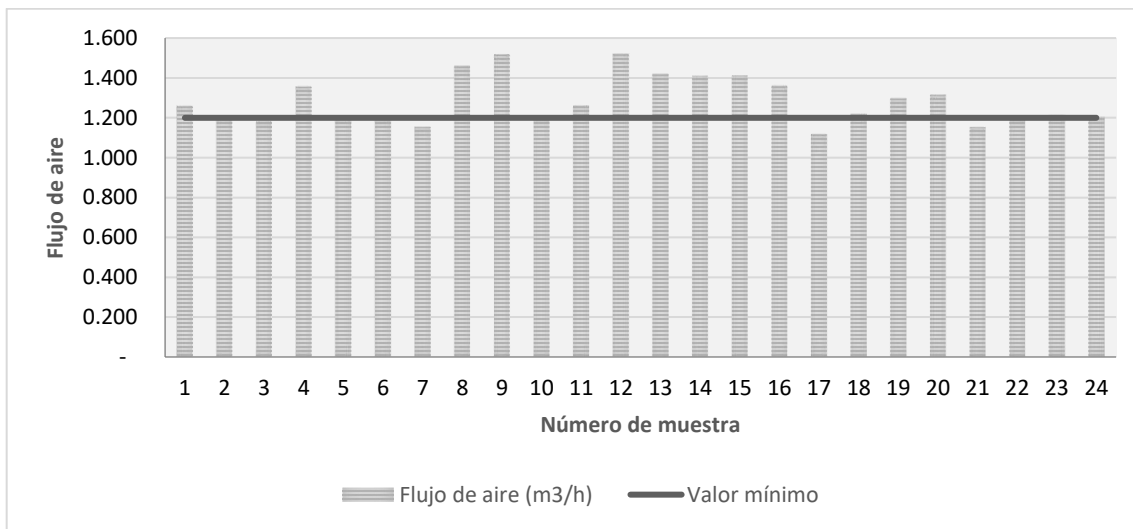
Medida	Flujo de aire (m ³ /h)	Presión de aire (bar)
Media	1,282	2,058
Moda	1,201	2,100
Mediana	1,237	2,100
Cuartil 1	1,200	2,000
Cuartil 2	1,237	2,100
Cuartil 3	1,371	2,100
Cuartil 4	1,518	2,200

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La figura 21 muestra el gráfico de control de flujo en la inyección de aire, con la línea transversal a las barras marcando el valor mínimo que debe alcanzar

esta operación. Este es uno de los procesos que más precisión merece por el valor que debe alcanzar el caudal de aire, es un caudal que si se eleva puede provocar que la colonia de células de levadura se sobre oxigene lo que las llevaría a que una gran parte de células mueran. Por el contrario, si se tiene una pobre aireación la actividad aeróbica no iniciará y esta etapa de iniciar la reproducción de una colonia sana será un fracaso. En general la tendencia central cumple muy bien con lo requerido, en cuanto a la distribución de datos, el 25 % puede quedar ligeramente abajo de lo deseado y el otro 25 % que genera ligeramente causa preocupación es el cuartil 4 que se eleva de 1.6 m³/h. este valor hay que controlar para que no alcance arriba de los 2 m³/h.

Figura 21. **Gráfico de control de flujo de aire en propagación**

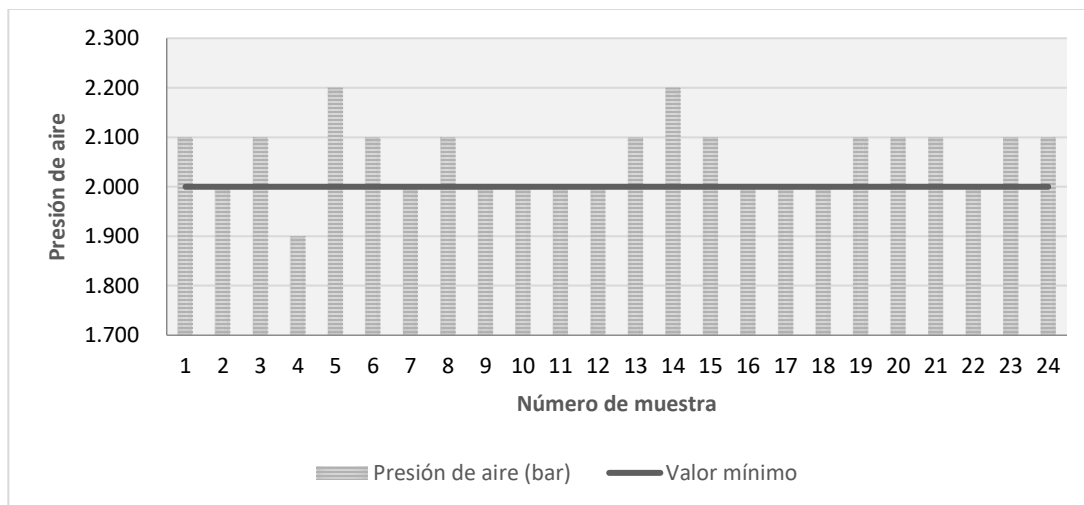


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La figura 22 despliega el gráfico de cómo se comporta la presión de aire, la línea oscura transversal a todas las barras muestra el valor requerido para esta operación. El gráfico por la escala pareciera como que hubiese mucha variación, pero este valor se comporta bastante estable, el registro de datos tuvo una

desviación estándar de 0.072 m con valores mínimos de 1.9 bar y máximos de 2.2 bar, esta variable no representa mayor problema para el proceso, sin embargo, es necesario no perderle control debido a que cambios drásticos pueden ocasionar serios problemas. La razón de que esta variable sea tan constante es debido a que la línea cuenta con un regulador de presión robusto y que ejecuta bastante bien la tarea para la cual fue instalado.

Figura 22. **Gráfico de control de presión de aire en propagación**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.2. **Discusión de resultados**

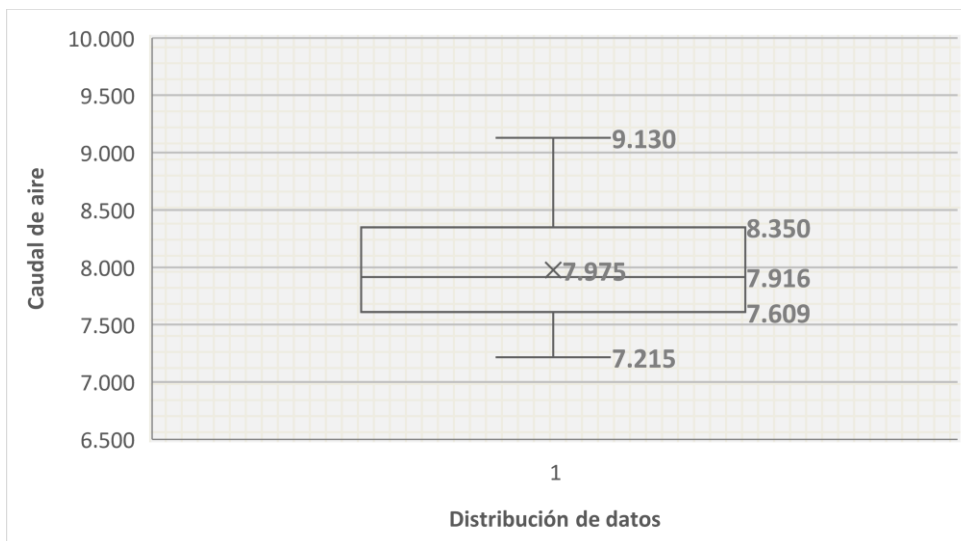
En el capítulo dos se presentaron distribuciones de datos para el proceso de inyección de aire sin ninguna intervención, ver tabla VII, así mismo se presentó en la sección 2.4 del capítulo anterior la tabla X con la distribución de datos de aireación de mosto, la mencionada tabla muestra los datos obtenidos tras una aireación con intervención constante de la válvula de aguja que regula el flujo de aire en sitio para corregir el proceso en cualquier desviación que se pudiese

presentar. Cabe mencionar que una etapa de aireación dura entre 50 a 55 minutos, por lo que se estaba corrigiendo desviaciones de caudal de flujo, presión y monitoreo de transferencia de oxígeno, cada cinco minutos se procedió a ver lecturas de instrumentación y tomar el registro de datos para plasmarlos en la tabla X.

Lo que se pretendía con esta práctica era iniciar a comparar el proceso con dos metodologías: la primera la usada previo a cualquier actualización presentada en esta investigación; dos, una instalación que corrige desviaciones en sitio cada vez que se presenta una perturbación en la línea de aire.

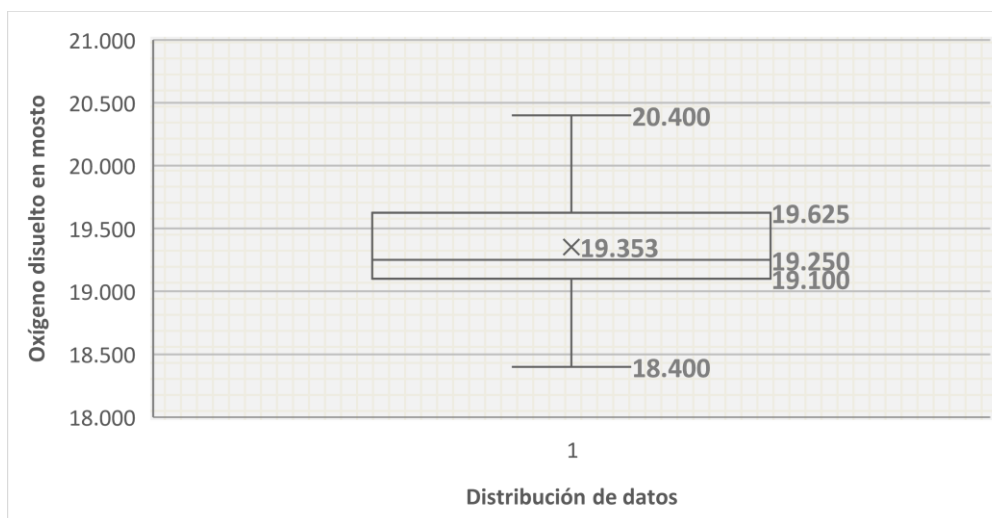
Al analizar la distribución de los datos sin intervención, se obtienen gráficos de distribución de datos. Al analizar la figura 23 se puede observar la gráfica de cajas y bigotes para la inyección de aire en mosto. La política en este punto exige un valor mínimo de $8,5 \text{ m}^3/\text{h}$, sin embargo, el gráfico muestra que la media es de $7,975 \text{ m}^3/\text{h}$, el valor mínimo registrado es de $7,215 \text{ m}^3/\text{h}$, un 25 % de los datos está por debajo de $7,609$, el valor de la mediana o valor justo en el centro es de $7,916 \text{ m}^3/\text{h}$, que a la vez representa el 50 % del registro; el 75 % de los datos está concentrado hasta llegar a un valor de $8,350 \text{ m}^3/\text{h}$ que ya es un valor próximo al requerido. Por lo tanto, se puede decir que más de tres cuartas partes del registro no alcanza el valor requerido para el proceso.

Figura 23. **Diagrama de cajas y bigotes del flujo de aire para la inyección de aire**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

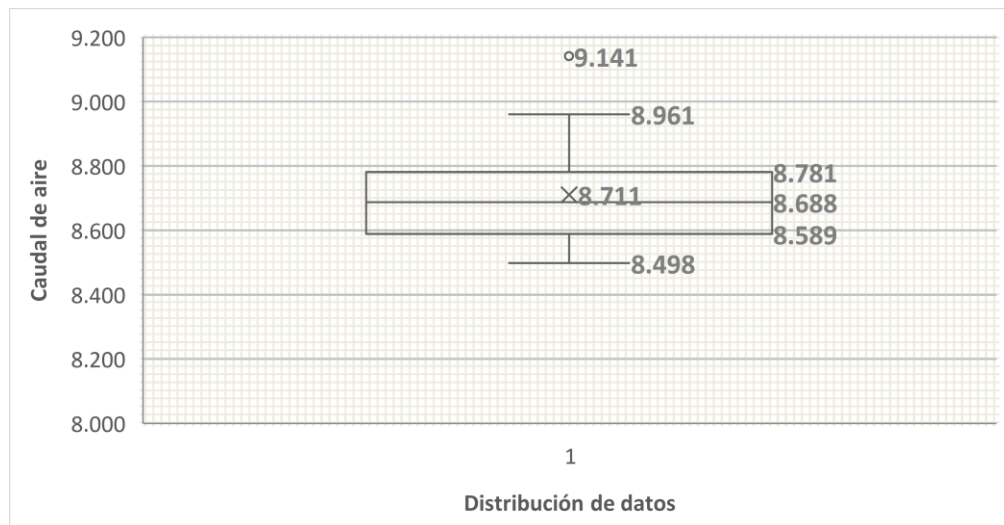
Figura 24. **Diagrama de cajas y bigotes del oxígeno disuelto en mosto**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La gráfica 24, oxígeno disuelto en aire, muestra que el valor mínimo es un demasiado riesgoso porque con esta condición no se logra una correcta operación de transferencia de oxígeno a las células de levadura, sin embargo, el 75 % de los datos están dentro del parámetro requerido y en ninguna ocasión se logra alcanzar el límite máximo que es de 20.5 mg/L. Un dato sano dentro de la planta se considera 19.20 mg/L. pero en el gráfico se puede apreciar que el 50 % de las ocasiones se encuentra por debajo y en general la gráfica está con una tendencia hacia debajo de este valor.

Figura 25. **Diagrama de cajas y bigotes del flujo de aire para la inyección de aire luego de la intervención realizada**

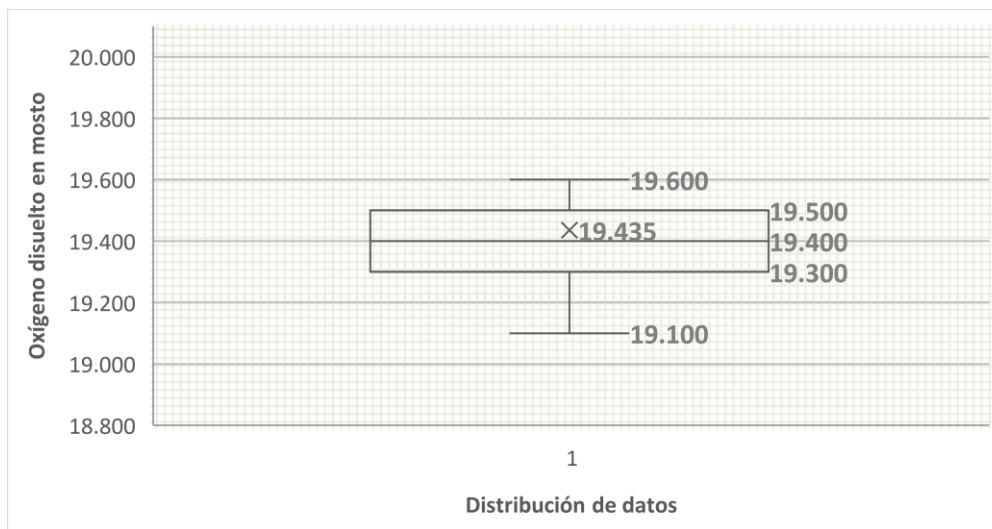


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Al haber intervenido en estar corrigiendo el valor de flujo en las dos ocasiones que se hizo la prueba de manipular la válvula de aguja que regula el flujo de aire se obtuvieron los gráficos de las figuras 24 y 25. La figura 25 muestra un proceso con desviaciones mucho menores, el valor más bajo se encuentra casi en el límite inferior requerido, por debajo nada más por dos milésimas y en

general se puede decir que más del 75 % de los datos se encuentran dentro de lo requerido para el proceso. Con una media muy sana y una mediana (percentil 2), se ve que el proceso no representa riesgo mayor puesto que el valor de desviación estándar es de 0.170 y el promedio de esta distribución es de 8.711 m³/h se puede decir que el rango en que se encontrará el caudal de aire es en 8,881 y 8,541 m³/h lo cual indica que se encuentra por arriba del mínimo requerido.

Figura 26. Diagrama de cajas y bigotes de oxígeno disuelto en mosto luego de la intervención realizada



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La figura 26 demuestra que al haber regulado las perturbaciones en las dos ocasiones que se ejecutó esta tarea el oxígeno disuelto en mosto también se ajustó de mejor manera. La ventaja de tener un proceso estable es que el oxígeno disuelto también lo hace y no presenta perturbaciones, esto debido a que el flujo se dosifica de manera correcta y los valores son muy similares desde el arranque del ciclo de aireación hasta que termina. Esto ayuda a tener una mejor

trazabilidad en el proceso contribuyendo a que la calidad de esta etapa sea más alta. En estas muestras el 50 % de los datos se concentran en el rango de 19.3 a 19.5 mg/L un rango bastante sano, con una desviación estándar de 0.268; del registro mostrado en la tabla X se puede decir que el promedio está en 19.435 mg/L y los valores variaron entre 19.167 y 19.703 mg/L.

Con base en los datos de la tabla VII (tabla completa en apéndice 2), se obtuvo la correlación entre las variables de flujo de aire y la transferencia de oxígeno. La tabla a continuación describe cómo se eleva la correlación entre el aire que se inyecta al mosto y el oxígeno disuelto en mosto. Esto sucede dado que al tener menor variación en el proceso y que la dosificación sea constante se mejora la relación del oxígeno disuelto a través de todo un proceso de envío de mosto previo a enviar el mosto a la etapa de fermentación. Es útil conocer el grado de correlación para determinar qué tanto se puede tolerar que una variable cambie sin que afecte drásticamente a la otra o un proceso completo, o lo que se conoce como variable dependiente de otra. Además, también es de gran utilidad saber la correlación entre variables porque es así cómo se logra inferir o proyectar qué es lo que se obtendrá de una variable dependiente según se cambie la variable independiente.

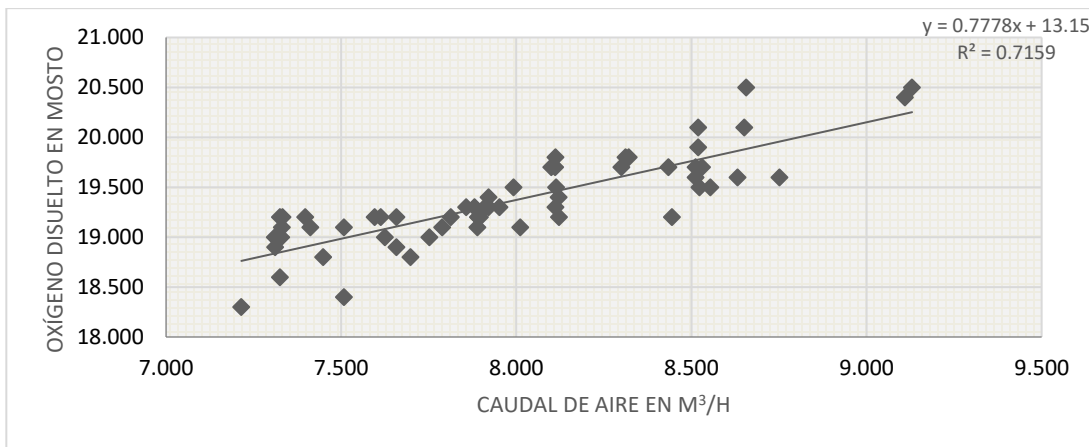
Tabla XVI. **Grado de correlación entre flujo de aire y oxígeno disuelto en mosto**

Muestra	Correlación aire-oxígeno disuelto
Previo a ejercer control constante	0.8461
Luego a ejercer control constante	0.8863

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La figura 27 muestra cómo varía el oxígeno disuelto en el eje de las ordenadas según cambia el flujo de aire en la línea en el eje de las abscisas. Se introdujo también la línea de tendencia lineal de esta distribución de datos. La línea de tendencia es lineal cuya ecuación formada es la mostrada en la gráfica. Los datos tienen una dispersión media y se concentra entre 7.3 a 8.5 m³/h y entre 18.5 a 19.8 mg/L.

Figura 27. Relación flujo de aire y oxígeno disuelto en mosto, previo a control constante del flujo de aire

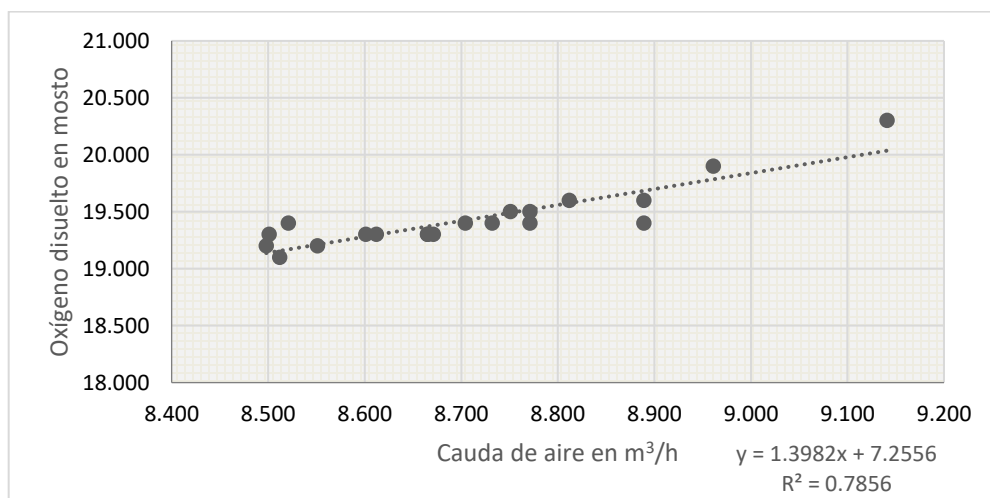


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La figura 28 es bastante similar a la 27 solo que en esta ocasión se ha ejercido control y corregido el flujo luego de notar desviaciones en proceso. Se ha conservado la escala vertical pero la horizontal se ha acortado para que no quede demasiado concentrada a la derecha la distribución de datos. En la distribución se puede apreciar que se encuentran los datos más agrupados y concentrados tanto en flujo como en oxígeno disuelto. En flujo se tiene una distribución mayormente entre 8.49 a 8.7 m³/h a una transferencia entre 19.1 a 19.9 mg/L, con una relación más fuerte en cambios de la variable independiente

o del flujo de aire. Se muestra la línea de tendencia de grado lineal cuya ecuación mostrada en el gráfico da idea el valor del oxígeno disuelto en mosto al valor del flujo de aire inyectado en mosto previo a ser enviado a tanques fermentadores.

Figura 28. Relación flujo de aire y oxígeno disuelto en mosto, posterior al control constante del flujo de aire



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

De la gráfica de la figura 27 se puede obtener la ecuación 1 de la línea de tendencia lineal que se muestra a continuación:

$$y = 0.7778x + 13.15 \quad (1)$$

Hay que tener presente que esta es la ecuación del grupo de datos al momento de no haber ejercido control. Con esta ecuación se puede proyectar, en función del caudal de aire, la cantidad de oxígeno transferido al mosto. De tal cuenta, usando la ecuación 1, en el supuesto que se tiene un flujo de aire de 8.5 m³/h el dato de oxígeno transferido al mosto sería de 19.7613 mg/L.

$$y = 0.7778 * (8.5) + 13.15$$

$$y = 19.7613$$

De la gráfica de la figura 28 se puede obtener la ecuación 2 de la línea de tendencia lineal que se muestra a continuación:

$$y = 1.3982x + 7.2556 \quad (2)$$

Esta es la ecuación del grupo de datos al momento de haber ejercido control y estar regulando la válvula en cada interferencia de los datos del proceso. Al igual que el anterior caso con esta ecuación se puede proyectar, en función del caudal de aire, la cantidad de oxígeno transferido al mosto. Usando la ecuación 2 y en el supuesto que se tiene un flujo de aire de 8.5 m³/h el dato de oxígeno transferido al mosto sería de 19.1403 mg/L.

$$y = 1.3982 * (8.5) + 7.2556$$

$$y = 19.1403$$

Se logra observar que existe diferencia en cuanto al dato obtenido de oxígeno disuelto en mosto, en el segundo proceso se tiene una transferencia más pobre en función a un mismo caudal de aire, sin embargo como los datos están mejor agrupados es un dato más apegado a la realidad del proceso por lo que se podría decir que la segunda ecuación es más confiable y será de más ayuda para proyectar el valor de oxígeno disuelto para que en un futuro se determine este valor si se desea generar alguna prueba en función a este dato.

3.2.1. Comparación con antecedentes

Previo a la investigación de campo realizada y a la recopilación de datos se tomaron conceptos de sustento provenientes de investigaciones previas correspondientes a inyección de aire para mosto y para manejo de levadura en almacenamiento y propagación. Dichas investigaciones contribuyeron a conceptualizar el procedimiento de aireación y la necesidad de inyectar aire para que las células de levadura puedan oxigenarse adecuadamente previo a iniciar su proceso metabólico dentro del mosto y así generen el alcohol y CO_2 necesarios para la etapa de fermentación. El alcohol obtenido para procesos de cerveza no supera en general el 10 % de contenido volumétrico, mientras que para otros procesos como los de vino pueden pasar desde 12 al 15 % o ligeramente mayor al llegar al 20 %.

Revisando el concepto que comparte Argemí (2016), indica que una aireación eficiente en procesos de inyección a un mosto al cual se le añadirá levadura se logra arriba de 4.8 L/min. Esto es equivalente a 0.4032 m^3/h si se revisa el proceso de aireación de nueva cuenta se puede evaluar que el contenido de aireación el cual se solicita esté en 8.5 m^3/h está bastante por arriba al dato de 0.186 m^3/h . Pero esto se debe a los siguientes factores, Barbosa usa una célula muy específica de levadura a temperatura ambiente o de unos 25 °C y a presión atmosférica. En cuanto a la aireación de mosto que se analiza en este estudio son colonias más extensas, se tiene también un mosto frío el cual se logra enfriar en el rango de 7 a 11.5 °C. se tienen también en línea dos filtros, uno adicional al que Barbosa (2017) indica que es necesario de por lo menos 0.22 micrones, mientras que en línea se tienen un hidrofóbico y uno biológico. Por último, la presión de trasiego es mayor a la atmosférica, unos 4 bares, lo que obliga a que la inyección de aire sea mayor para romper la barrera que se tiene dentro de la tubería. Esto obliga a inyectar un volumen mayor de aire.

Colares *et. al.* (2020) en su investigación indica que en la medida que una agitación y aireación aumenten la transferencia de oxígeno lo hará y en el proceso siempre y cuando sea una tasa de transferencia adecuada. Este punto se pudo observar en dos ocasiones del estudio hecho: la primera vez y de forma más evidenciada es cuando se analiza el grado de correlación entre flujo de aire inyectado y el oxígeno disuelto en mosto que se logra alcanzar, con un coeficiente de correlación fuerte se puede concluir que este postulado es correcto. En una segunda ocasión también se ve en los procesos de aireación y de propagación de levadura. Tal y como se ve en las tablas XVIII y IX el proceso de almacenaje de levadura y el de propagación respectivamente, se puede ver que en almacenaje se exige una aireación mayor a la de propagación y esto es debido a que en propagación lo que se requiere es iniciar con la etapa de oxigenación en el cultivo.

Barbosa (2017) comenta que en su estudio fue concluyente que en el cultivo se tenga una adición de 3.1 L/min lo que equivale a 0.186 m³/h, actualmente en esta etapa se tiene una dosificación de 1.20 m³/h, lo que indica que se está inyectando a una velocidad por arriba de 1.014 m³/h, esto puede darse porque Barbosa analiza específicamente las células *Kluveromyces marxianus SLP1*, la cual es muy usada en procesos de fermentación de vinos. En el proceso mostrado se tiene otra célula. Otro aporte valioso de Barbosa es el de indicar que esta etapa debe ser sumamente controlada, ya que indica que este proceso no puede durar menos de 8 horas y una desviación de solo unos minutos puede variar mucho el proceso. El proceso de propagación que se analizó en este estudio dura entre 20 a 24 horas promedio, por lo que la recomendación de afinar esta etapa también es adoptada dado que en efecto las variaciones han afectado en ocasiones pasadas según comentaron en las visitas de reconocimiento del proceso.

4. DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN

Se demostró en el capítulo 3 que el proceso al ser intervenido y corregido constantemente presenta un mejor control y estabiliza el proceso de inyección de aire en mosto, aireación de levadura y propagación para cultivo de levadura. Este es el inicio del principio de automatización y presenta un escenario idóneo para crear un lazo de control basado en una señal la cual debe ser la directriz para automatizar el proceso. Se ha visto que el oxígeno que se necesita obtener en el proceso es directamente proporcional al flujo de aire, por lo que esta será la variable de entrada del lazo de control el cual debe ser cerrado para que, por medio de un *feedback* la variable a ser intervenida siempre se esté ajustando a valores deseados.

4.1. Elementos del sistema de control propuesto

Para tener un sistema controlado de manera correcta se definen a continuación los siguientes aspectos para tener un sistema automatizado en inyección de aire.

- Lazo de control: se propone un lazo de control cerrado en cuyo proceso la variable de flujo de aire será la señal de entrada a la vez que el controlador va regulando el flujo para que siempre se corrija cualquier desviación presentada.
- Tipo de variable: se caracterizará a la variable como de control, debido que está buscando siempre alcanzar un valor denominado como de *set point*.

- Tipo de señal: el proceso se controlará con una válvula proporcional cuya señal será analógica de 4 a 20 mA de flujo de aire. Al tener este valor un regulador modulará la señal entre 4 a 20 mA en valores intermedios de 25 %.
- Posicionador: ajustará la apertura de la válvula proporcional mediante pues el PID le mandará una señal para que ajuste la posición si el lazo de control detecta que se debe ajustar la apertura para liberar o restringir el paso de aire para lograr el flujo de aire requerido.
- Convertidor ip: ajustará la corriente en una presión de salida para que el actuador pueda regular el desplazamiento. Con el PID con una señal también de 4 a 20 mA la cual regresará al posicionador para dar retroalimentación al sistema de lazo de control cerrado.
- Actuador: se usará un actuador neumático acoplado a una válvula con desplazamiento lineal cuyo movimiento se dará para ajustar el paso de aire y así liberar o restringir aire por medio del tubo que inyecta aire al sistema.
- Accionador: será todo el sistema, actuador con válvula. Se usará una válvula proporcional que ajusta la apertura para el paso de aire. El desplazamiento de la válvula se hace por medio de un actuador neumático cuya recámara le transfiere el movimiento al vástago para que este regule la carrera lineal y por consecuente la apertura de la válvula.

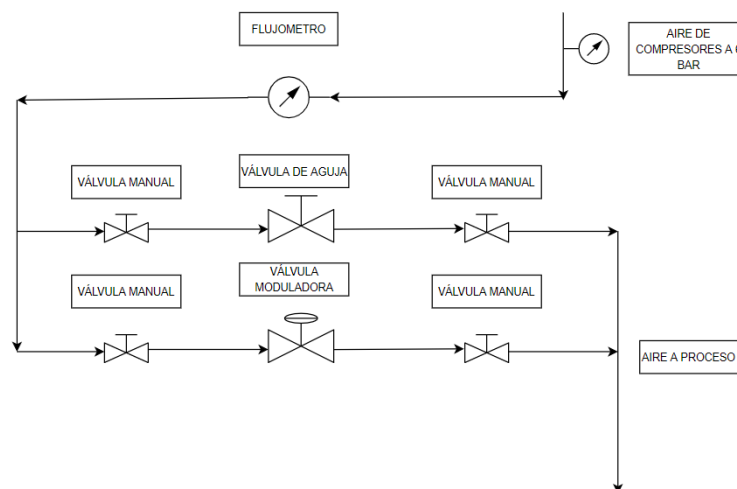
Con los elementos descritos anteriormente se logra obtener un lazo de control para que el sistema se pueda autorregular y siempre estar dentro de los límites de control que se requieren para tener una alta calidad del proceso. Es

necesario tener todas las consideraciones antes mencionadas para que la instalación de cada uno de los dispositivos y componentes que conformarán el circuito sea correcta.

4.1.1. Instalación

Para crear el circuito de automatización se propone el diagrama mostrado en la figura 29: que de la línea de aire proveniente de compresores se tenga lectura y regulación de presión, posterior a la filtración de aire, se tiene luego un flujómetro que detecta la cantidad de aire por unidad de tiempo el cual tiene una restricción de cinco diámetros de longitud antes y después sin que se instale ningún dispositivo o que haya un desvío para provocar un flujo lo más laminar posible. Se propone crear una derivación conocida como *bypass*, esto con el fin de tener redundancia en caso la válvula moduladora falle en proceso y pueda ser extraída de su ubicación para proporcionar mantenimiento.

Figura 29. Diagrama de instalación de dispositivos



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2016.

El *bypass* que se muestra en la figura 29 es donde se ubica la válvula de aguja para que sea esta la que regula si en dado caso hay que extraer de su posición la moduladora por cualquier inconveniente. Las válvulas manuales cumplen la función de desviar el flujo hacia uno u otro ramal. Y, por último, está representada la válvula proporcional que tendrá la tarea de regular el flujo de aire. La tubería de trasiego debe ser acero inoxidable 304 para preservar la inocuidad del proceso al igual que los elementos montados en sitio. El diámetro de la tubería ya montada es de DN 25. Es necesario aclarar que en el by-pass diseñado se han colocado dos válvulas manuales al inicio y final de la derivación, esto para estar en concordancia con el diseño higiénico, al esterilizar la derivación principal la idea que no se proyecte demasiado la tubería y que el vapor no llegue de manera correcta y limpie adecuadamente toda la superficie, de tal cuenta se propone que a 1.5 diámetros de tubería se coloquen estas válvulas y no quede ninguna zona muerta de limpieza.

La figura 30 muestra un modelo de regulador de presión en línea, este dispositivo ayudará a que se puedan ajustar perturbaciones en línea y asegurará una continuidad de presión de aire, este dispositivo también puede llevar montado un manómetro para que se tenga fácil lectura en sitio.

Figura 30. **Regulador de presión de aire en línea**



Fuente: ESO (2022). *Filtro regulador de aire comprimido.*

La figura 31 muestra las válvulas manuales de bola que se montarán en sitio para hacer el desvío de flujo hacia el ramal de la regulación automatizada o hacia el ramal que estará regulado con una válvula de aguja mecánica. Estas serán de 25 mm (1 pulgada). Cuerpo de acero inoxidable con asientos de teflón para hacer la empaquetadura necesaria. También cabe destacar que la instalación inocua contempla que cada válvula debe estar montada a no más de un diámetro y medio para que la esterilización sea efectiva, eso quiere decir que las válvulas manuales deberán estar instaladas a 32.5 mm máximo de la tubería de trasiego de aire.

Figura 31. **Válvulas manuales de bola**



Fuente: SIO (2022). *Válvula De Bola acero inoxidable 3 Piezas Paso Total S03.*

La figura 32 muestra un flujómetro de con principio *vortex* para que pueda detectar correctamente el aire que pasa a través de esta línea. Con los caudalímetros con el principio *vortex* son muy comúnmente utilizados en la industria para poder detectar y medir gases y vapores, lo que lo hace ideal para poder tener una detección y medición adecuada del aire comprimido del proceso.

Hay que tener en cuenta la recomendación que haga el fabricante en cuanto a cantidad de diámetros necesarios en los cuales la tubería se encuentre sin insertos o desvíos.

Figura 32. **Caudalímetro con principio vortex para detección de gases y vapores**



Fuente: endress + hauser (2022). *Caudalímetro Vortex Proline Prowirl O 200.*

La figura 33 muestra la recomendación de válvula de control proporcional que se puede instalar para que ejecute la tarea de regular el flujo de aire, esta debe ser de acero inoxidable con interior acabado pulido, con conexiones bridas y asientos de teflón para provocar el sello, esta válvula lleva montada en sitio el actuador neumático que tiene la función de hacer la carrera lineal del émbolo que transmite el movimiento al cuerpo de la válvula para restricción de aire.

Figura 33.



Fuente: [Fotografía de Miguel Colindres]. (Guatemala, Guatemala. 2022). Colección particular. Guatemala.

Las válvulas de regulación normalmente tienen una reducción en su diámetro para que se asegure la modulación entre el 29 y el 80 % de su carrera.

4.1.2. Instrumentación para control

En la sección 4.1.1 se describieron los elementos que estarían en contacto con el flujo de aire, sin embargo, todos estos elementos no funcionarían en absoluto si no se agregan los dispositivos que generan control. La figura 34 muestra un posicionador de válvula, la función de este dispositivo es recibir la señal del PID, con lo que procede a detectar la posición del vástago y regresar señal para verificar si el regulador de presión debe ejercer alguna corrección necesaria.

Figura 34. Posicionador de válvula



Fuente: Secoim (2022). *Posicionadores de válvula digitales.*

La figura 35 muestra un regulador de presión proporcional cuya función es convertir corriente de 4 a 20 mA a una presión que soporte el actuador neumático, este dispositivo manda una señal al posicionador y este termina de ajustar el vástago en la posición requerida por el PID.

Figura 35. **Regulador de presión proporcional**



Fuente: Festo (2021). Regulador de presión proporcional.

4.2. Propuesta de mantenimiento basado en condición

Con la propuesta de la instalación realizada, además de las ventajas obtenidas para el proceso también se adquieren otras ventajas como el mantenimiento del equipo. Se puede llevar un control profundo del estado de los dispositivos instalados, tomando datos de cómo los parámetros van cambiando en el tiempo, así se preserva de una mejor manera los equipos, de manera tal que la condición del equipo dicte las actividades que se deberán ir realizando en el tiempo para conservar el equipo de la mejor manera posible.

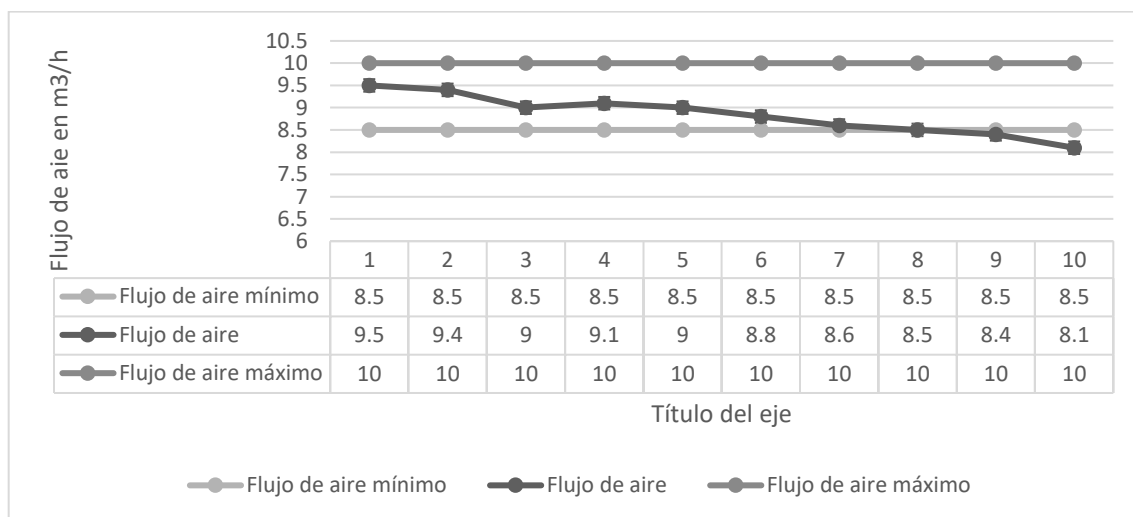
4.2.1. Inspección de variables

Las tareas de esterilización e inspección que se mostró en el capítulo 2, sección 2.5 se deberán completar con tareas adicionales de verificación de la operación. Para tener éxito en el mantenimiento basado en condición es necesario comprometerse a llevar el registro de las siguientes variables: el flujo de aire trasegado por la instalación ha cambiado en el tiempo, así mismo, la transferencia de oxígeno. El monitoreo de las condiciones de operación será esencial para analizar poder ver las siguientes posibles causas:

- Integridad de filtros esterilizadores de aire
- Posibles tapones en la línea
- Posibles fugas en bridas o conexiones de dispositivos
- La cabeza de medición de transferencia de oxígeno
- Funcionamiento de la válvula regular

Para la inspección de las variables de operación es aconsejable formar gráficos de control, dado que la variable tomada para el control de automatización es el flujo de aire o caudal de aire que se tendrá en el proceso será necesario formar un gráfico de control similar al que se observa en el ejemplo de la figura 35, en el cual se tiene un límite máximo y uno mínimo y formar la curva que va adoptando el caudal de aire en el tiempo. Se tendrá que poner especial atención cuando la variable adopta valores muy cercanos al límite o incluso si ya está ligeramente fuera, también se aconseja tener líneas de error típico para conocer en qué momento ya es peligroso los valores que adopta la variable. si se amplía el ejemplo de la figura 36, desde la toma del valor no. 7 donde el flujo se encuentra en $8,6 \text{ m}^3/\text{h}$ cuando el mínimo requerido es $8.5 \text{ m}^3/\text{h}$, se recomienda que ya se inicie a tomar medidas de acción para evitar que se caiga en problemas futuros.

Figura 36. Ejemplo de gráfico de control del flujo de aire



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La periodicidad de toma de datos se aconseja que se lleve por lo menos una vez al día para que el gráfico de control sea confiable y que el análisis del estado del proceso se lleve a cabo una vez por semana con la información de una semana completa. Con la programación necesaria también se puede obtener un gráfico que se genere en tiempo real y que deje el histórico de por lo menos tres meses en la memoria del servidor que registra todos los datos del área, de la misma manera es aconsejable que como mínimo se haga un análisis semanal de las condiciones de la operación para que no quede abandonados los componentes.

4.2.2. Análisis por ultrasonido para detección de fugas

En el proceso de aireación se debe preservar la instalación y sobre todo evitar que se tengan fugas presentes en el sistema. Se puede tener el mejor control y los mejores dispositivos de operación, pero si por desgaste se tienen

fugas de aire en la instalación ya sea por bridas, empaques, tornillos flojos, poros en soldadura, fisuras en tubo o daños subsuperficiales, la aireación se verá fuertemente dañada y no podrá llegar a valores requeridos porque el sistema nunca podrá llegar a caudal y presiones necesarias.

Las fugas pueden comenzar muy pequeñas y ni siquiera ser perceptibles al oído humano por estar fuera del rango audible o porque en los alrededores de la instalación existe bastante ruido proveniente de los equipos situados en las cercanías como lo es un banco de bombas que existe justamente a la par de las zonas de aireación.

Por lo expuesto anteriormente se propone que con una frecuencia de seis meses se haga una inspección por ultrasonido, para ver los fundamentos ver el apartado del capítulo uno: 1.3.2. Esta inspección deberá hacerse preferiblemente contratando los servicios de una empresa especializada en el tema, que cuente con las certificaciones necesarias para hacer una inspección VOSO de la instalación, herramienta que es mucha ayuda en el monitoreo de inspección visual, oír, sentir y oler un mecanismo, para luego proceder con el análisis vía ultrasonido de todos los componentes, la empresas especializadas en estas técnicas cuentan con equipo con la tecnología necesaria para estos análisis y certificados para la operación requerida. Es necesario también hacer la aclaración que es preferible que la inspección se haga cuando el equipo trabaje como regularmente lo hace.

La figura 37 muestra una hoja de verificación para que quede como registro interno de cada una de las inspecciones realizadas, adicional se contará con el reporte que contendrá mayor información que enriquecerá cada una de las inspecciones. Será de gran importancia que, cada vez que se detecte una fuga

de aire se etiqüete en la posición exacta, esto para que programar la corrección de la fuga, ya sea por apriete, cambio de empaques u otra tarea necesaria.

Figura 37. Orden de trabajo y registro para análisis por ultrasonido de las estaciones de aireación

Rutina de inspección Zona de aireación A			
Plan semanal de esterilización y verificación de componentes			
Semestre _____		año: _____	
Fecha: _____			
Departamento de fermentación Zona de aireación			
Empresa _____			
END _____			
No.	Actividad	Estatus	Observaciones y materiales
1	Hacer un análisis VOSO de la instalación		
2	Verificar las bridas de los filtros esterilizadores de aire		
3	Verificar las bridas de las válvulas manuales y de aguja del By-pass		
4	Verificar las bridas de las válvulas manuales y la válvula proporcionadora de control de flujo		
5	Verificar las juntas de los instrumentos de medición (Flujometro, manómetro y cabezal de medición de oxígeno disuelto)		
6	Verificar las líneas de aire del regulador		
7	Verificar el área del actuador neumático		
Reporte de actividades adicionales: _____			

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Las empresas certificadas en estos ensayos no destructivos ofrecerán para esta tarea ultrasonido aéreo, el cual difiere del concepto del pulso-eco que se usa para otros fines. La figura 38 muestra un dispositivo tradicional usado para este tipo de inspecciones, el cual debe ser usado sólo por personal certificado y entrenado para estas tareas.

Figura 38. **Inspección en campo por ultrasonido aéreo**



Fuente: Sifonte (2019). *Aplicaciones de los ultrasonidos en el mantenimiento industrial*.

4.2.3. Rutina de Inspección de variables

En una hoja de cálculo, pudiendo ser el programa Excel, se aconseja que se lleve una tabla con el registro de las variables y con el análisis estadístico necesario para mapear el proceso que permita ir viendo alguna degradación o desviación de variables. El análisis estadístico de las variables se aconseja que se lleve a cabo por el ingeniero encargado del proceso para que el criterio sea correcto, evitar en todo momento dejarlo en las manos de operadores del área.

Luego de la rutina de inspección se deben tomar datos suficientes para que se genere una tendencia desde una tabla. Continuando el ejemplo de la figura 35 se ejemplifica una tabla en la figura 37 con diez valores el cual a modo de demostración amplia cómo se puede modular una tabla y llevar la estadística descriptiva necesaria para que se pueda analizar correctamente el registro que se recabe en una ventana de tiempo prudente.

Tabla XVII. Registro y estadística descriptiva de los datos

No.	Flujo de aire mínimo	Flujo de aire máximo	Flujo de aire
1	8,5	10	9,5
2	8,5	10	9,4
3	8,5	10	9,0
4	8,5	10	9,1
5	8,5	10	9,0
6	8,5	10	8,8
7	8,5	10	8,6
8	8,5	10	8,5
9	8,5	10	8,4
10	8,5	10	8,1
Media			8,84
Error típico			0.140791414
Mediana			8.9
Moda			9
Desviación estándar			0.445221543
Varianza de la muestra			0.198222222
Curtosis			-0.739848371
Coeficiente de asimetría			-0.086116244
Rango			1.4
Mínimo			8.1
Máximo			9.5

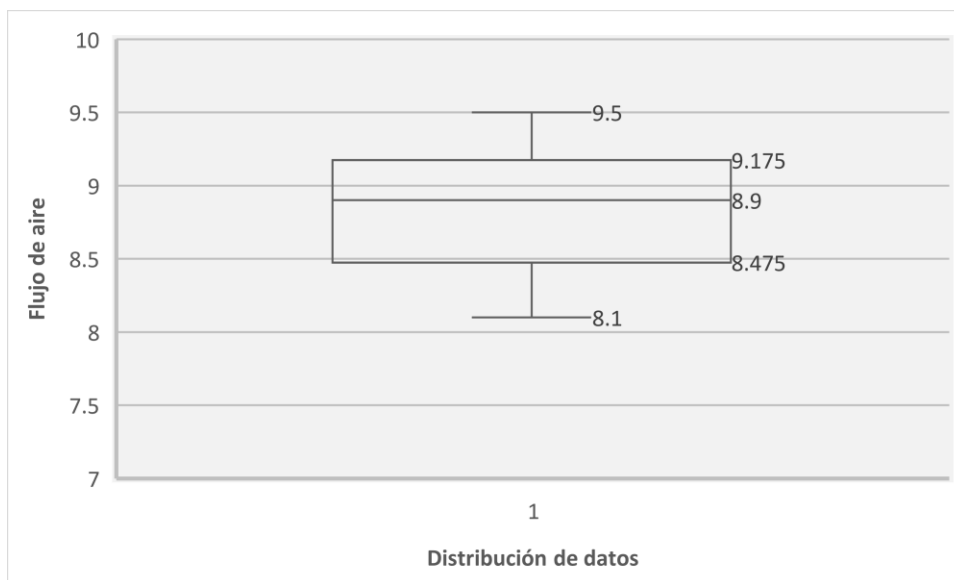
Continuación tabla XVII.

Suma	88.4
Cuenta	10

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

También será necesario llevar un gráfico que permita conocer el estado de los registros en un tiempo estipulado que puede ser un mes para analizar el comportamiento de datos. La figura 39 muestra cómo sería un gráfico prudente, continuando con el ejemplo, para ver cómo se tienen de condensados los datos y compararlos entre meses para ver degradación de datos o desviaciones fuertes.

Figura 39. **Ejemplo de gráfico de cajas y bigotes del registro de flujo de aire**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.2.4. Matriz del modo de fallas

Luego de que se implemente el escenario de análisis de datos también se aconseja que para inspección se amplíe una lista de verificación de componentes. Si un elemento llega a fallar también se recomienda llevar a cabo una matriz de fallas, para que se puedan tomar decisiones con mayor rapidez para llevar a cabo una revisión del problema con fallas posibles que generen cierto error en el proceso de aireación. La tabla XVIII muestra una matriz de fallos para la zona de aireación, tal y como lo propone la tabla V, la cual se aconseja se implemente para la zona de aireación ya automatizada, esto con el fin de acortar el tiempo de atención del técnico y que las decisiones en momentos de emergencia sean tomadas con mayor facilidad y eficiencia.

Tabla XVIII. **Matriz de fallas para la zona de aireación**

Posible problema	Raíz del problema				
	Empaques	Diafragma roto	Falla en actuador	Posicionador	Regulador de presión
Fugas	x		x		
No hay paso de fluido		x	x	x	x
Flujo bajo		x	x	x	x
Retraso en accionamiento		x		x	
Apertura incorrecta de válvula proporcional		x	x	x	x
Actuador no puede operar	x	x			x

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Además de agregar el formato anterior, también se recomienda documentar los eventos en el sistema que se tenga en el monitoreo del mantenimiento, dado que la historia siempre es oportuna para intervenir nuevamente un equipo.

CONCLUSIONES

1. Las condiciones de operación de aireación de mosto son: flujo de aire con una media de 7,975 m³/h, oxígeno disuelto medio de 19,353 mg/L y presión de aire de 5,139 bar. Las condiciones de operación en el almacenamiento de levadura: flujo de aire con una media de 121,634 m³/h, y presión de aire de 5,184 bar. Las condiciones de operación en propagación: flujo de aire con una media de 1,2823 m³/h, y presión de aire de 2,058 bar.
2. La adecuada operación y control de inyección de aire en mosto debe considerar un flujo de aire mínimo de 8.5 m³/h para alcanzar una transferencia de oxígeno de 18.5 a 20.5 mg/L. La adecuada operación de control de inyección de aire en almacenamiento de levadura debe considerar un flujo de aire mínimo de 120 m³/h a 5 bar. En preparación de levadura la adecuada operación debe considerar flujo de aire mínimo de 1.2 m³/h a 2 bar. En los últimos dos procesos no se toma el dato de transferencia de oxígeno.
3. El diseño de automatización de inyección de aire en las etapas de dilución en mosto y preparación de levadura contempla un lazo de control cerrado, en el cual se parametriza la variable de trabajo para controlar el flujo de aire, las señales del proceso de automatización para el proceso de regulación del accionador y se caracterizan los elementos de control de proceso en el cual se identifican, el regulador, posicionador, convertidor y el PID para gestionar el proceso óptimamente. La instalación de

componentes se debe hacer con base en diagramas que muestren correctamente la posición de los elementos.

4. Se diseñó un sistema de automatización para poder mantener la variable de flujo de aire en sistemas de inyección de aire en mosto y manejo de levadura dentro de límites de control y cuando sucedan perturbaciones que hagan mover la variable, el sistema pueda reconocer los cambios para poder rectificar en tiempo real y no sea necesaria la intervención humana, estandarizando el sistema y para que con el debido registro se generen gráficos de control, conociendo así el estado de funcionamiento y determinar el momento idóneo de intervención de los equipos para mantenimiento apoyado también con técnicas como ultrasonido aéreo.

RECOMENDACIONES

1. Registrar los datos de presión de la línea del fluido transegado en la que inyecta el aire. Esto con el fin de obtener la correlación de transferencia de oxígeno disuelto y caudal de aire en el medio y determinar si hay perturbaciones para asegurar óptimas condiciones.
2. Incluir el dato de volumen por volumen por minuto (vvm) para el control de inyección de aire en todas las etapas, desde dilución de aire en mosto y manejo de levadura. Ello con el fin de determinar la tasa de transferencia de aire por unidad de volumen del medio en el cual se disuelve el aire en un tiempo dado.
3. Programar una alarma lumínica e intermitente, así como sonora para que en cada ocasión que la variable de control, flujo de aire, paralelo a la automatización del sistema, es necesario que en la computadora donde se tiene el control de todo el proceso, se desvía o sale de los límites establecidos el operador pueda conocer de forma inmediata esta desviación y pueda tomar decisiones de cómo proceder con el proceso.
4. Modelar una gráfica de control posterior a la instalación de componentes de la automatización, tanto mecanismos como sistemas de control necesario que registre los datos en tiempo real de flujo de aire y presión de línea para conocer el estado actual y considerar un gráfico que conserve historia de por lo menos tres meses para determinar tendencias de operación. También conservar el histórico de análisis de ultrasonido

hechos en la instalación, para evaluar la posible degradación que se esté dando y analizar recurrencia de hechos.

REFERENCIAS

1. Albarracín, K. (2020). *Estudio de parámetros para la propagación de las cepas de levadura cervecera Saccharomyces cerevisiae y Saccharomyces calshbergensis para la fabricación de cerveza artesana* (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Madrid, España. Recuperado de http://oa.upm.es/63464/1/TFM_KATY_ALBARRACIN_TORRES.pdf.
2. Amaya, J. (2022). *Determinación de la condición de las válvulas antirretorno tipo capleta oscilante mediante el análisis de señales temporales y algoritmos de inteligencia artificial* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/81585/71370622.2022.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
3. Argemí, M. (2016). *Diseño de un biorreactor para la fabricación de la cerveza* (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelonatech, España. Recuperado de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/102060/Dise%C3%B1o%20de%20biorreactor%20para%20la%20fabricaci%C3%B3n%20de%20la%20cerveza_Marta_Argem%C3%AD%20%283%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
4. Barbosa, E. (2017). *Monitoreo de la producción de β -fructofuranosidasas a partir de la levadura Kluyveromyces marxianus SLP1* (Tesis de

maestría). Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología Diseño del Estado de Jalisco, México. Recuperado de <https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/383/1/Edwin%20Barbosa.pdf>.

5. Cámara de la Industria de Guatemala (2021). *Más de 60 años promoviendo la industria en Guatemala*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://cig.industriaguatemala.com/institucional/historia/>.
6. Castelló, M., Barrera C., Pérez, E. y Betoret N. (marzo, 2018). Importancia de la fuente de carbono, las tasas de agitación y aireación en la producción de biomasa de levadura con potencial para su uso en el control biológico. *Research, Society and Development*, 9(4), 823-839.
7. Colares, A., da Silva, H. y Saavedra, G. (mayo, 2020). Influencia de la fuente de carbono, las tasas de agitación y aireación en la producción de biomasa de levadura con potencial para su uso en el control biológico. *Research, Society and Development*, 9(4), 823-839. Recuperado de <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/3066/2127>.
8. Comisión para el Esclarecimiento Histórico (1999). *Guatemala memoria del silencio*. Guatemala: Oficina de servicios para proyectos de las Naciones Unidas. Recuperado de <http://www.centrodememoriahistorica.gov.co/descargas/guatemala-memoria-silencio/guatemala-memoria-del-silencio.pdf>.

9. Cueva, K.T. (2020). *Influencia de la aireación de levadura y dosis de zinc en la generación natural del dióxido de azufre en el proceso de fermentación de la cerveza Brahma* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Trujillo, Perú. Recuperado de https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/16253/CuevaCumpa_K.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
10. Daneri, P. (2008). *Automatización y control industrial*, México: Editorial Hispano Americana S. A.
11. Entrena, F. (2015). *Instalación de equipos y elementos de sistemas de automatización industrial*. España: IC Editorial.
12. Escalona, I. (2007). *Transductores y sensores en la automatización industrial*. Argentina: El cid editor.
13. Estela, W., Rychtera, M., Melzoch, K., Torres, F., Calixto, Rosario., Bravo, N., Memenza, M., y Chávez, Y. (2014). *Efecto de la aireación en la producción de compuestos volátiles por cultivo mixto de *Brettanomyces intermedius* y *Saccharomyces cerevisiae* durante la fermentación de sidra*. Berlín, Alemania: VLB Berlín.
14. Fisher (2018). *Guía de selección de válvulas deslizantes Fisher*. España: Emerson. Recuperado de <https://www.emerson.com/documents/automation/gu%C3%ADa-de-selecci%C3%B3n-de-v%C3%A1lvulas-deslizantes-fisher-fisher-sliding-stem-valve-selection-guide-spanish-es-5126136.pdf>.

15. Flores-García, E., Quezada, J., Calderón, R., y Guardado, D. (marzo, 2021). Control basado en PLC y monitoreo mediante HMI de la temperatura en el proceso de maceración y cocción en la elaboración de cerveza artesanal. *Boletín científico INVESTIGIUM de la Escuela Superior de Tizayuca*, 6(12), 44-49. Recuperado de <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/investigium/articulo/view/6338/7796>.
16. García, S. (2011). *La contratación del mantenimiento industrial: Procesos de externalización, contratos y empresas de mantenimiento*. España: Ediciones Díaz de Santos.
17. Gil, H. (2017). *Automatización de sistema de inmersión temporal para el cultivo de vitroplantas basado en autómatas programables* (Tesis de licenciatura). Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Cuba. Recuperado de <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/11386/Hermes%20Jes%C3%BA%20Gil%20Ruiz.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
18. Hernández, A., Ramírez, M., Araíza, A., Flores, O., y Ignacio, H. (2014). *Medición en línea de pH, Temperatura y Agitación de medio de cultivo en fermentación utilizando Saccharomyces cerevisiae*. México: Universidad Politécnica de Amozoc. Recuperado de <https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias%20de%20la%20Ingenieria%20y%20Tecnologia%20T-VI/ARTICULO%2017.pdf>.

19. Hernández-Sampieri, R., y Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. México: Editorial McGraw Hill.
20. Izaguirre, E. (2012). *Sistemas de automatización*. Santa Clara, Cuba: Editorial Feijóo.
21. Jiménez, I. (29 de octubre, 2019). Cerveza Gallo: la tradición de Guatemala no está en venta. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://forbescentroamerica.com/2019/10/29/cerveza-gallo-la-tradicion-de-guatemala-no-esta-en-venta/>.
22. Kunze, W. (2006). *Tecnología para cerveceros y malteros*. Berlín, Alemania: VLB Berlín.
23. Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions. (2012). *Diseño y construcción de un transmisor de presión diferencial para medición de caudal usando como elemento primario un tubo Venturi*. Estados Unidos: Autor.
24. Maloney, T. (2006). *Electrónica industrial moderna*. Berlín, Alemania: VLB Berlín. Recuperado de https://www.vlb-berlin.org/sites/default/files/2018-02/Kunze_espanol-content.pdf.
25. Manger, H. J. (2006). *Tecnología para cerveceros y malteros*. México: Pearson Educación.
26. McGilvery, R. (1977). *Conceptos bioquímicos*. España: Editorial Reverté.

27. Mobley, R. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. Reino Unido: Butterworth Heinemann.

28. Neco, R., Reinoso, O., García, N., y Aracil, R. (2013). *Apuntes de sistemas de control*. España: Editorial Club Universitario.

29. Oficina Económica y Comercial de España en Guatemala. (2020). *Informe económico y comercial*. Guatemala: Autor.

30. Ordóñez, J. y Trejos D. (2007). *Los medidores de flujo (fluxómetros)*. Argentina: El Cid Editor.

31. Paez-Logrerira, H., Ramírez-Cerpa, E., Díaz-Charris L., Lopez-Torres, S. y Miranda-Pupo, C (septiembre, 2017). Control automático del set-point de un sistema de HVAC con Arduino, para un consumo energético eficiente y racional. *Revista Espacios*, 38(61), 1-18. Recuperado de <https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/1950/Control%20autom%c3%a1tico%20del%20set-point%20de%20un%20sistema%20de%20HVAC%20con%20Arduino.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

32. Raffo-Duran, J., Figuereo-Cardero, A. y Dustet-Mendoza J. (diciembre, 2014). Características de la hidrodinámica de un biorreactor industrial tipo tanque agitado. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13(3), 823-839. Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382014000300016.

33. Reyna, M. y Krammer J. (2018). *Apuntes para la historia de la cerveza en México*. México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
34. Romeo, P. (2018). *Montaje y mantenimiento de líneas automatizadas*. España: Ediciones Paraninfo, S. A.
35. Samson (2007). *Convertidores electroneumáticos, reguladores, convertidores*. Estados Unidos: Autor.
36. Tello, J. (2017). *Introducción a las señales y sistemas*. Colombia: Editorial Universidad del Norte.
37. Valle, L. (10 de noviembre, 2019). Sensor ultrasonidos Arduino para medir distancias. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/sensor-ultrasonico-arduino-medir-distancia/>.
38. Vasquez, J. (2016). *Automatización electroneumática*. Colombia: Ediciones de la U.

APÉNDICES

Apéndice 1. Matriz de consistencia

No.	Objetivo	Conclusión	Recomendación
1	Identificar las condiciones de operación del sistema de aireación de mosto y levadura a la fecha de investigación	Las condiciones de operación de aireación de mosto son: flujo de aire con una media de 7,975 m ³ /h, oxígeno disuelto medio de 19,353 mg/L y presión de aire de 5,139 bar. Las condiciones de operación en el almacenamiento de levadura: flujo de aire con una media de 121,634 m ³ /h, y presión de aire de 5,184 bar. Las condiciones de operación en propagación: flujo de aire con una media de 1,2823 m ³ /h, y presión de aire de 2,058 bar.	Para investigaciones posteriores se recomienda registrar los datos de presión de la línea del fluido trasegado en la que inyecta el aire. Esto con el fin de obtener la correlación de transferencia de oxígeno disuelto y caudal de aire en el medio y determinar si hay perturbaciones para asegurar óptimas condiciones.
2	Determinar la adecuada operación y control de inyección de aire en mosto y preparación de levadura en la etapa de fermentación.	La adecuada operación y control de inyección de aire en mosto debe considerar un flujo de aire mínimo de 8,5 m ³ /h para alcanzar una transferencia de oxígeno de 18,5 a 20,5 mg/L. La adecuada operación de control de inyección de aire en almacenamiento de levadura debe considerar un flujo de aire mínimo de 120 m ³ /h a 5 bar. En preparación de levadura la adecuada operación debe considerar flujo de aire mínimo de 1.2 m ³ /h a 2 bar. En los últimos dos procesos no se toma el dato de transferencia de oxígeno.	Para el control de inyección de aire en todas las etapas, desde dilución de aire en mosto y manejo de levadura se debe incluir el dato de volumen por volumen por minuto (vvm). Ello con el fin de determinar la tasa de transferencia de aire por unidad de volumen del medio en el cual se disuelve el aire en un tiempo dado.

Continuación apéndice 1.

3	<p>Elaborar el diseño de automatización de la variable flujo de aire y control en línea en inyección en mosto manejo y propagación de levadura.</p>	<p>El diseño de automatización de inyección de aire en las etapas de dilución en mosto y preparación de levadura contempla un lazo de control cerrado, en el cual se parametriza la variable de trabajo para controlar el flujo de aire, las señales del proceso de automatización para el proceso de regulación del accionador y se caracterizan los elementos de control de proceso en el cual se identifican, el regulador, posicionador, convertidor y el PID para gestionar el proceso óptimamente. La instalación de componentes se debe hacer con base en diagramas que muestren correctamente la posición de los elementos.</p>	<p>Paralelo a la automatización del sistema, es necesario que en la computadora donde se tiene el control de todo el proceso, se programe una alarma lumínica e intermitente, así como sonora para que en cada ocasión que la variable de control, flujo de aire, se desvíe o sale de los límites establecidos el operador pueda conocer de forma inmediata esta desviación y pueda tomar decisiones de cómo proceder con el proceso.</p>
G	<p>Establecer un sistema de automatización para control y estandarización de la etapa de aireación en mosto y levadura en el proceso de fermentación en una industria cervecera.</p>	<p>Se diseñó un sistema de automatización para poder mantener la variable de flujo de aire en sistemas de inyección de aire en mosto y manejo de levadura dentro de límites de control y cuando sucedan perturbaciones que hagan mover la variable, el sistema pueda reconocer los cambios para poder rectificar en tiempo real y no sea necesaria la intervención humana, estandarizando el sistema y para que con el debido registro se generen gráficos de control, conociendo así el estado de funcionamiento y determinar el momento idóneo de intervención de los equipos para mantenimiento apoyado también con técnicas como ultrasonido aéreo.</p>	<p>Posterior a la instalación de componentes de la automatización, tanto mecanismos como sistemas de control es necesario modelar una gráfica de control que registre los datos en tiempo real de flujo de aire y presión de línea para conocer el estado actual y considerar un gráfico que conserve historia de por lo menos tres meses para determinar tendencias de operación. También conservar el histórico de análisis de ultrasonido hechos en la instalación, para evaluar la posible degradación que se esté dando y analizar recurrencia de hechos.</p>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Apéndice 2. Aireación de mosto

No.	Flujo de aire (m ³ /h)	Presión de aire (bar)	Oxígeno disuelto (mg/l)	Temperatura (°C)
1	7.321	4.800	19.000	8.900
2	7.412	4.900	19.100	8.900
3	7.892	5.000	19.200	11.100
4	7.508	4.800	18.400	8.700
5	7.596	4.900	19.200	8.700
6	7.813	5.100	19.200	8.700
7	8.657	5.510	20.500	15.900
8	8.520	5.200	20.100	11.500
9	8.520	5.100	19.900	11.500
10	7.891	5.010	19.200	11.100
11	8.651	5.200	20.100	9.200
12	7.331	4.800	19.100	8.800
13	7.333	4.800	19.200	8.800
14	7.881	5.000	19.300	11.100
15	8.121	5.200	19.400	11.200
16	7.921	5.100	19.400	14.100
17	7.911	5.000	19.300	11.000
18	8.321	5.200	19.800	11.100
19	7.896	5.000	19.200	11.100
20	7.311	4.800	19.000	8.800
21	7.329	4.900	19.000	8.900
22	7.508	5.000	19.100	8.900
23	7.613	5.000	19.200	11.100
24	7.921	5.000	19.300	11.100
25	8.112	5.100	19.800	8.900
26	7.992	5.000	19.500	11.100
27	8.111	5.100	19.700	8.900
28	8.114	5.500	19.500	7.400
29	8.435	5.200	19.700	7.400
30	8.445	5.500	19.200	7.500

Continuación apéndice 2.

31	8.122	5.200	19.200	7.500
32	7.625	5.000	19.000	7.600
33	8.523	5.100	19.500	8.900
34	8.632	5.100	19.600	8.500
35	8.554	5.200	19.500	8.700
36	8.752	5.500	19.600	8.700
37	7.325	4.900	19.200	11.100
38	7.398	4.900	19.200	11.100
39	7.215	4.600	18.300	8.700
40	7.449	4.900	18.800	11.100
41	7.658	4.900	19.200	8.700
42	7.325	4.800	18.600	8.700
43	7.857	4.900	19.300	11.100
44	7.952	5.000	19.300	9.100
45	8.300	5.500	19.700	11.100
46	8.312	5.500	19.800	11.100
47	7.889	5.400	19.100	11.100
48	8.012	5.300	19.100	11.100
49	8.512	5.500	19.700	8.400
50	8.531	5.500	19.700	8.300
51	8.512	5.500	19.600	8.400
52	8.112	5.100	19.300	8.500
53	7.658	5.100	18.900	11.100
54	7.698	5.100	18.800	11.100
55	7.752	5.000	19.000	9.200
56	7.312	5.000	18.900	11.900
57	7.789	5.100	19.100	10.400
58	9.110	6.500	20.400	7.300
59	9.130	6.500	20.500	7.300
60	8.100	5.000	19.700	8.700

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Apéndice 3. Aireación de levadura

No.	Flujo de aire (m ³ /h)	Presión de aire (bar)	Temperatura (°C)
1	123.145	5.500	4.500
2	122.852	5.400	4.100
3	120.412	5.400	4.300
4	119.515	5.100	3.900
5	124.012	5.500	3.800
6	123.258	5.500	3.700
7	119.111	5.000	3.900
8	118.811	4.900	3.900
9	123.515	5.300	3.800
10	120.100	5.200	4.000
11	121.215	5.200	4.100
12	121.115	5.200	4.100
13	121.811	5.100	4.300
14	123.113	5.500	3.800
15	121.751	5.000	4.300
16	123.114	5.200	4.300
17	120.157	5.000	4.200
18	121.756	5.000	4.100
19	120.111	5.100	4.100
20	120.874	5.100	4.200
21	123.157	5.200	4.000
22	121.158	5.100	3.300
23	123.876	5.000	3.800
24	119.145	5.000	3.800
25	123.764	5.100	3.900

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Apéndice 4. Aireación en propagación

No.	Flujo de aire (m ³ /h)	Presión de aire (bar)	Temperatura (°C)
1	1.257	2.100	14.600
2	1.201	2.000	14.500
3	1.180	2.100	14.500
4	1.354	1.900	14.500
5	1.201	2.200	14.300
6	1.195	2.100	14.300
7	1.152	2.000	14.200
8	1.458	2.100	14.000
9	1.515	2.000	14.000
10	1.201	2.000	14.000
11	1.259	2.000	14.000
12	1.518	2.000	14.100
13	1.418	2.100	14.100
14	1.408	2.200	14.000
15	1.409	2.100	14.000
16	1.358	2.000	13.700
17	1.115	2.000	13.700
18	1.216	2.000	13.600
19	1.295	2.100	13.700
20	1.313	2.100	13.500
21	1.151	2.100	13.500
22	1.191	2.000	13.500
23	1.211	2.100	13.500
24	1.201	2.100	13.400

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
Travel (in.)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	
Kv	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	

Fuente: RTK (2018). *Water injection valve for steam converting.*