



Desarrollo de un sistema y de un proceso como un medio para lograr la repetibilidad de resultados en la fermentación de café de baja altura

Development of a system and process as a means to achieve repeatability of results in low altitude coffee fermentation

Juan Manuel Camacho García

Posgrado de Ingenierías, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, Puebla, México

juanmanuel.camacho@upaep.edu.mx

ORCID: 0000-0003-0787-2672

Jorge Rafael Aguilar Cisneros

Decanato de Ingenierías, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla-CONCYTEP, Puebla, México

jorge.aguilar@upaep.mx

ORCID: 0000-0003-3040-157X

Jaime Muñoz-Arteaga

Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, México

jaime.munoz@edu.uaa.mx

ORCID: 0000-0002-3635-7592

Carlos A. Fernández-y-Fernández

Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán, Oaxaca, México

caff@mixteco.utm.mx

Marycarmen Utrilla Vázquez

Universidad Politécnica de Tapachula, Tapachula, Chiapas, México

marycarmen.utrilla@uptapachula.edu.mx

ORCID: 0000-0001-8779-8876

José Adalid López Jiménez

Puebla, México

lopezadalid830@gmail.com

ORCID: 0009-0006-4871-1022

doi: <https://doi.org/10.36825/RITI.12.27.009>

Recibido: Junio 22, 2024

Aceptado: Agosto 17, 2024

Resumen: En este artículo se toma como caso de estudio el café cultivado por micro y pequeños productores en alturas por debajo de los 1000 m s.n.m., en este escenario existe una problemática durante la etapa de fermentación.

La fermentación artesanal es incierta y no logra la repetibilidad de resultados, por lo tanto, no se puede garantizar la calidad del café. El objetivo del presente trabajo es contribuir en la solución de esta problemática, mediante el uso de tecnología y la implementación de procesos que permitan la consistencia de los resultados durante la fermentación. La tecnología será usada para registrar y controlar parámetros de fermentación como temperatura, presión, entre otros. Los procesos se usarán para controlar las actividades como, la selección de la cereza, el manejo del producto, así como de los componentes utilizados durante la fermentación. La solución propuesta se implementará en la organización XaTiwan, un pequeño productor de café de la Sierra Norte del Estado de Puebla. Este artículo incluye las fases tempranas del ciclo de desarrollo de un sistema de software basado en la nube para automatizar el proceso de fermentación con el que se busca lograr la repetibilidad de resultados en esta etapa. Esto contribuirá a controlar la calidad del café que se cultiva en zonas de baja altura.

Palabras clave: *Fermentación de Café, Repetibilidad, Madurez de Procesos.*

Abstract: This article takes as a case study coffee grown by micro and small producers at altitudes below 1000 m a.s.l., in this scenario there is a problem during the fermentation stage. Artisanal fermentation is uncertain and does not achieve repeatability of results, therefore, the quality of the coffee cannot be guaranteed. The objective of the present work is to contribute to the solution of this problem by using technology and the implementation of processes that lead to the consistency of the results during fermentation. The technology will be used to register and control fermentation parameters such as temperature, pressure, among others. The processes will control activities such as cherry selection, product and components handling during the fermentation stage. The proposed solution will be implemented in the XaTiwan organization, a small coffee producer in the Sierra Norte of the State of Puebla. This article includes the early phases of the development cycle of a cloud-based software system to automate the fermentation process with which it seeks to achieve repeatability of results at this stage. This will contribute to control the quality of coffee grown in low altitude areas.

Keywords: *Coffee Fermentation, Repeatability, Maturity of Processes.*

1. Introducción

El café ha adquirido gran importancia a nivel internacional debido a su valor comercial, el cual, en 2010 fue de 16,500 millones de USD, para 2021 fue de 120,590 millones y se estima que para 2030 alcance los 182,630 millones de USD [1]. Mientras que el consumo, a nivel mundial, en 2010 ascendió a los 135 millones de sacos (los sacos pesan 60 kg), para 2021, el consumo fue de 170.3 millones de sacos y para 2024, el consumo será de 177 millones de sacos [2]. En el aspecto económico, en junio de 2022 el precio del café se encontraba en 206.40 centavos de dólar por libra y la tendencia indica que irá aumentando, como ha sucedido desde junio del 2020 cuando su valor era de 100 centavos de dólar por libra [3].

Para mantener estas tendencias económicas, la calidad del café es un factor que debe ser atendido por los productores. La calidad, está determinada por diferentes factores, entre ellos, la altura en que se cosecha el producto más, la manipulación del producto y en general, todas las acciones realizadas en las diferentes fases de su ciclo de vida del café. Se ha demostrado que el café de mejor calidad se cultiva a alturas mayores o iguales a 1000 – 1200 m s.n.m. Esto se debe a factores ambientales, como la exposición al sol y los tipos de microorganismos que existen en el suelo a esas altitudes y que contribuyen a que el café sea, de manera natural, de mejor calidad [4]. Para mejorar la calidad del café que se cultiva en zonas bajas y hacerlo más competitivo se requiere, entre otras cosas, el uso de procesos de fermentación.

El proceso de fermentación se debe realizar en entornos controlados. Cuando la fermentación es artesanal, no se tienen entornos controlados. En este tipo de fermentación no se mide ni controla el proceso. La calidad final del producto no es predecible, cada vez que se realiza una fermentación, ésta será diferente, no se puede garantizar la repetibilidad [5]. Medir y controlar el proceso de fermentación es una actividad compleja. Existe el riesgo de sobre fermentar el café, esto sucede cuando se desarrollan microorganismos no deseados durante el proceso de fermentación que afectan el aroma y el sabor del café [6]. Se han realizado varios trabajos con el objetivo de resolver el tema de la repetibilidad de resultados en el proceso de fermentación, estos se mencionan con más detalles más adelante en este artículo en el apartado del estado del arte, sin embargo, aún es necesario seguir

investigando en esta área con el fin de desarrollar una solución que permita administrar el proceso mencionado y que garantice la repetibilidad del resultado de fermentación [7].

El presente artículo presenta la oportunidad de responder las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuáles son las diferencias entre un proceso de fermentación artesanal y un proceso de fermentación automatizado? ¿Qué mejoras se obtienen al controlar tecnológicamente el proceso de fermentación del café? ¿Además de la tecnología qué otros factores contribuyen a lograr la repetibilidad en la etapa de fermentación del café?

1.1. Marco contextual

Los principales productores de café a nivel mundial se localizan en el “cinturón del café”, localizado en una franja de la Tierra que se encuentra entre el trópico de Cáncer y el trópico de Capricornio. En esta franja se encuentran ubicados los países con mayor producción de café como son Brasil, Vietnam, Indonesia, Etiopía y Honduras [8]. Entre estos países existe una competitividad por abastecer la demanda de café del mercado internacional, con la mejor calidad posible. En la Tabla 1 se observan los datos de exportación a nivel mundial de enero de 2022 mientras que la Tabla 2 muestra los datos de producción durante 2020 de acuerdo con la Organización Internacional del Café (ICO), las cantidades que se muestran en las tablas se expresan en unidades de sacos de 60kg. que es la unidad usada internacionalmente para medir el café [3]. Como se observa existe una competencia muy cerrada de producción. Uno de los principales factores que preocupa a todo productor de café es la calidad de su producto ya que ella incide directamente en la preferencia de su café con respecto al de sus competidores.

Tabla 1. Exportación de café en 2022.

Posición	País	Cantidad
1	Brasil	69,000.00
2	Vietnam	29,000.00
3	Colombia	14,300.00
4	Indonesia	12,100.00
5	Etiopía	7,375.00
6	Honduras	6,100.00
7	India	5,700.00
8	Uganda	5,620.00
9	México	4,000.00

Fuente: Organización Internacional del Café (www.ico.org).

Tabla 2. Producción de café en 2020.

Posición	País	Cantidad
1	Brasil	3,226,441.00
2	Vietnam	2,802,414.00
3	Colombia	1,045,119.00
4	Indonesia	639,900.00
5	Honduras	506,463.00
6	Perú	427,750.00
7	India	427,400.00
8	Uganda	402,212.00
9	México	240,000.00

Fuente: Organización Internacional del Café (www.ico.org).

México es un país productor de café que se encuentra dentro de los primeros 10 a nivel mundial. De acuerdo con la Organización Internacional del Café (ICO) entre 2020 y 2021, en México se produjeron 240 toneladas de café mientras que su consumo fue de 145.2 toneladas. Para el período de agosto del 2021 a enero de 2022 México exportó 14.12 toneladas de café [3].

De acuerdo con la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) y el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) en México, los estados de: Chiapas, Veracruz y Puebla ocupan los primeros lugares de producción de café [9], ver Tabla 3.

Tabla 3. Producción de café en 2022 en México.

Entidad federativa	Absoluta (tons)	Porcentaje
Chiapas	385,704	39.1%
Veracruz	243,135	24.6%
Puebla	171,700	17.4%
Oaxaca	87,560	8.9%

Fuente: SAGARPA.

El estado de Puebla en México cuenta con una superficie plantada de 70,438.4 hectáreas de café, ocupando el tercer lugar a nivel nacional en producción y el cuarto lugar en cuanto a superficie sembrada. En total, este Estado cuenta con 54 municipios donde se cultivan diferentes tipos de café [10].

1.1.1. Factores para determinar la calidad del café

Para evaluar la calidad del café es ampliamente aceptado el uso de los estándares de la SCA (*Speciality Coffee Association*). De acuerdo con su sitio oficial (<https://sca.coffee/>), la SCA es una asociación sin fines de lucro que representa a miles de profesionales de café, desde productores hasta baristas, alrededor del mundo y que certifica la calidad del café. Las calificaciones que otorga la SCA se basan en un conjunto de características del café y son las siguientes: 90-100 puntos, para cafés de Especialidad Extraordinarios; 85-89.9 puntos, para cafés de Especialidad Excelentes; 80-84.99 puntos, para café de Especialidad Muy buenos y, menos de 80 puntos, para los cafés por debajo del café de Especialidad, que se clasifican como café convencional.

De acuerdo con los estándares de la SCA los aspectos que se toman en cuenta para la calificación del café son: fragancia o aroma, sabor, gusto, acidez, cuerpo, balance, dulzura, uniformidad, limpieza, características del suelo, microorganismos y altitud, estos 3 últimos, contribuyen a obtener, de manera natural, una mejor calidad [7].

1.2. Marco teórico

1.2.1. Fermentación del café

El café se cosecha en forma de cereza, su color rojo intenso, indica que está madura y lista para ser cortada. A partir de ese momento comienza un proceso para transformar la cereza en una semilla que podrá ser utilizada en una bebida. Debajo de su cáscara, el café tiene un mucílago gelatinoso el cual debe ser deshidratado. Existen tres tipos de procesos que pueden ser aplicados en el procesamiento de los granos de café: 1) Proceso seco o natural, en éste, el mucílago, la cáscara y la semilla se secan juntos. 2) Proceso húmedo, en él, el café se lava y fermenta. 3) Proceso semiseco, el café es fermentado, pero no se lava.

La fermentación del café es un proceso metabólico donde sustancias orgánicas, principalmente los azúcares se transforman en moléculas alcohólicas, ácidas, gaseosas o de otros tipos, a las cuales se les llama metabolitos. Este proceso se realiza debido a la intervención de microorganismos que actúan en la ausencia de oxígeno (fermentación anaeróbica) o en presencia de oxígeno (fermentación aeróbica). Durante el proceso de fermentación las levaduras y el moho e incluso las bacterias, descomponen el mucílago del café y reducen la cantidad de agua que contiene dejando una semilla deshidratada [11].

1.2.2. Internet de las cosas

Internet de las cosas (IoT) se puede definir como el uso del Internet que cierra la brecha entre diferentes servicios y cosas incluyendo a los humanos. También se puede definir como la suma de sensores, redes, datos y servicios. IoT se puede considerar como una extensión de los servicios de internet para acercar objetos. Estos objetos pueden ser cosas vivas o inanimadas que pueden ofrecer o consumir un servicio. Éstos han sido posibles, mediante la combinación de sensores, actuadores, microcontroladores, entre otros [12].

1.2.2. Cómputo en la nube

El cómputo en la nube es un paradigma computacional donde éste es movido de una computadora personal o un servidor de aplicaciones a una computadora en la nube. Los consumidores solamente necesitan preocuparse directamente por el cómputo que requieren. Los detalles subyacentes están ocultos para el consumidor. El cómputo en la nube proporciona un conjunto de recursos virtuales dinámicamente escalables como un servicio bajo demanda [13].

2. Estado del arte

Existen trabajos previos que intentan resolver el problema de realizar la fermentación en un ambiente controlado, a continuación, se mencionan algunos de ellos.

2.1. Fermentador inteligente

En [14] desarrollaron un fermentador que mide la temperatura y el pH. El fermentador tiene un sistema de refrigeración para controlar la temperatura, también cuenta con un mecanismo de salida para el dióxido de carbono para garantizar las fases aeróbicas y anaeróbicas.

Utilizaron una microcomputadora para leer los sensores de pH y temperatura mediante C++, también utilizaron Java para persistir las lecturas de los sensores en una base de datos MySQL. Sus conclusiones se enfocan en los valores dentro de los cuales obtuvieron los mejores resultados en cuanto presión, y temperatura. Concluyen que la temperatura es un factor importante para obtener mejor calidad en el café.

2.2. Data Logger

En [7] utilizaron un biorreactor que permite tanto la fermentación aeróbica como la anaeróbica. Se usó un *Data Logger* para registrar, manualmente, los cambios de temperatura, así como las mediciones de pH. Usaron un refractómetro digital para monitorear los grados Brix durante el proceso de fermentación, también se usó un colorímetro para monitorear los cambios de color en las drupas del café.

Los datos recogidos en el *Data Logger* se procesaron usando pruebas de regresión lineal en Excel y SPSS (Software de IBM) para análisis estadístico. Los hallazgos que encontraron en esta investigación fue la relación de los valores del pH, grados Brix y temperatura durante el proceso de fermentación. Encontraron que el pH disminuye durante este proceso, mientras que los grados Brix aumentan. Descubrieron que el tiempo de fermentación afecta el color de las drupas, pero no se relaciona con la calidad final del café.

En esta investigación, además de proponer una solución tecnológica como las que se mencionan anteriormente para el proceso de fermentación de café, también se incluye la recolección de datos mediante una red de sensores instalados en un silo y que permiten el control de la fermentación, también se incluye el diseño de una aplicación basada en la nube que garantice la persistencia de la información obtenida de los sensores así como la disponibilidad de los datos para ser consultados en cualquier momento de acuerdo a las políticas de acceso. Adicionalmente a los aspectos tecnológicos, se incorpora el uso de un marco de trabajo en el área de procesos para caracterizar el proceso de fermentación, definirlo y administrarlo con el fin de controlar y mejorar la fermentación.

3. Problemática

El presente artículo toma como caso de estudio la organización XaTiwan que se encuentra en la Sierra Norte del Estado de Puebla, específicamente en la comunidad San Antonio Cuanixtepec del municipio de Hermenegildo Galeana. En esta localidad, el café se cultiva a una altitud de 708 m s.n.m. Allí se cultivan diferentes tipos de café como: Arábica, Sarchimor, Oro Azteca y Mundo Novo.

Los productores de café de esta zona han usado por mucho tiempo un proceso de fermentación artesanal con el cual han logrado conseguir una evaluación de hasta 84 puntos en la escala de SCA, sin embargo, dicho proceso presenta la problemática de no lograr los mismos resultados de manera consistente. Esto se debe, entre otras cosas, al proceso artesanal utilizado. En este no miden ni controlan los parámetros involucrados en la fermentación del café, tales como: la acidez, la presión, la temperatura, el bióxido de carbono, entre otros. Al carecer de un proceso

definido y de las herramientas que apoyen dicho proceso, no es posible garantizar la repetibilidad de los resultados durante la fermentación del café.

Para resolver esta problemática, se realizaron una serie de entrevistas con los micro productores, donde se identificaron sus necesidades. A partir de ellas, se definieron una lista de requerimientos funcionales y no funcionales. Los cuales, permitieron desarrollar un diseño de alto y bajo nivel para construir un sistema que brinde soporte a través de monitorear y registrar el comportamiento de los factores relacionados a la fermentación del café para entonces establecer un proceso con el que se logre la repetibilidad de resultados en la fermentación del café.

3.1. Diseño propuesto

3.1.1. Requerimientos funcionales

A continuación, se presenta una lista de los requerimientos funcionales obtenidos a partir de la entrevista con la organización XaTiwan.

- RF-001.- El sistema contará con un módulo de administración de roles y usuarios.
- RF-002.- El sistema contará con un módulo de administración de tipos de café.
- RF-003.- El sistema contará con un módulo de administración de empresas productoras, sus tipos de café y definición de parámetros de fermentación.
- RF-004.- El sistema contará con un módulo de administración de empresas clientes.
- RF-005.- El sistema contará con un módulo de administración de ciclos de fermentación.
- RF-006.- El sistema contará con un módulo de administración de silos y grupos de fermentación.
- RF-007.- El sistema contará con un módulo de consulta de datos de fermentación.

3.1.2. Requerimientos no funcionales

A continuación, se presenta una lista de los requerimientos no funcionales.

- NRF-001.- El sistema garantizará la conectividad a Internet de los silos de fermentación.
- NRF-002.- El sistema tendrá alta disponibilidad del sistema de fermentación.
- NRF-003.- El sistema mostrará la lectura inmediata de datos de fermentación en los silos mediante un display.
- NRF-004.- El sistema contará con almacenamiento local de datos en los silos para evitar pérdida de información.
- NRF-005.- El sistema generará notificaciones para eventos del proceso de fermentación.

3.1.3. Casos de uso

A partir de los requerimientos funcionales y no funcionales se identificaron los siguientes casos de uso:

- CU-001.- Crear usuarios del sistema.
- CU-002.- Actualizar usuarios del sistema.
- CU-003.- Eliminar usuarios del sistema.
- CU-004.- Crear empresas productoras.
- CU-005.- Actualizar empresas productoras.
- CU-006.- Eliminar empresas productoras.
- CU-007.- Crear empresas compradoras.
- CU-008.- Actualizar empresas compradoras.
- CU-009.- Eliminar empresas compradoras.
- CU-010.- Autenticar usuarios en el sistema.
- CU-011.- Autorizar usuarios en el sistema.
- CU-012.- Crear silos de fermentación.
- CU-013.- Actualizar silos de fermentación.

- CU-014.- Eliminar silos de fermentación.
- CU-015.- Crear parámetro de fermentación.
- CU-016.- Actualizar parámetro de fermentación.
- CU-017.- Eliminar parámetro de fermentación.
- CU-018.- Crear ciclos de fermentación.
- CU-019.- Actualizar ciclos de fermentación.
- CU-020.- Eliminar ciclos de fermentación.
- CU-021.- Registrar datos de fermentación de manera síncrona.
- CU-022.- Registrar datos de fermentación asíncronamente.
- CU-023.- Consultar datos de fermentación en tiempo real.
- CU-024.- Consultar datos de fermentación históricos.
- CU-025.- Notificar creación de usuario.
- CU-026.- Notificación de recuperación de contraseña.
- CU-027.- Notificar inicio de ciclo de fermentación.
- CU-028.- Notificar desconexión de un silo de fermentación.
- CU-029.- Notificar conexión restablecida de un silo de fermentación.
- CU-030.- Notificar finalización de ciclo de fermentación.

4. Materiales y métodos

La tecnología es una herramienta útil como apoyo en el área de procesos, nos permite automatizar algunas tareas y también realizarlas de manera eficiente, reduciendo la posibilidad de introducir errores por el factor humano. En este trabajo se propone el diseño de un sistema que servirá para automatizar el proceso de fermentación del café lo cual permitirá controlar el proceso para hacerlo repetible.

4.1. Metodología DMAIC

En esta investigación se utilizó la metodología DMAIC [15] (por sus siglas en inglés) que consiste en 5 pasos como observa en la Figura 1.

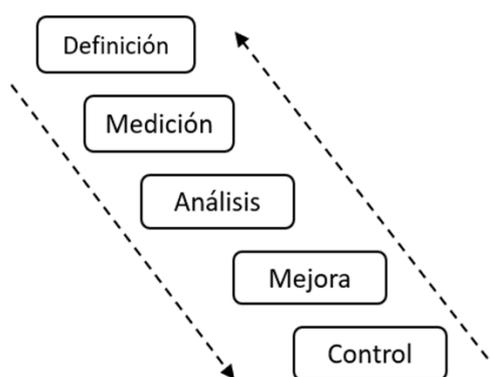


Figura 1. Descripción de la metodología DMAIC.

- **Definición.** En esta fase se identifica al cliente. Se define la problemática que necesita resolver. Adicionalmente, se especifican las necesidades de los *stakeholders*.
- **Medición.** Se especifican las métricas a utilizar y los datos que serán recolectados.
- **Análisis.** Los datos recolectados son analizados para establecer las causas de los defectos e identificar dónde se puede mejorar el proceso.
- **Mejora.** Diseñar soluciones para arreglar y prevenir cualquier problema.
- **Control.** Controlar y mantener las mejoras en el proceso, a lo largo del tiempo.

4.2. SCRUM

La metodología utilizada para el desarrollo del sistema fue SCRUM (Figura 2). El sistema fue incrementando su funcionalidad después de cada sprint, adicionalmente, se establecieron historias de usuario.

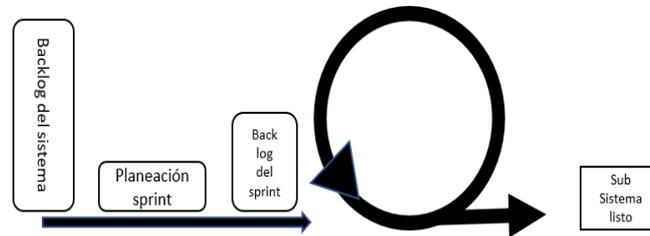


Figura 2. Metodología de SCRUM.

4.3. Arquitectura de sistema en la nube

Para controlar el proceso de fermentación se construyó un sistema IoT para el monitoreo de parámetros. Se puede apreciar la arquitectura del sistema en la Figura 3.

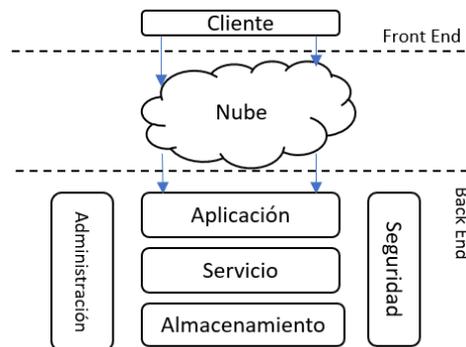


Figura 3. Arquitectura de sistemas en la nube.

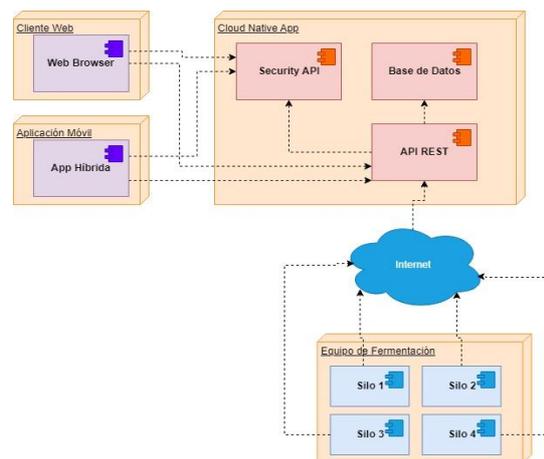


Figura 4. Diagrama de despliegue de la solución *Cloud* nativa para el control y monitoreo del proceso de fermentación de café de baja altura.

En la Figura 4 se muestra el diseño de la aplicación basada en la nube que se utiliza para el monitoreo y registro de las mediciones en tiempo real del proceso de fermentación.

El equipo de fermentación está compuesto por el grupo de silos de fermentación equipados con sensores para registrar y monitorear los parámetros deseables en el proceso de fermentación los cuales se conectan a Internet a

través de un módulo Wifi. Estos sensores envían información a un intervalo de tiempo definido a una aplicación en la nube la cual registra las lecturas de los sensores y las almacena en una base de datos.

El sistema que se propone tiene dos componentes principales, uno es el sistema basado en la nube pública que utilizará una base de datos no relacional la cual servirá para almacenar y presentar los datos del proceso de fermentación, así como también aplicará las reglas de visualización sobre los datos que corresponden a cada rol. El otro componente está formado por los silos de fermentación que mediante diferentes sensores transmiten datos del proceso de fermentación al sistema utilizando Internet como medio de comunicación.

El sistema considera un módulo de seguridad para autenticar y autorizar usuarios. La seguridad está basada en roles, existen 3 roles: Administrador, Productor y Comprador. El rol de Administrador permite gestionar todos los permisos de los demás roles incluso de otros usuarios Administradores. El usuario administrador de la plataforma también posee los permisos para crear empresas tanto Productoras como Compradoras. El usuario Administrador está a cargo de crear los usuarios con los roles de Productor y Comprador. Al momento de crear un usuario se le asignará su tipo de usuario y a que empresa pertenece, esto permitirá autorizar al usuario para tener acceso a los datos de la empresa a la que está asignado.

La creación de una empresa Productora, dentro de la plataforma, requiere que se incremente el control de los diferentes tipos de fermentación con los que trabaja, para el caso de XaTiwan se utilizan tres tipos: Honey, Doble Fermentación y Natural. Cada tipo de fermentación tiene una duración que también se configura cuando se crea el tipo, la duración de cada tipo de fermentación se mide en horas y generalmente va desde 24 hasta 72 horas. Cuando se crea un tipo de fermentación se especifica si ésta es aeróbica o anaeróbica. El usuario productor puede también agregar y modificar los tipos de fermentación una vez que la empresa ha sido creada por un usuario administrador y se haya creado al menos un tipo de fermentación.

Cada empresa productora requiere el registro de los parámetros que desea monitorear durante el proceso de fermentación. Para el caso de XaTiwan se consideran 7 parámetros: Temperatura (°C), Acidez (pH), Presión (psi), Dióxido de Carbono (ppm), Lípidos (°Bx), Oxígeno (ppm), Alcohol (grados). Cada parámetro tiene una unidad de medida que se asigna cuando este es creado. Internamente el sistema le asignará una clave alfanumérica a cada parámetro, esta clave se usará en los silos de fermentación para identificar el dato del sensor correspondiente cuando se comunique con el sistema. Los parámetros serán creados inicialmente por un usuario Administrador, pero podrán ser modificados por el usuario de tipo Productor para su empresa. En la configuración de una empresa productora se requiere asignar un valor de frecuencia para sincronización de datos entre los silos de fermentación y el sistema, la unidad de medida de este parámetro está dada en minutos. El parámetro de sincronización indica el umbral de tiempo que se espera para recibir una actualización de datos por parte de los silos de fermentación, de tal manera que si el sistema no recibe el siguiente paquete de datos dentro de la cantidad de minutos que han sido configurados entonces el sistema mandará una notificación de que se ha perdido la conexión entre los silos y el sistema.

El envío de datos que se generan en los silos de fermentación se realiza de dos formas, síncrona y asíncrona. Cuando el sistema está recibiendo de manera constante los datos de parte de los silos de fermentación y este puede mostrarlos en tiempo real entonces se realiza un registro síncrono. Si se pierde la conexión entre los silos de fermentación y el sistema, entonces los silos son capaces de almacenar dentro de un buffer los valores que se generen mientras la conexión se ha perdido. Una vez que la conexión sea restablecida entonces los silos de fermentación enviarán de manera asíncrona los datos que almacenó el buffer y entonces limpiará el buffer, el sistema recibirá los datos que se almacenaron temporalmente en el buffer del silo mientras no había conexión y entonces los almacenará en la base de datos.

Una empresa productora debe registrar en el sistema los silos de fermentación que utilizará para su proceso de fermentación, cada que se crea un silo, el sistema genera una clave alfanumérica que se utilizará para configurar el silo, de esta manera el sistema identificará los datos que provienen de un silo que ha sido registrado y entonces aceptará los datos que este envía.

Para iniciar un ciclo de fermentación éste debe ser creado en el sistema, se pedirá la fecha y hora de inicio del ciclo, así como el tipo de fermentación que corresponde y los silos que se utilizarán para dicho ciclo. El sistema empezará a recibir paquetes de datos provenientes de los silos de fermentación después de la fecha y hora asignadas, una vez reciba el primer paquete de datos enviará una notificación indicando que se ha iniciado un ciclo de fermentación, y una vez que falte una hora para que se termine el tiempo de fermentación de acuerdo al tipo, el sistema enviará otra notificación para alertar al productor de que el ciclo está llegando a su fin y que esté preparado para sacar el producto de los silos de fermentación.

El sistema mostrará en tiempo real los datos del ciclo o ciclos de fermentación que se estén ejecutando. Mostrará los valores inmediatos de los parámetros de fermentación, así como una gráfica del comportamiento de estos durante el ciclo. El sistema también mostrará datos históricos de ciclos de fermentación ya terminados. Los usuarios de tipo Comprador solo podrán consultar los valores históricos de los ciclos de fermentación.

5. Resultados

Primero se definieron una serie de procesos con el fin de realizar las actividades de fermentación de una manera homogénea. En los procesos definidos, ver Figura 5, se establecieron los criterios de entrada, actividades y criterios de salida.

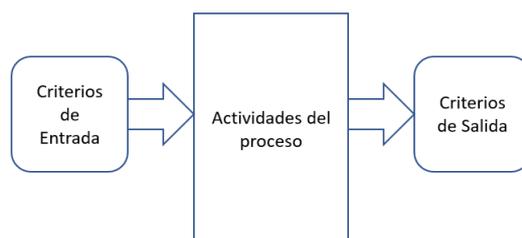


Figura 5. Esquema de un proceso.

Los procesos se definieron, tomando en cuenta el esquema de proceso y fueron los siguientes: Proceso general de fermentación, el Proceso de cosecha, el Proceso del grano, el Proceso de fermentación y el Proceso de secado. Para cada proceso se definió su propósito, criterios de entrada, actividades y criterios de salida.

Con estos procesos se controlaron las actividades relacionadas con la fermentación de café y se busca que las actividades siempre sean las mismas dado que el proceso está definido y permite ser administrado. El seguimiento de los procesos implicó la recolección de datos a través de los sensores instalados en la plantación. Al aplicar las fases de la metodología DMAIC: Definición, Medición, Análisis, Mejora, Control, se obtuvieron los siguientes resultados.

En la fase de Definición, se identificó la problemática presente en la tarea de fermentación. Para ello, se visitó la comunidad de San Antonio Cuanixtepec, perteneciente al municipio Hermenegildo Galeana en la Sierra Norte de Puebla. En esta visita, el proceso de fermentación de café fue mostrado. Adicionalmente se escucharon las problemáticas que enfrentan los micro productores de café. Ver Imagen 1.



Imagen 1. Entrevista con *stakeholders*.

En este caso de estudio, se contactó con la iniciativa XaTiwan. También se escucharon las necesidades que se tienen con respecto al fermentador de café, que actualmente es artesanal, como se puede apreciar en la Imagen 2.



Imagen 2. Fermentador artesanal.

En la fermentación actual, que realizan los micro productores es de tipo aeróbica, que implica ausencia de oxígeno. Para realizarla, toman como parámetro de control, las horas de fermentación que pueden ser de 24, 48 ó 72 horas. Con esta información más una serie de entrevistas adicionales con el *stakeholder* principal, se definieron los requerimientos del sistema, casos de uso, arquitectura del sistema, diseño detallado, codificación, pruebas y puesta en operación del sistema de fermentación IoT. Por cuestiones de espacio, ningún artefacto generado en estas fases del ciclo de vida del desarrollo de software se muestra en este artículo.

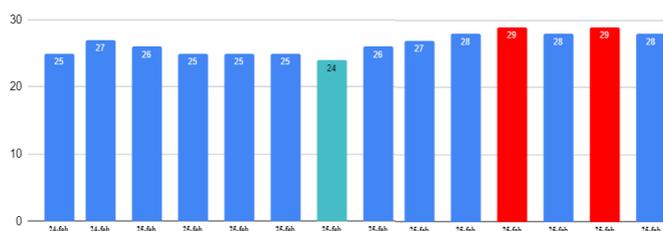
En la fase de medición, se definieron las variables tanto del proceso como del sistema que deben ser recolectadas mediante el seguimiento del proceso y con la ayuda del sistema de fermentación IoT. Estas variables son, entre otras, para el caso del sistema IoT: la fecha, la hora, el ph, la temperatura, la humedad, el alcohol, el gas. Para el caso del proceso, se definieron variables, como: Tipo de enfermedades, tipo de semilla, tipo de cosecha, características del agua de riego, condiciones de recolección de la cereza, condiciones de la fermentación, entre otras variables.

En la fase de análisis, con respecto al sistema IoT, las variables recolectadas fueron analizadas automáticamente y, cuando las variables salían de su rango de referencia se generaron alertas. Visualmente se representaron en color rojo. Para el caso del proceso de fermentación, las variables enunciadas se registraron en los formatos de recolección de datos, definidas en el proceso, con el fin de identificar bajo qué condiciones se obtiene cierto tipo de fermentación.

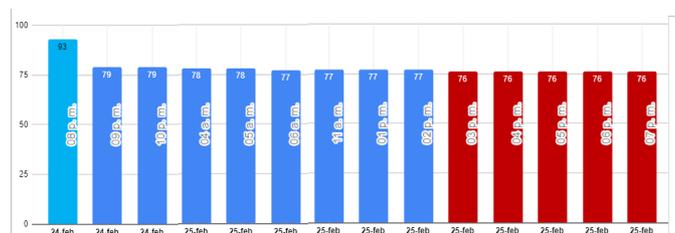
En la fase de Mejora. Para el caso del sistema, se definirán las variables que se deben recolectar para un mejor proceso de mejora de la fermentación. En el caso del proceso que se está definiendo, se identificarán qué aspectos se deberán modificar en cada una de las variables definidas con el fin de mejorar la definición del proceso de fermentación que se está proponiendo y que tiene como objetivo, garantizar la repetibilidad de los resultados de fermentación.

Las fases de control junto con la fase de Mejora serán objeto de un trabajo a futuro y se detallan en las siguientes secciones. Adicionalmente, se muestran los resultados obtenidos al ejecutar el sistema de fermentación. Los datos recolectados, fueron almacenados en archivos CSV y las gráficas se muestran en las siguientes figuras. Al ejecutar el sistema que monitorea el proceso de fermentación se obtuvieron, por mostrar algunas, las siguientes mediciones, ver de las Gráficas 1 2 y 3. El desarrollo del sistema fue administrado y construido con las metodologías descritas en la sección 4.

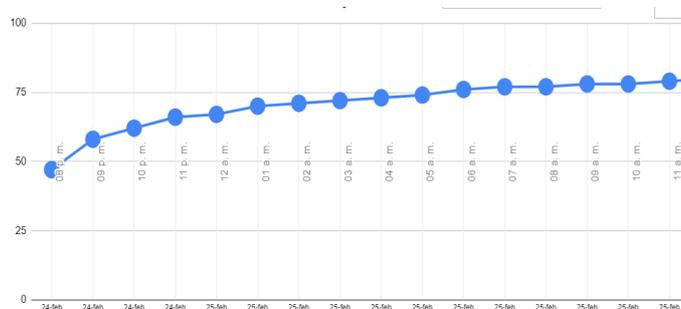
Actualmente, el silo de fermentación desarrollado tiene capacidad para fermentar 2 Kg de café. El silo está equipado con sensores que miden la temperatura, el dióxido de carbono, la humedad y el grado de alcohol. Actualmente el silo no cuenta con un refractómetro que mida automáticamente los grados Brix por lo que la medición es manual en esta fase del trabajo. Los sensores del silo están conectados a una tarjeta con un microcontrolador que procesa la lectura de los sensores. Se instaló un módulo de WiFi con el fin de enviar los datos obtenidos desde los sensores a una base de datos en la nube.



Gráfica 1. Registro de temperatura.

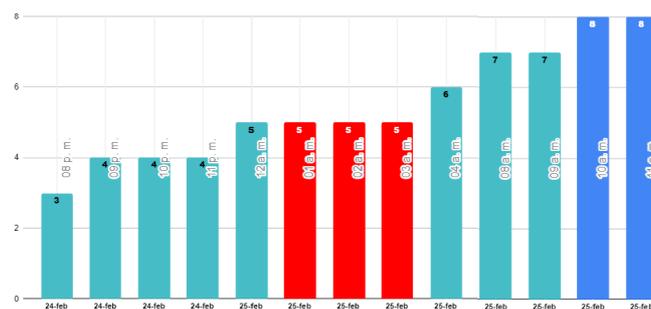


Gráfica 2. Registro de humedad.



Gráfica 3. Registro de alcohol.

A partir de los valores almacenados en la base de datos, se genera, gráficamente, el muestreo de los datos recolectados, mostrando en rojo los valores que están fuera del rango de referencia para el proceso de fermentación, como se muestra en la Gráfica 4.



Gráfica 4. Porcentaje de gas.

6. Discusión

Tomar como marco de referencia la metodología DMAIC ha servido como guía para que de una manera estructurada se haya desarrollado el sistema IoT que ha permitido recolectar la información de acuerdo con lo establecido en el proceso que ha sido definido para esta investigación.

En la etapa de Definición, se identificó el problema y se recolectaron las necesidades de los *stakeholders*. La problemática está definida sin embargo resolver el problema no es una tarea sencilla porque intervienen muchos factores en el proceso de fermentación. Por lo que se deberá definir y mejorar el proceso de fermentación mediante un número considerable de corridas. Adicionalmente se deberá ajustar el sistema IoT para que incluya la

modificación de requerimientos que se generarán al actualizar el proceso de fermentación que en este artículo se presenta.

La medición de variables deberá ser una etapa dinámica que se deberá actualizar dependiendo de inclusión o eliminación de variables tanto del proceso como del sistema. Por su parte la etapa de análisis deberá ser llevada a cabo por *stakeholders* que conozcan el proceso de fermentación. Ellos tomarán las decisiones con respecto a la actualización de las variables del sistema y del proceso. En el análisis se deberá identificar el conjunto de variables del proceso y del sistema que permita alcanzar un nivel aceptable de calidad, de la cereza del café, como resultado de un proceso de fermentación, adicionalmente, se deberá garantizar que la repetibilidad del proceso ha sido alcanzada.

La etapa de mejora estará directamente relacionada con la actualización de las variables del sistema y del proceso. Lo que se buscará es incrementar la madurez del proceso de fermentación, propuesto, hasta alcanzar un nivel administrado. El sistema IoT instalado en el fermentador que fue desarrollado para este artículo, se encuentra en una etapa de prototipo. Este sistema ha sido utilizado para llevar a cabo algunas fermentaciones. La finalidad es identificar dónde se deben colocar los sensores para su correcto desempeño, así como definir qué tipo de sensores deben ser incluidos en el siguiente prototipo. Adicionalmente, la ejecución de varios eventos de fermentación ha servido para detectar aspectos que deben ser mejorados en el proceso de fermentación que están siendo definido, el objetivo es alcanzar un nivel de madurez que permita que el proceso sea administrado.

5. Conclusiones y trabajo futuro

Las mediciones actuales han sido útiles para probar tanto el proceso de fermentación definido en este artículo como el sistema IoT desarrollado. Sin embargo, se deberán realizar un número considerable de fermentaciones que permitan mejorar el sistema y el proceso, hasta alcanzar un proceso administrado y un sistema IoT que garantice la repetibilidad del proceso.

Adicionalmente se pueden incluir la medición de más parámetros durante el proceso de fermentación y analizar cómo se comportan estos y a partir de los datos obtenidos decidir si estos parámetros son significativos para determinar un proceso repetible. Por otro lado, también existen algunos parámetros para los cuales no se pudo obtener algún sensor que permita la medición automática, por ejemplo, en el caso de los grados Brix que proporcionan la cantidad de glucosa en la muestra. Por esta razón la medición de los grados Brix se tiene que realizar manualmente previo y posterior a la fermentación, pero no durante el proceso. De la misma manera la acidez de la muestra no pudo ser medida debido a que no se encontró un sensor que permita medir el pH para compuestos que no sea líquidos, como el caso del mosto de la descomposición durante el proceso de fermentación, existe la alternativa de medir la acidez del agua que se usa para el lavado de la cereza, sin embargo, al igual que la medición de los grados Brix, ésta sería manual y una vez terminado el proceso de fermentación, lo cual no permite la automatización completa del proceso. Además de que al ser una medición manual existe el riesgo de incurrir en errores de medición o mediciones inexactas.

Como trabajo a futuro se tiene planeado desarrollar un nuevo silo de fermentación con las mejoras identificadas en esta primera etapa. En este silo se incluirán mejores materiales para la construcción del silo y sensores con características adecuadas para la recolección de datos. También se considera terminar la interfaz gráfica de la plataforma para la consulta y presentación de datos a los productores de café.

7. Agradecimientos

Damos las gracias a los micro productores de la iniciativa Xatiwan por recibirnos en sus instalaciones y por habernos mostrado el proceso completo del cultivo del café. En particular, agradecemos al Ing. Jesús Juárez Vázquez por toda la logística del viaje y de la presentación del ciclo de vida del café en sus instalaciones de la Sierra Norte de Puebla.

8. Referencias

- [1] Straits Research. (2024). *Coffee Market Size, Share & Trends Analysis Report By Species (Arabica and Robusta), By Group (Brazilian Naturals, Colombian Milds, Robustas, and Other Milds) By Product (Whole*

- Bean Coffee, Ground Coffee, Instant Coffee and Others) and By Region (North America, Europe, APAC, CSA, MEA) Forecasts, (2024-2032)*. <https://straitresearch.com/report/coffee-market>.
- [2] Figueroa-Hernández, E., Pérez-Soto, F., Godínez-Montoya, L., Perez-Figueroa, R. A. (2019). Los precios del café en la producción y las exportaciones a nivel mundial. *Revista Mexicana de Economía y Finanzas Nueva Época*, 14 (1), 42-56. <https://doi.org/10.21919/remef.v14i1.358>
- [3] ICO. (2024). *Coffee Market Report August 2024*. <https://www.ico.org/>
- [4] Veloso, T., Silva, M., Cardoso, W., Guarçoni, R., Kasuya, M. C., Pereira, L. (2020). Effects of environmental factors on microbiota of fruits and soil of *Coffea arabica* in Brazil. *Scientific reports*, 10, 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71309-y>
- [5] Tolentino Vaz, C. J., Soares Menezes, L., Corrêa Santana, R., Andriati Sentanin, M., Zotarelli, M. F., Zanella Guidini, C. (2022). Effect of Fermentation of Arabica Coffee on Physicochemical Characteristics and Sensory Analysis. *Research Square*, 1-14. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1555586/v1>
- [6] Haile, M., Kang, W. H. (2019). The Role of Microbes in Coffee Fermentation and Their Impact on Coffee Quality. *Journal of Food Quality*, 2019 (1), 1-6. <https://doi.org/10.1155/2019/4836709>
- [7] Mariyam, S., Kistanti, A., Karyadi, J. N., Widiyastuti, R. J. (2021). Improving coffee quality through yeast addition in the fermentation process to support sustainable coffee production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1-8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1005/1/012012>
- [8] Basso Pregolini, V., de Melo Pereira, G. V., da Silva Vale, A., Carvalho Neto, D. P., Soccol, C. R. (2021). Influence of Environmental Microbiota on the Activity and Metabolism of Starter Cultures Used in Coffee Beans *Fermentation*, 7 (4), 1-14. <https://doi.org/10.3390/fermentation7040278>
- [9] SAGARPA/SIAP. (2022). *Escenario mensual de productos agroalimentarios*. <https://www.gob.mx/siap/documentos/reporte-mensual-de-escenarios-de-18-productos-agroalimentarios-2022>
- [10] SEGOB. (2023). *Puebla alcanza el 3er. lugar a nivel nacional del valor de producción de café*. <https://www.gob.mx/agricultura/puebla/articulos/puebla-alcanza-el-3er-lugar-a-nivel-nacional-del-valor-de-produccion-de-cafe?idiom=es>
- [11] Dinh, N. Y., Nguyen, D. Q., Le, P. H. (2022). Application of digestive bioprocessing model on coffee fermentation. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 7 (1), 21-26. <https://www.foodsciencejournal.com/archives/2022/vol7/issue1/7-1-17>
- [12] Alam, D. M., Shakil, D. K., Khan, M. S. (2020). *Internet of Things (IoT): Concepts and Applications*. Springer.
- [13] Lisdorf, A. (2021). *Cloud Computing Basics: A Non-Technical Introduction*. Apress.
- [14] Carbajal-Guerreros, I., Pilco-Valles, H., García-Herrera, F. A., Coronel-Rufasto, I., Gonzales-Diaz, J. R., Cabanillas-Pardo, L. (2022). Fermentador inteligente con tecnología de fermentación controlada para estandarizar procesos de fermentación de cafés de especialidad. *Revista Agrotecnológica Amazónica*, 2 (1), 1-17. <https://doi.org/10.51252/raa.v2i1.303>
- [15] Shaikh, S. A., Kazi, J. (2015). A Review on Six Sigma (DMAIC) Methodology. *International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER)*, 5 (2), 17-21. https://www.ijmer.com/papers/Vol5_Issue2/Version-2/C0502_02-1721.pdf