UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE MECATRÓNICA

DISEÑO DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN APLICADO A UN PROCESO DE LIMPIEZA INTERNA PARA LA CERVECERÍA ARTESANAL LA PAZ.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTOR: MATEO FRANCISCO CORDERO IZQUIERDO
TUTOR: ING. EDY LEONARDO AYALA CRUZ PHD.

Cuenca – Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Mateo Francisco Cordero Izquierdo, con documento de identificación N.º 0302803556 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 23 de enero del 2025

Atentamente,

Mateo Francisco Cordero Izquierdo
0302803556

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Mateo Francisco Cordero Izquierdo, con documento de identificación N° 0302803556, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: "Diseño de un sistema de automatización aplicado a un proceso de limpieza interna para la cervecería artesanal La Paz.", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 23 de enero del 2025

Atentamente,

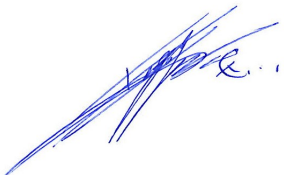
Mateo Francisco Cordero Izquierdo
0302803556

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Edy Leonardo Ayala Cruz con documento de identificación N° 0105627277, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: "DISEÑO DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN APLICADO A UN PROCESO DE LIMPIEZA INTERNA PARA LA CERVECERÍA ARTESANAL LA PAZ.", realizado por Mateo Francisco Cordero Izquierdo con documento de identificación N° 0302803556, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículos Académicos que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 23 de enero del 2025

Atentamente,



Ing. Edy Leonardo Ayala Cruz, Msc. PhD.
0105627277

Dedicatoria

Mateo Francisco Cordero Izquierdo

Este trabajo está dedicado a las personas a las que siempre se encuentran presentes en mi mente y en mi corazón.

A mis padres, Javier y Belén, por su paciencia infinita y su amor incondicional, por apoyarme y siempre estar presentes, por enseñarme lo que es un hogar y por cuidarme en la vida, por ser un soporte durante los momentos difíciles y por todo lo que me falta mencionar.

A mi hermana Alejandra, por acompañarme en mis buenos y malos momentos y traer risas gratificantes en el momento menos adecuado.

A mis abuelos que siempre han sido un pilar en mi vida, acompañándome y enseñándome con ese cariño y amor único de los abuelos.

A Irina, quien ha sido la mejor compañía que he podido tener, por enseñarme como seguir adelante en situaciones difíciles y por su amor incomparable.

Gracias por ser parte de mi vida, les amo con todo el corazón.

Agradecimientos

Mateo Francisco Cordero Izquierdo

Agradezco a las personas que han estado a mi lado durante todo esta etapa, a Irina, a mi hermana, a mis padres, a mis abuelos, a mi primo Francisco, a mis compañeros y actuales amigos, Eduardo, Santiago, Nicolás.

Agradezco a mis profesores, los cuales han tenido la paciencia necesaria para compartir sus conocimientos y ayudarme a alcanzar mis metas, con especial mención al ingeniero Edy Ayala, el cual ha sido un pilar en el desarrollo de este trabajo de titulación, al ingeniero Paul Chasi y al ingeniero Diego Urgiles, por compartir su pasión por enseñar.

Muchas gracias al Ing. Luis Reina, por abrirme las puertas en la cervecería y brindarme todo el apoyo posible durante este proceso.

Agradezco a los que confiaron en mí y me enseñaron a seguir adelante.

Este documento fue realizado enteramente en LaTeX

Índice

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación **I**

Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana **II**

Certificado de dirección del trabajo de titulación **III**

Dedicatoria **IV**

Agradecimientos **V**

1. Introducción **2**

2. Materiales y Métodos **3**

2.1. Análisis del Sistema CIP 3

2.2. Diseño del Sistema de Automatización del CIP 4

2.3. Simulación del Diseño Propuesto 5

3. Resultados y Discusión **7**

4. Conclusiones **8**

5. Referencias **8**

Artículo Científico / Scientific Paper

Diseño de un Sistema de Automatización Aplicado a un Proceso de Limpieza Interna para la Cervecería Artesanal La Paz

Design of a Automation System Applied to an Internal Cleaning Process for La Paz Craft Brewery

Mateo Francisco Cordero Izquierdo [1], , Edy Leonardo Ayala Cruz [2],

Resumen

Este artículo presenta un análisis integral y el diseño de un sistema de automatización aplicado al proceso de limpieza interna (CIP) en la industria cervecera. A partir de la evaluación del CIP semiautomático existente, se identificaron oportunidades de mejora en el control de variables críticas, consumo de químicos y tiempo de operación. Para abordar dichas limitaciones, se propuso un diseño mecatrónico que integra sensores de turbidez y conductividad, válvulas actuadas y un controlador lógico programable (PLC) programado en el software TIA Portal. Los resultados de la simulación sugieren una reducción significativa en el tiempo total de limpieza y en el consumo de recursos, al tiempo que se fortalece el cumplimiento de normativas internacionales y buenas prácticas de manufactura. Con ello, se promueve una gestión más eficiente y sostenible del proceso de sanitización, impactando positivamente la inocuidad y la competitividad de la cervecería.

Palabras clave: Automatización de procesos, Lipieza In Situ (CIP), Industria cervecera, Optimización de recursos, Control de variables críticas.

Abstract

This paper presents a comprehensive analysis and design of an automation system applied to a Clean In Place (CIP) for breweries. A semi-automated CIP system has been evaluated, and opportunities for improvement in the control of critical variables, chemical consumption and operation time have been identified. To address these limitations, a mechatronic design has been proposed that integrates turbidity and conductivity sensors, actuated valves and a Programmable Logic Controller (PLC) programmed in TIA Portal software. The simulation results suggest a significant reduction in total cleaning time and wastes. Additionally, international regulations and Good Manufacturing Practices (GMP) have been followed for the proposed design. This results in a more efficient and sustainable cleaning process management, which involves a positive impact on safety and productivity for a brewery.

Keywords: Process automation, In Place Cleaning (CIP), Brewing industry, Resource optimization, Control of critical variables.

[1] Carrera de Mecatrónica, Universidad Politécnica Salesiana UPS, Cuenca, Ecuador. Author for correspondence: mcorderoi@est.ups.edu.ec
[2] Grupo de Investigación en Sistemas Mecatrónicos, GISM, Universidad Politécnica Salesiana UPS, Cuenca, Ecuador.

1. Introducción

La limpieza y desinfección en la industria alimenticia son pilares fundamentales para garantizar la calidad e inocuidad de los productos finales. Según la normativa ISO 22000 (2018) [1], es imprescindible implementar un enfoque sistemático para garantizar la inocuidad alimentaria a través de medidas de control como el análisis de peligros y la gestión de puntos críticos (HACCP, por sus siglas en inglés). Los procesos de limpieza deben ser rigurosamente controlados y verificados para cumplir estándares de calidad, salubridad, higiene e inocuidad [2]. Este control constante es indispensable para asegurar la seguridad del producto y evitar riesgos de contaminación [3]. En consecuencia, los métodos de limpieza modernos están diseñados para cumplir estrictos protocolos regulatorios necesarios para asegurar el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales [4].

Dentro de la industria cervecera se enfrenta un riesgo constante de contaminación, debido a la manipulación de potenciales fuentes de contaminación, como las levaduras. Según Latorre (2022) [5], en un estudio realizado en 37 cervecerías artesanales de origen andino, se observó un 69.3% de cervezas contaminadas con microorganismos. Las cervezas artesanales son especialmente vulnerables a la contaminación debido a la falta de control y al incumplimiento de normativas nacionales o internacionales [6].

En consecuencia, es crucial implementar normativas y regulaciones nacionales e internacionales para minimizar los riesgos de contaminación en la producción cervecera. En el ámbito nacional, para asegurar condiciones de salubridad e inocuidad adecuadas, la Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria (ARCSA) [7], recomienda que se implementen Buenas Prácticas de Manufactura (BPM), exista una correcta implementación para el uso de productos de limpieza en la industria cervecera y se obtenga una notificación sanitaria de los químicos usados, que deben garantizar la prevención de microorganismos y el cumplimiento de las notificaciones sanitarias pertinentes. La correcta implementación asegura la eliminación efectiva de contaminantes sin comprometer la calidad del producto final [8], [9]. Además, la normativa ISO 22002-1. (2009) [10], determina que "las organizaciones deben establecer y validar programas de limpieza y desinfección para asegurar que todas las partes del establecimiento y el equipo se limpien y/o desinfecten conforme a un programa definido".

En las últimas décadas, los sistemas de limpieza industrial han experimentado evolucionado significativa. La transición de métodos manuales a sistemas automatizados, conocidos como Clean In Place (CIP), ha revolucionado los procesos de limpieza en la industria de bebidas [11], [12]. Estos sistemas permiten realizar operaciones de limpieza sin necesidad de desmontar equipos, lo que reduce tiempos de parada y minimiza el riesgo de contaminación cruzada [13]. Además, la automatización de los sistemas CIP ha contribuido a mejorar la eficiencia operativa y a garantizar la consistencia en los procesos de limpieza [14].

Los sistemas CIP son capaces de garantizar la reducción de residuos y microorganismos en superficies de contacto, optimizando el uso de detergentes y desinfectantes a través de ciclos controlados de enjuague, lavado y desinfección [15]. A pesar de los avances tecnológicos, los sistemas CIP requieren un mantenimiento y control de variables continuo. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2011) [2], es esencial el monitoreo de variables críticas como la conductividad, temperatura, flujo y tiempos de operación de los agentes químicos utilizados. Un control preciso de estas variables asegura el cumplimiento de los estándares de calidad y previene los riesgos de contaminación y la proliferación de microorganismos [16], [17].

Los sistemas de CIP automatizados se encuentran presentes en el ámbito industrial, pues proporcionan condiciones de alta eficiencia y precisión [18]. No obstante, dentro del Ecuador la automatización de estos sistemas no es frecuente, presentando sistemas semiautomáticos, donde la intervención humana puede introducir errores como configuraciones inadecuadas o tiempos de operación insuficientes, pueden generar riesgos operacionales, fuentes de contaminación y pérdidas económicas significativas [19]. Por ello, existe una tendencia creciente hacia la implementación de sistemas de automatización avanzada que minimicen la dependencia del factor humano y optimicen el control de variables críticas [20].

Los sistemas de limpieza CIP desempeñan una función importante en el sector industrial, ya se trate de alimentos y bebidas, productos para el cuidado personal o productos farmacéuticos [19]. El CIP es un método de limpieza de superficies internas, que emplea ciclos de lavado y enjuague en sistemas cerrados, como tuberías y tanques industriales. Este proceso no requiere desmontar los equipos, mejorando su eficiencia operativa [21], [22]. Además, el CIP se caracteriza por la recirculación de agentes desinfectantes, desincrustantes y desinfectantes, los son principalmente ácidos y/o alcalinos, garantizando una eliminación de residuos, contaminantes y microorganismos [12]. Donde el uso de enjuagues entre ciclos es esencial debido a que el producto restante en las tuberías debe ser vaciado antes de proceder con el siguiente ciclo, permitiendo recuperar el químico en uso y evitar desperdicios de material [23]. En consecuencia, esto convierte al CIP en

el sistema principal de limpieza de superficies internas dentro de la industria de bebidas.

En la industria cervecera, el CIP cumple un rol fundamental debido a la necesidad de mantener un estado de sanidad en los equipos. Luego de cada procedimiento, es necesario limpiar los tanques y elementos usados previo a continuar la producción en línea. Por lo tanto, se deben considerar y controlar determinados parámetros como: tipo de CIP, tipo de químico, concentración del fluido, tiempo de contacto y temperatura de los químicos en uso, además se consideran cruciales al tiempo de operación general, el caudal, la conductividad del fluido en circulación y los porcentajes de limpieza [24]. Además, crucial que este proceso sea independiente de la línea de producción, para garantizar su efectividad [10], [25].

En el presente trabajo aborda el diseño de un sistema de automatización aplicado al proceso de limpieza interna de la cervecería artesanal, integrando conocimientos de mecánica, electrónica, control y automatización. A partir del análisis exhaustivo del sistema CIP semiautomático actual, se ha realizado un rediseño mecatrónico con el propósito de optimizar la operación, reducir la dependencia del factor humano, minimizar el consumo de químicos y acortar los tiempos de limpieza. Además, se incorporaron las lógicas y estrategias de control necesarias para evaluar la eficacia del rediseño propuesto, garantizando así la eficiencia, calidad y cumplimiento de estándares internacionales en el proceso de limpieza interna.

Se presenta un análisis exhaustivo de las variables actuales del sistema para identificar oportunidades de optimización y mejoras durante la ejecución de la automatización. Estas se evaluaron y clasificaron según su nivel de impacto en la optimización del procedimiento, facilitando definir las limitantes actuales y futuras del sistema, así como sus fortalezas y posibles ajustes, con el objetivo de maximizar el aprovechamiento del equipo.

2. Materiales y Métodos

2.1. Análisis del Sistema CIP

En la cervecería artesanal se mantiene un proceso tradicional para la fabricación de la cerveza, complementado con técnicas más industrializadas que garantizan la calidad del producto. Los procedimientos realizados en la producción, especificados en la figura 1, incluyen los pasos clave del proceso y resaltan las áreas que se busca automatizar, destacando la necesidad de una automatización total para optimizar tiempos y recursos.

En la cervecería artesanal del caso de estudio, el sistema CIP cuenta con 14 tanques de fermentación, 4 tanques de almacenamiento, 25 canales de limpieza, 17 válvulas, 2 bombas hidráulicas, 1 pasteurizador, 2 sensores de nivel y 1 sensor de conductividad [26]. El sistema de CIP semiautomático tiene la finalidad de cubrir la gran mayoría de la limpieza de la planta de producción. Cabe destacar que el sistema CIP implementado requiere de un mínimo de 2 operarios y un promedio de entre 3 y 4 horas por tanque para completar la limpieza y desinfección. Sin embargo, la desinfección puede omitirse si el nivel de limpieza del tanque, comprobado mediante pruebas de laboratorio, es adecuado.

El sistema CIP se desarrolla a través de etapas definidas que incluyen: pre-enjuague, limpieza alcalina, enjuague, limpieza ácida, enjuague, desinfección y un enjuague final. Además, en la Tabla 1 se presenta la secuencia operativa llevada a cabo para completar un ciclo de limpieza, detallando las siguientes variables operativas: Tiempo de operación, concentración del químico, temperatura y personal involucrado. Estas variables permiten ajustar los parámetros del sistema, lo que garantiza eficiencia en el uso de recursos y reducción de costos. Para optimizar los tiempos de operación, considerando que el sistema ya se encuentra implementado y mantiene valores constantes para los parámetros mencionados, la mejora del rendimiento depende principalmente de la calibración y ajuste individual de cada variable.

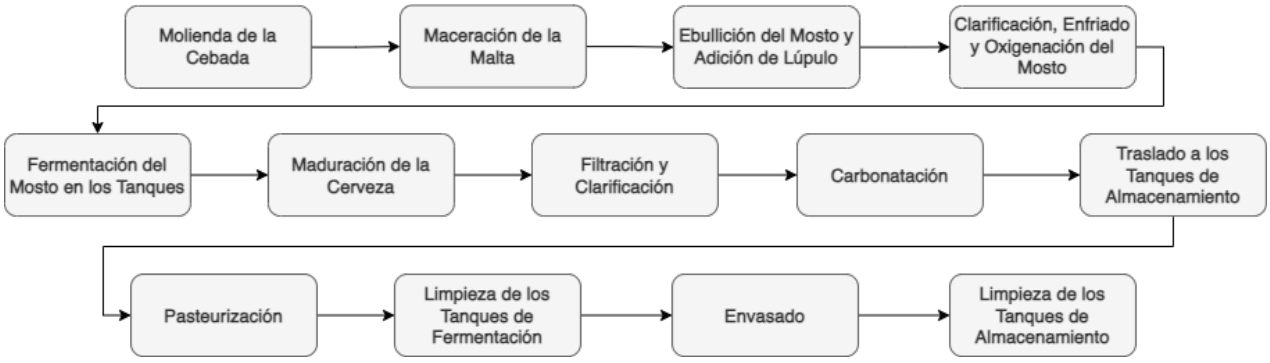


Figura 1. Diagrama de procesos de la fabricación de cerveza.

Tabla 1. Variables operativas actuales del sistema CIP semiautomático [26].

	Pre enjuague	Alcalino	Enjuague	Ácido	Enjuague	Sanitización
Material	Agua	Rimalkan	Agua	Rimacid	Agua	Oxomax
Conc. [mS/cm]	—	>65	—	>45	—	0,3
Tiempo [min]	5-7	70	20	40	20	20
Temp. [°C]	50-75	25	25	25	25	25

La concentración del químico debe ajustarse según los porcentajes de limpieza para evitar una sobre limpieza y garantizar el uso eficiente de los recursos [27]. Además, de calibrarse adecuadamente dicha concentración para cada químico, dependiendo del tipo de residuo y del área más difícil de sanitizar [21]. Tal como menciona Timperley (1988) [28], la concentración de la soda cáustica debe permanecer dentro de un rango máximo para reducir el tiempo de operación. Un aumento en la concentración superior al 2.5% w/w representa un incremento en el tiempo de limpieza, como se observa en la figura 2. Esto destaca la necesidad de monitorear cuidadosamente la concentración del detergente para garantizar la eficiencia del proceso. Esto es especialmente relevante, dado que la concentración actual es del 3.33% w/w, ya que se utilizan 20 kg de químico por cada 600 L de agua.

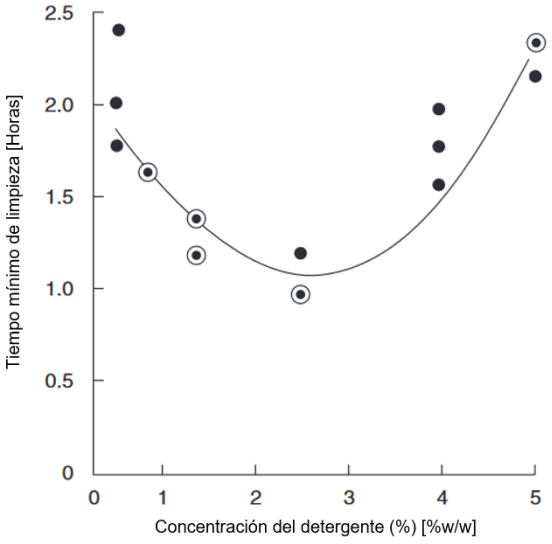


Figura 2. Efecto de la concentración de detergente en el tiempo de limpieza[28]

En este sentido, se realizó la implementación conjunta de un sensor de turbidez y de un sensor de conductividad, permitiendo un monitoreo continuo que optimiza el uso de químicos, reduce desperdicios y garantiza eficiencia operativa [29].

En la figura 3 se muestra cómo el nivel de turbidez disminuye progresivamente durante el enjuague inicial y después de la limpieza alcalina, resaltando la necesidad de ajustar el tiempo de operación en función de estos valores. Este monitoreo continuo permite optimizar los tiempos de operación, reducir el desperdicio de recursos y garantizar la eficiencia del proceso de limpieza.

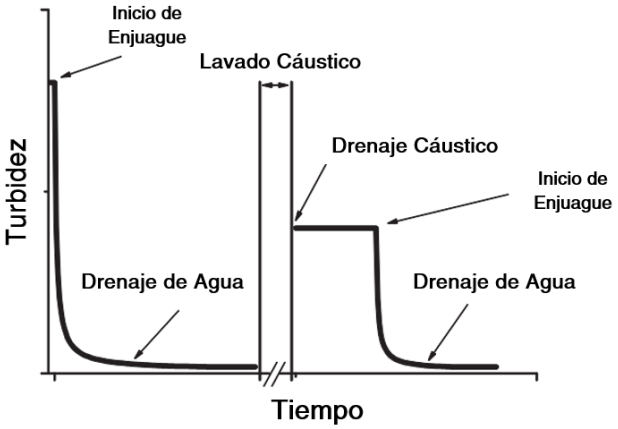


Figura 3. Relación entre la turbidez y el tiempo durante un proceso de limpieza CIP [30].

Con respecto a los valores de temperatura deben mantenerse en un rango de temperaturas altas, es decir, de 70°C-85°C para lavados alcalinos y de 60°C-70°C para lavados ácidos [31]. Los valores máximos permitidos para cada químico, según los datos recopilados en la empresa, se especifican en la tabla 2.

Tabla 2. Variables operativas previstas para la optimización del sistema CIP[26].

	Enjuague	Alcalino	Ácido
Material	Agua	Rimalkan	Rimacid
Tiempo [min]	10	20-35	15-20
Temp [°C]	50-75	70-85	60-70

2.2. Diseño del Sistema de Automatización del CIP

Para realizar la automatización, se partió del diseño actualmente implementado, realizando un levantamiento P&ID. En este análisis, se identificaron los siguientes componentes: 17 válvulas manuales (16 de bola y 1 de globo), 1 sensor de nivel, 1 sensor de

conductividad y una bomba hidráulica. Se propuso el reemplazo de 16 válvulas manuales por electroválvulas normalmente cerradas, y la incorporación de 8 sensores de nivel y 1 sensor de turbidez.

La figura 4 muestra el diseño conceptual de la automatización del sistema CIP, donde un PLC Siemens S7-1500 controla las entradas y salidas de sensores y válvulas para gestionar variables críticas como tiempos de operación, temperatura y turbidez. Los sensores proporcionan datos en tiempo real al PLC, que ajusta válvulas y bombas para optimizar las etapas del proceso, reduciendo tiempos operativos y desperdicios, logrando así un sistema eficiente y sostenible.

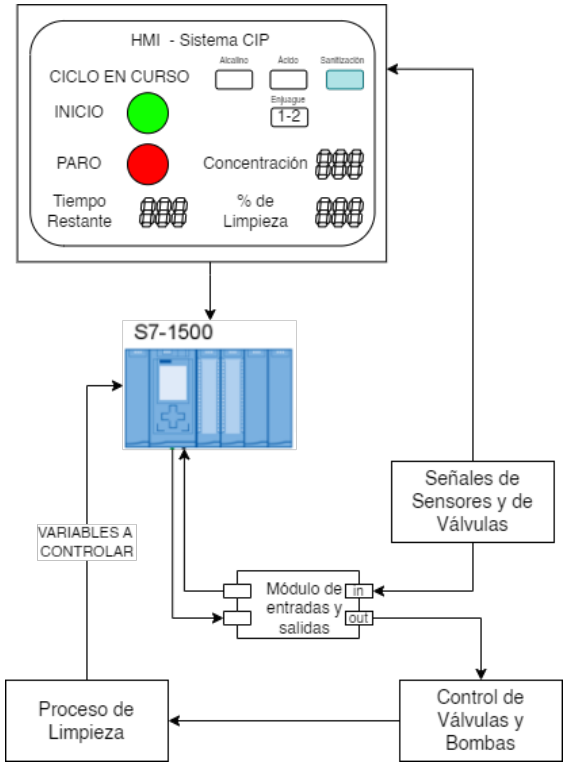


Figura 4. Diagrama de Bloques del funcionamiento de la automatización.

El diseño automatizado contempla un total de 35 señales de entrada, que incluyen 16 electroválvulas, 3 pulsantes, 4 switches, 10 sensores de nivel, 1 sensor de turbidez y 1 sensor de conductividad. También se programaron 18 señales de salida, correspondientes a 16 electroválvulas y 2 bombas, las cuales fueron configuradas para operar de forma secuencial según las etapas del proceso CIP, estas modificaciones están orientadas a mejorar la eficiencia y control del sistema automatizado. Para lograr esto, se realizó un diagrama P&ID adecuado a la automatización, el cual se evidencia en la figura 5 y se complementó con un programa en lenguaje ladder utilizando el software TIA Portal. Este diseño optimizado asegura un control preciso y eficiente del proceso CIP, garantizando ahorro de recursos y reducción de tiempos operativos.

2.3. Simulación del Diseño Propuesto

En esta sección se valida la viabilidad técnica y económica de la automatización propuesta para el sistema CIP de la cervecería artesanal, sin necesidad de una implementación física de la solución. Para optimizar la eficiencia del proceso, se han analizado diversos aspectos: modelado y simulación de las secuencias de limpieza, análisis de costos, comparaciones con normativas vigentes y el establecimiento de indicadores clave de desempeño. Además, se destaca el desarrollo de un programa de control en TIA Portal, orientado a reducir significativamente los tiempos de trabajo y aprovechar configuraciones de limpieza más eficientes, como la estrategia CIP con flujo de pulsos, descrita en la tabla 3 [32].

Actualmente, el funcionamiento del sistema se basa en el control manual de válvulas, lo que resulta en una gran pérdida de tiempo y un control deficiente de los recursos. Debido a estas deficiencias, la propuesta de automatización comprende un diseño mecatrónico enfocado en el control de electroválvulas mediante un controlador lógico programable (PLC), encargado de manejar estas válvulas a intervalos de tiempo precisos. Esta evaluación técnica asegura que la solución propuesta cumpla con los estándares de eficiencia, sostenibilidad y costos operativos, contribuyendo además a la reducción del impacto ambiental del proceso.

Tabla 3. Comparación de recursos sanitizantes entre CIP convencional y con funcionamiento a pulsos [32].

Método CIP	Sanitizante $[mg*L^{-1}]$	Tiempo [min]	Energía [kJ]
CIP convencional	100	15	176,3±11
CIP con flujo de pulsos	75	12	151,4±7

Para la implementación del sensor de turbidez, se consideró una posición externa en el diagrama CIP, cuya ubicación será variable según el tanque a limpiar. Este sensor se acoplará al final del tanque mediante una toma rápida, conectada a una tubería tipo 'T' donde se instalará el dispositivo. El sensor está diseñado para operar en rangos de temperatura de hasta 85°C y ofrece resistencia a la corrosión gracias a su construcción en acero inoxidable de grado alimenticio [33].

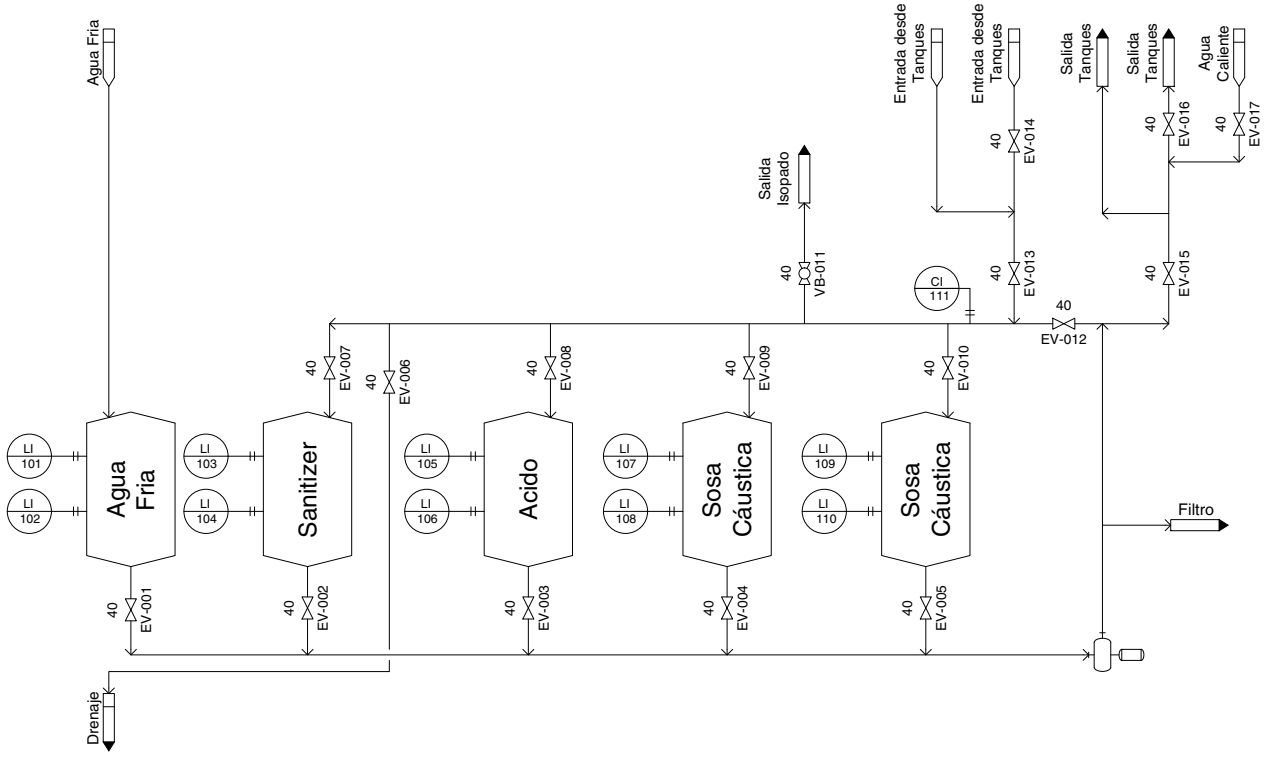


Figura 5. Diagrama P&ID del sistema CIP Autmatizado.

A su vez, la implementación de dicha automatización garantiza el cumplimiento normativo y los estándares de la industria. Se corroboró que las temperaturas de lavado (60–75°C), las concentraciones de soda cáustica (2.5%) y los agentes ácidos (0.5–1.5%) coinciden con los lineamientos establecidos por organismos regulatorios y estudios previos [34, 28]. Además, la incorporación de sensores como el de turbidez y el monitoreo del sensor de conductividad permiten controlar la dosificación de químicos a través del PLC, asegurando la rastreabilidad de parámetros críticos y facilitando el cumplimiento de normativas como BPM, ISO 22000 e ISO 22002-1.

El diagrama P&ID, junto con la configuración en TIA Portal y la documentación de componentes, forma una base sólida para eventuales auditorías y certificaciones de calidad. Esto no solo garantiza el cumplimiento normativo, sino que también promueve la mejora continua en la eficiencia y la calidad del proceso. Además, en la figura 6 se evidencia el flujograma que se sigue para llevar a cabo el proceso de limpieza CIP.

La tabla 4 presenta los valores temporales obtenidos para cada etapa del proceso CIP automatizado, destacando la importancia del control de las variables críticas con un enfoque de optimización. En ella, se observa una diferencia significativa en los tiempos de operación, lo que evidencia el impacto positivo de la automatización en la eficiencia del sistema y la reducción de costos operativos.

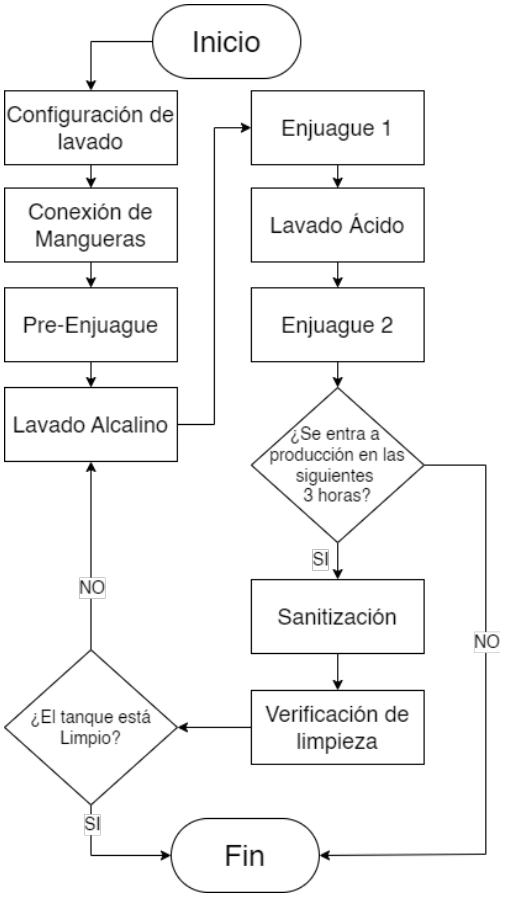


Figura 6. Flujograma de procedimiento del sistema CIP.

Tabla 4. Valores temporales de las etapas de un sistema CIP automatizado [34].

Operación	Tiempo recomendado [min]	Tiempo implementado [min]
Pre-enjuague	5-10	10
Alcalino	20-35	32
Enjuague	5-10	10
Ácido	15-20	20
Enjuague	10-15	15
Sanitizante	5-15	15

3. Resultados y Discusión

Al comparar el sistema CIP semiautomático actual con la propuesta de automatización, considerando parámetros de eficiencia, consumo de recursos y control de variables críticas, se logró obtener un valor cuantificable con respecto a las mejoras alcanzadas, se emplearon datos operativos anteriores y posteriores a la simulación del diseño propuesto, enfocándose en la reducción del tiempo de limpieza, la optimización en el uso de químicos y la disminución de la intervención humana en el proceso.

Los resultados iniciales evidenciaron que el sistema CIP semiautomático mostraba un promedio de 270 minutos (4.5 horas) para completar un ciclo de limpieza por tanque, consumiendo hasta 20 kg de agentes químicos por cada 600 L de agua. De igual manera, se requirieron al menos 2 operarios para supervisar y accionar manualmente las válvulas en cada etapa, lo que derivó en una alta variabilidad de los parámetros de limpieza (temperatura, caudal, tiempos de enjuague). Esta variabilidad incrementa tanto el riesgo de sub-limpieza (cuando la concentración de químicos o el tiempo de contacto resultan insuficientes) como el sobredimensionamiento de recursos (al aplicar en exceso agentes de limpieza o prolongar la etapa de enjuague).

Tabla 5. Mejora Estimada para Parámetros Operativos.

Variable	Valor Actual	Mejora implementada	Mejora porcentual (%)
Tmp.[min]	270	103	61.85%
Conc. 1 [w/w]	20	15	25%
Conc. 2 [w/w]	20	9	55%
Operarios	2	1	50%

La propuesta de automatización incluyó un CIP con un ajuste de temperatura de los químicos en uso, flujo de pulsos, electroválvulas para el control de fluidos, y sensores de turbidez y conductividad que reportan en tiempo real a un PLC programado en TIA Portal. Esta arquitectura mecatrónica permitió definir secuencias temporizadas con una dosificación más precisa de químicos, modulando la temperatura en cada etapa. Tal como se expone en la Tabla 5, la combinación de ajustes en temperatura (70–85 °C para la etapa alcalina y 60–70 °C para la etapa ácida), sumada al monitoreo continuo de turbidez, posibilitó la reducción del tiempo total de limpieza en un 61.85%.

Por otra parte, el consumo de agentes químicos se optimizó al reducir su concentración de 20 kg/600 L a 15 kg/600 L, lo cual representa un ahorro estimado del 25%. Este decremento se logró gracias al monitoreo de la conductividad, que evitó el uso excesivo de soda cáustica y de soluciones ácidas en periodos en los que el sistema ya presentaba niveles de limpieza adecuados. De igual forma, la modulación de los caudales de enjuague, basada en el perfil de turbidez, favoreció la remoción efectiva de residuos sin necesidad de enjuagues prolongados.

Otro factor relevante en la optimización fue la disminución de la mano de obra directa. Con la incorporación de electroválvulas y lógica de control secuencial, solo un operario se encarga de la supervisión general, reduciendo la intervención continua que antes se requería para ajustar válvulas manuales y vigilar los parámetros en cada etapa. Esto no solo conlleva un ahorro en costos laborales, sino también un aumento de la seguridad, al disminuir la exposición del personal a sustancias potencialmente peligrosas y a temperaturas elevadas.

El análisis económico preliminar, aunque no presentado de forma exhaustiva, sugiere que la inversión en sensores adicionales, componentes de automatización y software puede recuperarse en un plazo relativamente corto —entre dos y tres años— gracias al ahorro en químicos, agua y horas de mano de obra. Además, la estandarización de los parámetros de limpieza y la trazabilidad que ofrece el PLC facilitan el cumplimiento de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM), así como de las normas ISO 22000 e ISO 22002-1, fortaleciendo la competitividad de la cervecería ante regulaciones más estrictas o futuros planes de expansión.

En términos de discusión, cabe destacar que si bien los resultados se basan en simulaciones y datos de referencia, constituyen un punto de partida sólido para planificar la implementación real del sistema automatizado. Estudios similares en la industria de bebidas han reportado reducciones cercanas al 30–40% en el consumo de agua y de agentes químicos [13], lo cual respalda la factibilidad y pertinencia del diseño aquí propuesto. Sería deseable, en trabajos futuros, ampliar los ensayos experimentales y realizar un muestreo microbiológico más completo para corroborar la eficacia higiénica del CIP automatizado en escenarios de alta demanda o con diferentes formulaciones de

cerveza.

Además, la evaluación de indicadores de sostenibilidad (por ejemplo, huella hídrica, emisiones de CO2 asociadas a la producción y uso de químicos) podría reforzar el argumento a favor de la automatización en industrias cerveceras interesadas en la producción más limpia y la responsabilidad ambiental. Por último, integrar sistemas de machine learning o control difuso podría afinar aún más la dosificación de químicos y los tiempos de contacto, maximizando la eficiencia a través de la adaptación dinámica a las condiciones reales de operación.

4. Conclusiones

La presente investigación constata que la automatización de un proceso de limpieza interna (CIP) en una cervecería artesanal aporta beneficios tangibles en términos de eficiencia operativa y reducción de costos. El diseño mecatrónico, fundamentado en la incorporación de sensores de turbidez y conductividad, el control de válvulas actuadas y la programación de un PLC bajo TIA Portal, demostró una considerable mejora en los tiempos de limpieza —reducciones superiores al 60%— y en el consumo de agentes químicos, estimando un ahorro de hasta el 25%.

Además de la optimización de recursos, se observó una mayor confiabilidad al disminuir la variabilidad asociada al factor humano y posibilitar la trazabilidad de parámetros críticos en cada etapa del proceso. Este avance fortalece la capacidad de respuesta de la cervecería ante eventuales auditorías y normativas más exigentes, al tiempo que promueve un entorno de trabajo seguro y alineado con las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) y estándares internacionales como ISO 22000 e ISO 22002-1.

Si bien los datos expuestos se basan en simulaciones y estimaciones de campo, las evidencias obtenidas constituyen un sustento importante para la implementación futura del diseño propuesto. Como trabajo posterior, se sugiere la ejecución de un plan piloto que permita validar el rendimiento real del CIP automatizado, considerando fluctuaciones estacionales en la producción, variaciones en las formulaciones de la cerveza y posibles limitaciones de infraestructura. En un escenario de adopción exitosa, la automatización del proceso CIP no solo reforzaría la calidad e inocuidad del producto, sino que también incrementaría la competitividad de la cervecería al reducir el impacto medioambiental y los costos operativos.

Referencias

[1] ISO 22000. *Sistemas de gestión de la inocuidad de los alimentos — Requisitos para cualquier organización en la cadena alimentaria*. Normativa. 2018.

[2] Organización Mundial de la Salud (OMS) Codex Alimentarius Commission Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). *Principios Generales De Higiene De Los Alimentos*. 2011.

[3] Codex Alimentarius Commission, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), and Organización Mundial de la Salud (OMS). *Comisión del Codex Alimentarius Manual de Procedimiento*. 28th ed. FAO; WHO; 2023. ISBN: 978-92-5-138176-2. DOI: 10.4060/cc5042es.

[4] G. Sansebastiano, R. Zoni, and L. Bigliardi. "Cleaning and Disinfection Procedures in the Food Industry General Aspects and Practical Applications". In: *Food safety: a practical and case study approach*. ISEKI-Food series v. 1. New York: Springer, 2007, pp. 253–280. ISBN: 978-0-387-33957-3. DOI: https://doi.org/10.1007/978-0-387-33957-3_13.

[5] M. Latorre et al. *Contaminantes microbianos en cervezas artesanales embotelladas de la Patagonia andina argentina*. 2022. DOI: 10.1016/j.ram.2022.05.006.

[6] M. Rodríguez-Saavedra, D. González de Llano, and M. V. Moreno-Arribas. *Beer spoilage lactic acid bacteria from craft brewery microbiota: Microbiological quality and food safety*. 2020. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109762.

[7] Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria. *Normativa Técnica Sanitaria Sobre Practicas*. 2015.

[8] Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria. *Normativa Técnica Sanitaria para Productos Higiénicos de uso Industrial*. 2016.

[9] Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria. *Notificación Sanitaria Y Control Productos Higiénicos Uso Industrial*. 2018.

[10] ISO 22002-1. *Programas de prerrequisitos sobre inocuidad en los alimentos - Elaboración de Alimentos*. 2009.

[11] A. Simeone et al. *Intelligent Industrial Cleaning: A Multi-Sensor Approach Utilising Machine Learning-Based Regression*. 2020. DOI: 10.3390/s20133642.

[12] A. Y. Tamime. *Cleaning-in-place: dairy, food and beverage operations*. 3 ed. Society of dairy technology series. Blackwell Publishing, 2008. ISBN: 978-1-4051-5503-8.

[13] P. J. Fryer and K. Asteriadou. *A prototype cleaning map: A classification of industrial cleaning processes*. 2009. DOI: 10.1016/j.tifs.2009.03.005.

[14] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). *Introduction to Hazard Analysis Critical Control Point (HACCP)*. 2023. DOI: https://doi.org/10.4060/cc6246en.

[15] N. G. Marriott, M. W. Schilling, and R. B. Gravani. *Principles of Food Sanitation*. Food Science Text Series. Cham: Springer International Publishing, 2018. ISBN: 978-3-319-67164-2 978-3-319-67166-6. DOI: 10.1007/978-3-319-67166-6.

[16] G. Wildbrett. *Limpieza y desinfección en la industria alimentaria*. 2000. ISBN: 978-84-200-0913-1.

[17] K. Lorenzen. "Improving cleaning-in-place (CIP)". In: *Handbook of Hygiene Control in the Food Industry*. Ed. by H. L. M. Lelieveld, M. A. Mostert, and J. Holah. 1st. Elsevier, 2005, pp. 425–444. ISBN: 978-1-84569-053-3. DOI: 10.1533/9781845690533.3.425.

[18] D. Loeffler. "Modern brewery sanitation". In: *Brewing*. Ed. by C. W. Bamforth. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Woodhead Publishing, 2006, pp. 308–334. ISBN: 978-1-84569-003-8. DOI: 10.1533/9781845691738.308.

[19] García Restrepo A. M. and Uribe Suárez M. C. *Limpieza y desinfección de superficies*. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), 2005. ISBN: 978-958-33-7851-5. URL: https://repositorio.sena.edu.co/handle/11404/5106.

[20] H. Post. *Cómo la automatización ayuda a reducir los errores humanos*. 2023. URL: https://trdsf.com/es/blogs/news/como-la-automatizacion-ayuda-a-reducir-los-errores-humanos.

[21] F. Moerman, P. Rizoulières, and F. A. Majoor. "Cleaning in place (CIP) in food processing". In: *Hygiene in Food Processing (Second Edition)*. Ed. by H. L. M. Lelieveld, J. T. Holah, and D. Napper. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Woodhead Publishing, 2014, pp. 305–383. ISBN: 978-0-85709-429-2. DOI: 10.1533/9780857098634.3.305.

[22] R. Pagan, N. Price, and P. Prasad. "Managing the environmental impact of the dairy industry: the business case for sustainability". In: *Improving the Safety and Quality of Milk*. Elsevier, 2010, pp. 252–280. ISBN: 978-1-84569-806-5. DOI: 10.1533/9781845699437.2.252.

[23] K. R. Goode et al. *Fouling and Cleaning Studies in the Food and Beverage Industry Classified by Cleaning Type*. 2013. DOI: 10.1111/1541-4337.12000.

[24] M. Walton. "Plant and Equipment | In-Place Cleaning". In: *Encyclopedia of Dairy Sciences (Second Edition)*. Academic Press, 2011, pp. 283–285. ISBN: 978-0-12-374407-4. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374407-4.00416-7..

[25] Endress+Hauser Group Services AG. *Limpieza CIP en la industria alimentaria - Endress+Hauser*. URL: https://www.es.endress.com/es/focus-topics/dominio-rendimiento-calidad-cumplimiento/produccion-eficiente-industria-alimentos-bebidas/limpieza-cip-industria-alimentaria.

[26] Luis Reina. *Proceso de limpieza CIP de la Cervecería Artesanal La Paz*. 2024.

[27] T. H. A. Berg et al. *Inline UV-Vis spectroscopy to monitor and optimize cleaning-in-place (CIP) of whey filtration plants*. 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.08.014.

[28] D A Timperley and C N M Smeulders. *Cleaning of dairy HTST plate heat exchangers: optimization of the single-stage procedure*. 1988. DOI: 10.1111/j.1471-0307.1988.tb00572.x.

[29] A. J. Van Asselt, G. Van Houwelingen, and M. C. Te Giffel. *Monitoring System for Improving Cleaning Efficiency of Cleaning-in-Place Processes in Dairy Environments*. 2002. DOI: 10.1205/096030802321154772.

[30] L. Pettigrew et al. *Optimisation of water usage in a brewery clean-in-place system using reference nets*. 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.10.072.

[31] F.A Majoor. "Handbook of hygiene control in the food industry". In: *Hygiene in Food Processing*. Ed. by H. L. M. Lelieveld et al. Elsevier, 2003, pp. 197–219. ISBN: 978-1-85573-466-1.

[32] L. D. Silva et al. *Optimization of clean-in-place (CIP) procedure of pipelines contaminated with Bacillus cereus by applying pulsed flow*. 2023. DOI: 10.1016/j.foodcont.2022.109565.

[33] Endress+Hauser Group Services AG. *Sensor de turbidez Turbimax CUS52D*. URL: https://www.es.endress.com/es/instrumentacion-campo/analisis-agua-liquidos-industria/sensor-turbidez-agua-CUS52D.

[34] S. Davies et al. "Hygienic design and Cleaning-In-Place (CIP) systems in breweries". In: *Brewing Microbiology*. Ed. by Annie E. Hill. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Oxford: Woodhead Publishing, 2015, pp. 221–239. ISBN: 978-1-78242-331-7. DOI: 10.1016/B978-1-78242-331-7.00010-1.