VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Diseño conceptual de una extrusora de bioplásticos a base de almidón de papa y yuca para aplicaciones agrícolas

Conceptual design of a starch-based potato and cassava bioplastic extruder for agricultural applications

Murrieta-Ibarra, A.A.[1], González-García, I.[1]*, Delgadillo-Ruíz, E.[2], Arias-Hernández, L.A[2], Caudilla-Ortega, N.A.[1]
[1] Instituto Tecnológico Superior de Guanajuato, Ingeniería Mecatrónica.
[2] Universidad de Guanajuato.
Itzel.gg@guanajuato.tecnm.mx

Resumen

El presente artículo describe una propuesta para el desarrollo de una máquina extrusora orientada a la fabricación de bioplásticos a base de almidón de papa y yuca, con aplicación potencial en acolchado agrícola. La propuesta surge ante la necesidad de disminuir el uso de plásticos convencionales en actividades agrícolas y aprovechar materias primas renovables que puedan transformarse mediante procesos controlados de extrusión. A partir del análisis de patentes relacionadas con materiales basados en carbohidratos, modificación de almidón y equipos de extrusión, se plantea una arquitectura integrada que considera preparación del material, control térmico del cilindro, regulación de velocidad del tornillo y cambio automático de boquilla. El sistema se complementa con una interfaz HMI desarrollada en LabVIEW 2018, pensada para monitorear temperatura, velocidad, estado de boquilla, alarmas y registro de datos del proceso. El enfoque del proyecto consiste en adaptar el proceso de extrusión a las necesidades de un biopolímero agrícola elaborado con papa y yuca, integrando control, seguridad y modularidad. Como resultado, se presenta una base técnica para el diseño de un prototipo con potencial de evolución hacia un desarrollo tecnológico protegible y publicable.

Palabras clave: extrusión; bioplástico; almidón; papa; yuca; LabVIEW; boquilla automática.

Introducción

El uso de plásticos convencionales ha permitido fabricar productos resistentes, ligeros y de bajo costo; sin embargo, también ha generado una problemática ambiental debido a la acumulación de residuos que tardan largos periodos en degradarse. En el sector agrícola, este problema se observa en el uso de plásticos para el acolchado de suelos, invernaderos, macrotúneles, ensilado y mallas de sombreo. Estos materiales cumplen su función durante el ciclo de cultivo; sin embargo, al finalizar su vida útil pueden permanecer en el suelo por varios años o requerir procesos de recolección adecuados. Cuando no se retiran correctamente, se acumulan en el terreno, lo que reduce la fertilidad, afecta a los organismos benéficos del suelo y disminuye la capacidad de infiltración del agua, contribuyendo al deterioro de la calidad del agua. Por esta razón, el desarrollo de materiales biodegradables se ha convertido en una línea de investigación importante para la ingeniería aplicada.

Entre las opciones más estudiadas se encuentran los bioplásticos basados en almidón. Este material resulta atractivo porque proviene de fuentes renovables, tiene bajo costo relativo y puede obtenerse de materias primas agrícolas como la papa y la yuca. No obstante, el almidón por sí solo presenta limitaciones importantes: alta afinidad con el agua, baja estabilidad térmica y dificultad para procesarse como un termoplástico convencional. La patente CN112063022A señala que los plásticos basados en almidón requieren modificación y plastificación para superar problemas de procesabilidad, compatibilidad y resistencia al agua (Chen *et al*., 2020).

La extrusión es uno de los procesos más utilizados para transformar materiales poliméricos. De manera general, consiste en alimentar una mezcla dentro de un cilindro, donde un tornillo sinfín transporta, comprime, mezcla y calienta el material hasta llevarlo a una condición adecuada para salir por una boquilla. En bioplásticos de almidón, la extrusión debe controlarse con mayor cuidado que en plásticos convencionales,

ya que la temperatura, la humedad, la velocidad del tornillo y el tiempo de residencia pueden modificar las propiedades finales del material.

Con base en lo anterior, este artículo propone el diseño conceptual de una extrusora de bioplásticos a base de almidón de papa y yuca para aplicaciones agrícolas. La propuesta considera no solamente la fabricación del bioplástico, sino también el desarrollo de un sistema de control que permita monitorear las variables principales de la máquina y ejecutar una rutina segura de cambio automático de boquilla. De esta forma, el proyecto integra el área de materiales con diseño mecánico, electrónica, automatización y software de monitoreo.

Antecedentes tecnológicos y revisión de patentes

En la revisión de documentos se identificaron diferentes enfoques relacionados con bioplásticos, modificación de almidón y sistemas de extrusión. La patente US 11,111,363 B2 describe artículos fabricados con polímeros sostenibles y materiales poliméricos basados en carbohidratos, donde se busca incrementar la resistencia y la biodegradabilidad del producto final. Este documento resulta útil porque muestra que los materiales basados en carbohidratos pueden emplearse en artículos como películas, láminas, bolsas y recipientes, además de ser procesados por métodos como extrusión o moldeo (LaPray *et al*., 2021).

Por otra parte, la patente CN112063022A propone un método para obtener un lote maestro degradable resistente al agua a base de almidón. El proceso contempla la modificación del almidón, la obtención de almidón termoplástico y posteriormente la extrusión en doble tornillo, con temperaturas por zonas y control de velocidad de alimentación (Chen *et al*., 2020). Esta referencia es especialmente cercana al proyecto porque incluye fuentes como almidón de papa y yuca, además de abordar el problema de resistencia al agua.

Otro documento relevante es la patente CN109912889A, enfocada en mejorar la estabilidad térmica de plásticos biodegradables de almidón mediante una modificación hidrofóbica y el uso de una red de dióxido de silicio. Este antecedente confirma que uno de los retos principales en los plásticos de almidón es conservar estabilidad térmica y resistencia a la humedad durante el procesamiento (Chen & Zeng, 2019).

En cuanto a la máquina, la patente US 11,198,242 B2 presenta un extrusor donde el motor del tornillo puede ajustar sus RPM de acuerdo con la temperatura del material que pasa por el cilindro (Conrad, 2021). Este criterio es importante para el proyecto, ya que el biopolímero de papa y yuca puede degradarse o perder uniformidad si la temperatura y la velocidad no se controlan de manera coordinada.

Finalmente, la patente US 11,230,063 B2 describe un sistema de extrusión multiboquilla donde un controlador opera actuadores y válvulas para modificar la salida del material (Mantell, 2022). Aunque su aplicación principal se orienta a manufactura aditiva, el concepto de controlar la selección de boquillas es útil como antecedente para proponer un cambio automático de boquilla en una extrusora agrícola.

Propuesta tecnológica

La propuesta desarrollada en este trabajo consiste en una extrusora modular para procesar una mezcla biopolimérica elaborada a partir de almidón de papa y yuca. El objetivo del sistema es obtener un bioplástico que pueda utilizarse como película, recubrimiento o elemento de protección para cultivos. A diferencia de una extrusora genérica, el diseño se plantea específicamente para un material sensible a la humedad y a la temperatura, por lo que el software de monitoreo se vuelve una parte fundamental del funcionamiento.

El sistema se organiza en cinco módulos principales: preparación del material, alimentación, extrusión, cambio de boquilla y control HMI. El módulo de preparación considera la mezcla del almidón con aditivos plastificantes o compatibilizantes. El módulo de alimentación introduce el material al cilindro. El módulo de extrusión controla el calentamiento y el giro del tornillo. El módulo de boquilla permite seleccionar la salida adecuada según el tipo de producto. Finalmente, el módulo HMI permite al operador ingresar parámetros, visualizar variables y responder ante alarmas.

La diferencia principal de la propuesta se encuentra en la integración de tres elementos en un solo sistema: control de temperatura, control de velocidad y cambio automático de boquilla. Esta integración permite ajustar el proceso de acuerdo con el comportamiento del material y con la aplicación deseada. Por ejemplo, una boquilla puede utilizarse para película delgada, otra para filamento y otra para recubrimiento agrícola. Esta modularidad facilita realizar pruebas sin rediseñar toda la máquina.

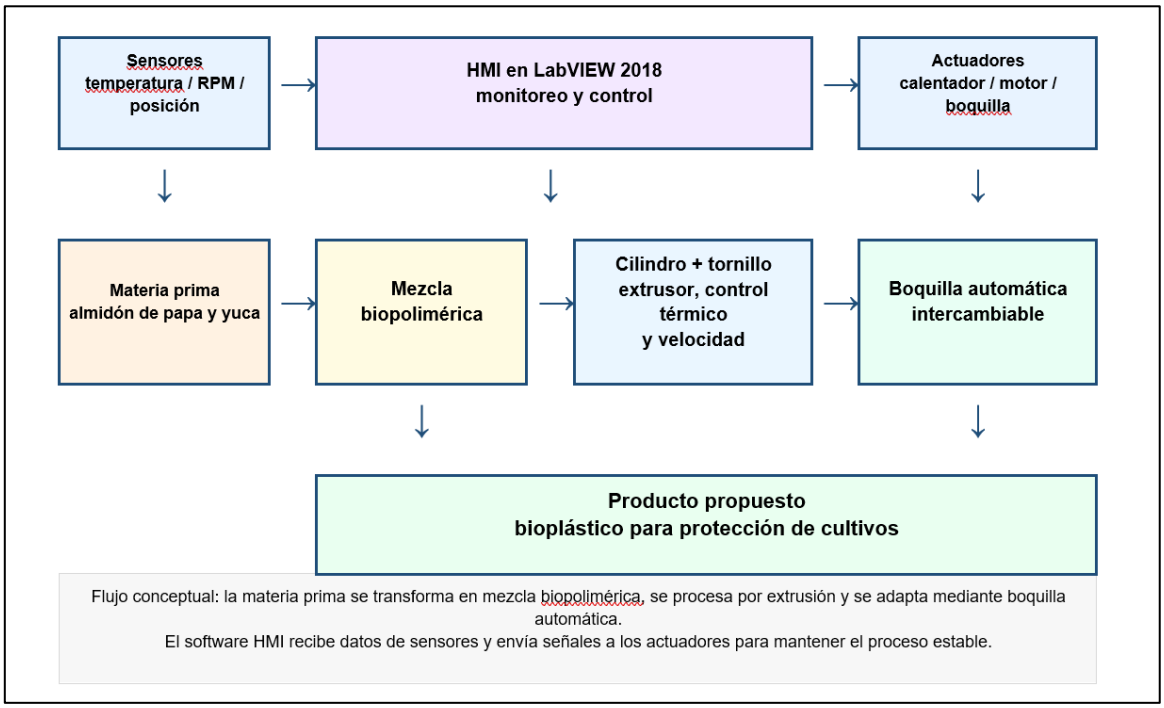


Figura 1. Arquitectura conceptual del sistema propuesto de extrusión y control

Metodología de diseño propuesta

La metodología se plantea en cuatro etapas. En la primera etapa se realiza la revisión de patentes y artículos relacionados con bioplásticos basados en almidón, sistemas de extrusión y control de variables de proceso. Esta revisión permite identificar qué tecnologías existen y qué oportunidades se pueden adaptar al proyecto sin copiar directamente una solución.

En la segunda etapa se define el material de trabajo. Para este proyecto se considera una mezcla basada en almidón de papa y yuca, debido a que ambas fuentes son renovables y presentan potencial para transformarse en bioplástico. La formulación final deberá evaluarse experimentalmente, pero desde el diseño del equipo se contempla que el material puede requerir control cuidadoso de temperatura, humedad y velocidad de procesamiento.

La tercera etapa corresponde al diseño de la extrusora. En esta fase se definen los componentes principales: tolva, cilindro de calentamiento, tornillo sinfín, resistencias o bandas calefactoras, motor, transmisión, sensores de temperatura, sensor de velocidad y mecanismo de boquilla. El criterio de diseño busca que la máquina sea compacta, segura, desmontable y útil para pruebas académicas.

La cuarta etapa corresponde al desarrollo del software. Se propone una interfaz HMI en LabVIEW 2018 capaz de controlar y monitorear temperatura, RPM del tornillo, estado de boquilla, alarmas y registro de datos. El programa se organiza mediante una lógica tipo máquina de estados: inicio, verificación, precalentamiento, extrusión, cambio de boquilla, alarma y paro seguro.

Tabla 1. Variables principales consideradas para el control de la extrusora.

Variable	Función en el sistema	Elemento asociado	Acción del software
Temperatura del cilindro	Evitar degradación y asegurar fluidez del biopolímero	Sensor térmico y resistencias	Comparar con setpoint y activar calentamiento o alarma
Velocidad del tornillo	Regular transporte y mezcla del material	Motor, driver o variador	Ajustar RPM según la condición de operación

Variable	Función en el sistema	Elemento asociado	Acción del software
Boquilla seleccionada	Definir geometría de salida del material	Mecanismo automático de boquilla	Ejecutar rutina de cambio seguro y validar posición
Alarmas	Proteger al operador y a la máquina	Sensores y botones de seguridad	Detener motor, apagar calentamiento y registrar evento

Resultados

Interfaz de monitoreo y control en LabVIEW

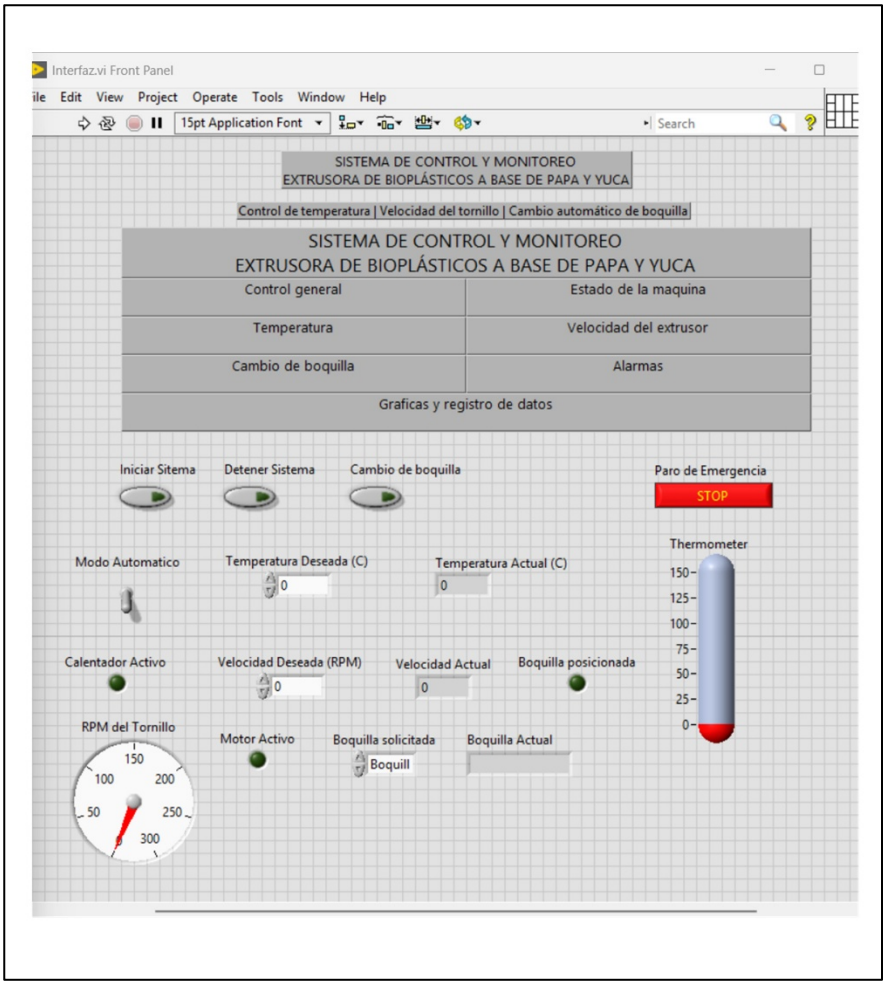


Figura 2. Primera versión de la interfaz hombre-máquina (HMI) desarrollada en LabVIEW para el sistema de control y monitoreo de la extrusora de bioplásticos.

Como resultado del desarrollo, se obtuvo una primera versión de la interfaz HMI en LabVIEW 2018 para la operación y supervisión de la extrusora. La pantalla principal se estructuró en módulos correspondientes al control general, temperatura, velocidad del tornillo, cambio de boquilla, alarmas, gráficas y registro de eventos, permitiendo una distribución organizada de las funciones principales del sistema.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

La lógica de control se diseñó mediante una máquina de estados conformada por las etapas de inicio, espera, verificación, precalentamiento, extrusión, cambio de boquilla y alarma. En cada estado se definieron las acciones necesarias para la inicialización del sistema, validación de sensores y actuadores, control del precalentamiento, monitoreo de las variables de proceso y atención de condiciones de falla, estableciendo una secuencia de operación segura y estructurada.

Como se observa en la Figura 2, en la primera etapa del desarrollo se diseñó un prototipo de la interfaz hombre-máquina (HMI) en LabVIEW 2018 para definir la distribución de los principales módulos de control y monitoreo de la extrusora. La interfaz integra controles para el arranque y paro del sistema, ajuste y visualización de la temperatura, velocidad del tornillo, cambio automático de boquilla, indicadores de estado y una sección destinada al registro de datos. Este primer diseño permitió establecer la organización funcional de la pantalla y definir la interacción entre el operador y el sistema antes de implementar la lógica completa de control.

A partir del prototipo inicial se desarrolló el diseño conceptual de la interfaz HMI definitiva, en la que se integran los módulos funcionales definidos durante el análisis del sistema. La propuesta contempla el control de temperatura, velocidad del tornillo, selección y confirmación de boquilla, paro de emergencia, gestión de alarmas, monitoreo mediante gráficas en tiempo real y registro de eventos. Esta arquitectura proporciona una visión integral del proceso y establece la base para la implementación completa del sistema de supervisión y control.

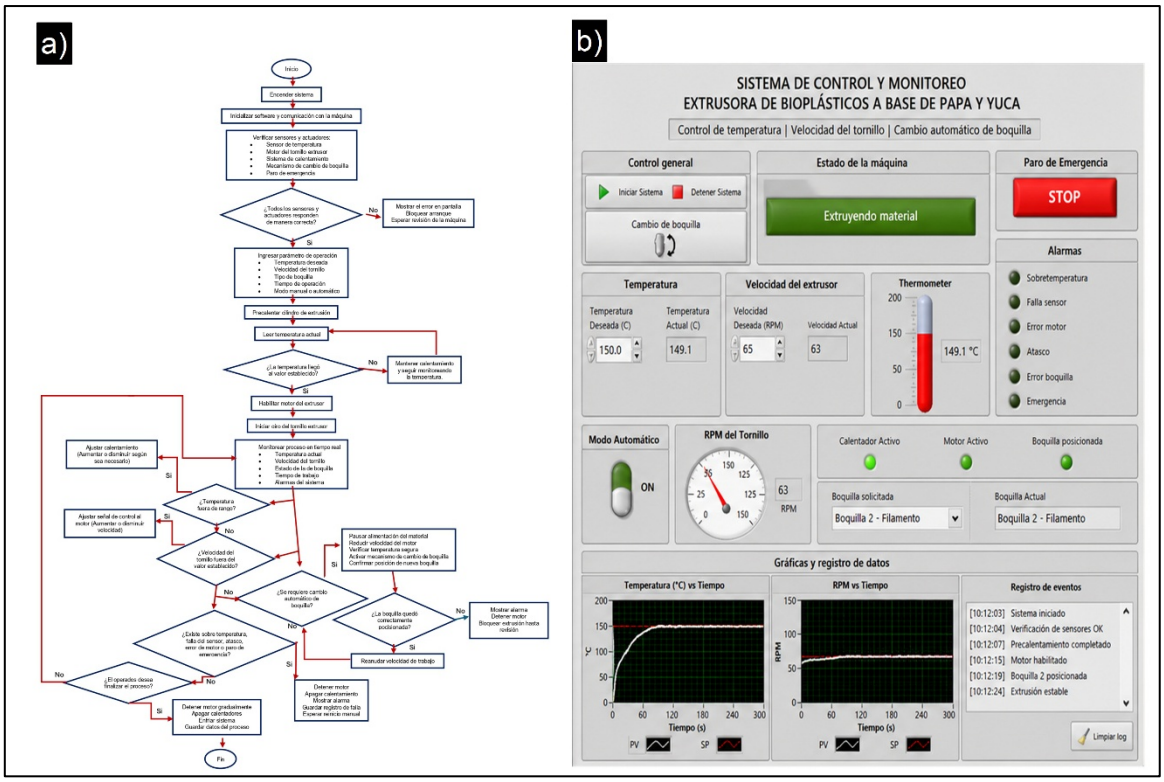


*Figura 3. Arquitectura funcional propuesta del software de control de la extrusora: **(a)** secuencia de operación mediante diagrama de flujo y **(b)** interfaz HMI para el monitoreo de variables de proceso, control de actuadores, gestión de alarmas y registro de eventos.*

La Figura 3 presenta la propuesta de implementación del sistema de control y monitoreo de la extrusora. En la Figura 3(a) se muestra el diagrama de flujo que describe la secuencia de operación del software, desde la inicialización del sistema, la verificación de sensores y actuadores, el precalentamiento del cilindro, el proceso de extrusión, el cambio automático de boquilla y la gestión de alarmas. Este diagrama establece la lógica de funcionamiento que servirá como base para la implementación del software de control.

La Figura 3(b) presenta el diseño de la interfaz hombre-máquina (HMI) desarrollada en LabVIEW, en la cual se integran los elementos necesarios para la supervisión y operación de la extrusora. La interfaz incorpora

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

módulos para el control de temperatura, velocidad del tornillo, selección y confirmación de la boquilla, estado de la máquina, paro de emergencia, monitoreo mediante gráficas en tiempo real y registro de eventos, proporcionando una visualización clara de las variables críticas del proceso.

La integración del diagrama de flujo y la HMI permite establecer una correspondencia entre la lógica de operación del sistema y su representación gráfica, definiendo una arquitectura de control que facilitara la implementación, validación y operación del prototipo físico.

Discusión y potencial de innovación

El proyecto presenta un potencial de innovación al integrar el desarrollo del material, la extrusora y el sistema de control en una misma propuesta tecnológica. A diferencia de diversos estudios que abordan la formulación de bioplásticos o el diseño de equipos de procesamiento de manera independiente, este trabajo plantea una estrategia integral en la que las propiedades del material y las condiciones de operación del equipo se consideran de forma conjunta. Esta integración resulta relevante debido a que el comportamiento del almidón de papa y yuca durante la extrusión depende directamente del control de variables como la temperatura, la velocidad del tornillo y la geometría de la boquilla.

Un aspecto diferenciador de la propuesta es la incorporación de un sistema de cambio automático de boquilla controlado por software. Mientras que en muchas extrusoras el cambio de boquilla se realiza de forma manual, requiriendo la detención del proceso y la intervención del operador, en este proyecto se plantea una secuencia automatizada que disminuye la velocidad del tornillo, verifica condiciones seguras de temperatura y confirma la correcta posición de la nueva boquilla antes de reanudar la extrusión. Esta estrategia podría mejorar la seguridad operativa, reducir los tiempos de ajuste y facilitar la evaluación de diferentes geometrías de extrusión durante el desarrollo de bioplásticos agrícolas.

No obstante, las ventajas planteadas deberán validarse experimentalmente mediante pruebas con el prototipo físico. Será necesario evaluar la estabilidad del control de temperatura y velocidad, la confiabilidad del mecanismo de cambio de boquilla y la calidad del bioplástico obtenido bajo distintas condiciones de operación.

Desde la perspectiva de propiedad intelectual, el potencial de protección se concentra en la integración del diseño mecánico del sistema de cambio de boquillas con la estrategia de control implementada en el software y su aplicación específica al procesamiento de bioplásticos elaborados a partir de almidón de papa y yuca. En este sentido, la revisión del estado del arte y de patentes realizada en este trabajo constituye un punto de partida para identificar oportunidades de diferenciación tecnológica; sin embargo, será necesario realizar una búsqueda especializada y un análisis de patentabilidad antes de iniciar un proceso formal de protección.

Conclusiones

En este trabajo se presentó una propuesta conceptual para el desarrollo de una extrusora destinada al procesamiento de bioplásticos elaborados a partir de almidón de papa y yuca con aplicación en el sector agrícola. A partir del análisis del estado del arte y de patentes se identificó la importancia de controlar de forma coordinada variables como la temperatura, la velocidad del tornillo y la geometría de la boquilla para garantizar un proceso de extrusión estable y obtener materiales con propiedades adecuadas.

Como resultado, se planteó una arquitectura integrada que combina el diseño mecánico de la extrusora con un sistema de supervisión y control basado en una interfaz HMI desarrollada en LabVIEW 2018. La propuesta incorpora funciones de monitoreo de variables de proceso, control del tornillo extrusor, registro de eventos, gestión de alarmas y una estrategia para el cambio automático de boquilla, constituyendo una base para el desarrollo de un sistema de extrusión más flexible y orientado a la experimentación con diferentes formulaciones de bioplástico.

Como trabajo futuro, se contempla la construcción y validación experimental del prototipo, la evaluación del comportamiento de distintas mezclas de almidón de papa y yuca durante la extrusión y la caracterización de los bioplásticos obtenidos. Asimismo, será necesario analizar la viabilidad de proteger mediante propiedad intelectual aquellos elementos que representen una aportación tecnológica original, particularmente en el diseño mecánico y la estrategia de control implementada.

Bibliografía/Referencias

Chen, Q., & Zeng, J. (2019). Method for improving thermal stability of starch-based biodegradable plastic. Chinese Patent CN109912889A.

Chen, Q., Zeng, J., Si, W., & Li, J. (2020). Method for preparing water-resistant starch-based degradable plastic masterbatch by mechanochemical modification. Chinese Patent CN112063022A.

Conrad, W. E. (2021). Extruder. U.S. Patent No. US 11,198,242 B2.

LaPray, B., Quan, W., & Allen, D. R. (2021). Articles formed with renewable and/or sustainable green plastic material and carbohydrate-based polymeric materials lending increased strength and/or biodegradability. U.S. Patent No. US 11,111,363 B2.

Mantell, D. A. (2022). System and method for adjusting the speed of a multi-nozzle extruder during additive manufacturing with reference to an angular orientation of the extruder. U.S. Patent No. US 11,230,063 B2.