

[2023]



IBERO

De:
Planeta Formación y Universidades

Construcción de un prototipo para la automatización del proceso productivo de evaporación en la fabricación de la panela, de la central de mieles del municipio de Útica (Cundinamarca)

**Jonny Rafael Plazas Alvarado,
Hugo Gaspar Hernandez**

**Facultad de Ingeniería
Corporación Universitaria
Iberoamericana**



Construcción de un prototipo para la automatización del proceso productivo de evaporación en la fabricación de la panela, en la central de mieles del municipio de Útica (Cundinamarca)

Construction of a prototype for the the automation of the productive process of evaporation in the manufacture of panela, of the honey plant in the municipality of Útica (Cundinamarca).

Jonny Rafael Plazas Alvarado, Hugo Gaspar Hernandez Palma
Corporación Universitaria Iberoamericana

Eduardo May Osio, Gerardo Israel De Atocha Pech Caraveo,
Ramiro González Horta
Instituto Tecnológico Superior De Calkiní en el Estado de Campeche
Sergio Enrique Ramírez
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central La Salle

Yenifer León Bustos
Ingeniería Industrial

Diciembre, 13 2023

Agradecimientos

A cada uno de nuestros familiares, a nuestras esposas, hijos, hijas y amigos, quienes formaron parte del esfuerzo y sacrificio de sus tiempos, para la consolidación de los resultados de esta investigación. A FEDEPANELA en especial a la Ing. Angela Martínez, quien nos abrió las puertas para conocer el sector panelero de Cundinamarca, a la Asociación de Paneleros de Utica (ASPRUT), y en especial a Freddy Barragán por compartirnos sus conocimientos y siempre apoyar la presente investigación.

Resumen

La presente investigación contempla el diseño y la construcción de un prototipo para la automatización del proceso de evaporación en la fabricación de la panela de la central de Mieles del municipio de Utica (Cundinamarca), propuesta que se fundamenta en el marco del convenio de investigación interinstitucional entre la Universidad Iberoamericana y la Federación Nacional de Productores de Panela (FEDEPANELA), con el único objetivo de fortalecer los procesos productivos de los pequeños y medianos productores de panela del país. Una investigación desarrollada bajo los criterios metodológicos de la investigación descriptiva y que se orienta en una primera etapa en el establecimiento de los diseños de un equipo de evaporación, articulando las variables y parámetros definidos en la investigación previa, esta primera etapa implica la definición de los diseños finales y la identificación de los aspectos claves para la materialización de los diseños, en una segunda etapa se contempla la construcción del prototipo de automatización del equipo de evaporación de mieles, esta etapa implica la identificación de los materiales acordes al proceso productivo y la fabricación y ensamble de piezas para la configuración del prototipo final, Finalmente en una tercera etapa se busca establecer las pruebas de acción al prototipo, con el fin de validar la ejecución de las variables críticas de acuerdo a los parámetros definidos en el modelo de optimización a FEDEPANELA, para su futura implementación en un nuevo contexto de investigación.

Palabras Clave:

Prototipo, Variables, Panela, Automatización, control.

Abstract

The present investigation contemplates the design and construction of a prototype for the automation of the evaporation process in the manufacture of panela in the Mieleles plant of the municipality of Utica (Cundinamarca), a proposal that is based on the framework of the inter-institutional research agreement between the Universidad Iberoamericana and the Federación Nacional de Productores de Panela (FEDEPANELA), with the sole objective of strengthening the productive processes of small and medium producers of panela in the country. A research developed under the methodological criteria of the descriptive research and that is oriented in a first stage in the establishment of the designs of an evaporation equipment, articulating the variables and parameters defined in the previous research, this first stage implies the definition of the final designs and the identification of the key aspects for the materialization of the designs, in a second stage it is contemplated the construction of the prototype of automation of the equipment of evaporation of honeys, This stage involves the identification of materials according to the production process and the manufacture and assembly of parts for the configuration of the final prototype. Finally, the third stage seeks to establish the action tests to the prototype, in order to validate the execution of the critical variables according to the parameters defined in the optimization model to FEDEPANELA, for its future implementation in a new research context.

Key Words:

Prototype, Variables, Panela, Automation, control.

Tabla de Contenido

Introducción	14
Capítulo 1 – Fundamentación conceptual y teórica	18
1.1. Automatización Industrial.	18
1.1.1. Medición de Temperatura:	18
1.1.2. Medición del pH:.....	19
1.1.3. Medición de Grados Brix.....	19
1.2. Producción de Panela.	20
1.3. Sistemas de Control y Automatización:	20
1.4 Criterios de Tecnificación en la Industria Panelera.....	20
Capítulo 2 - Aplicación y Desarrollo	27
2.1 Tipo y Diseño de Investigación	27
2.1.2. Diseño de Investigación.....	27
2.1.2.1. Diseño de Prototipo: En esta primera etapa, se desarrolla el proceso de planificación, el cual implica la estructuración de los planos en despiece y del ensamble de las piezas, seguido a ello se define la identificación de cada uno los materiales, piezas y dispositivos electrónicos a emplear, que formaran parte de proceso de ensamble, la planificación tambien conlleva a la identificación de elementos y/o piezas auxiliares que permitan la funcionalidad del prototipo.....	28
Finalmente, en una segunda etapa, se da la construcción del prototipo del sistema automatizado de evaporación para la fabricación de panela. Se presta especial atención a la funcionalidad y eficacia del prototipo.....	28
2.1.2.2. Desarrollo y Evaluación de Prototipo: Este diseño implica el proceso de crear y probar el prototipo. Comprende la fase de diseño, construcción y evaluación del rendimiento del prototipo en condiciones controladas y, eventualmente, en el entorno de producción real.	28
2.2. Enfoque Metodológico:	28
2.3. Métodos de Recopilación de Datos:.....	29
2.3.1 Observación: Observar el prototipo en acción y su influencia en el proceso de evaporación, identificando la forma de interacción del Prototipo con el jarabe de caña en su proceso de evaporación, además el registro de las observaciones permite el ajuste de necesidades en la configuración de los sensores y su proceso de calibración.	29
2.3.2 Mediciones y Registros: Desde el sistema de PLC 100, se realizaran las mediciones de las variables, como la temperatura, el tiempo de evaporación y el PH, con	

el único objetivo de validar que los niveles de medición estén acordes con los parámetros mínimos.....	29
2.3.3 Entrevistas y Encuestas: Se realizaron diferentes procesos de indagación a cada uno de los expertos al interior de la central de Miele con el fin de validar que desde la experiencia y la experticia de los colaboradores los niveles de calibración de los sensores estén acorde con la realidad del proceso productivo.	29
2.4 Población o entidades participantes	29
2.4.1. Operadores del Proceso de Evaporación: Incluye a los trabajadores directamente responsables de operar el equipo de evaporación (taque de Evaporación) en la fabricación de panela.....	30
2.4.2. Personal de Mantenimiento y Soporte Técnico: son los dos técnicos en mantenimiento con los que cuenta ASPUT, pues son los encargados del mantenimiento y reparación de la maquinaria relacionada con el proceso de evaporación.....	30
2.4.5. Supervisores y Gerente de Producción: Personas que supervisan y gestionan el proceso de producción de panela, ya que la automatización puede afectar las operaciones en general.	30
2.4.6. Personal de Control de Calidad: Incluye a quienes están involucrados en la verificación y control de la calidad del producto final.....	30
2.4.7. Personal de Investigación y Desarrollo: En este es el caso del equipo de investigación y desarrollo involucrado en la construcción y evaluación del prototipo, también formaría parte de la población.....	30
2.4.8. Proveedores y Suministradores de Equipos: Personas o empresas que suministran los equipos y tecnologías necesarios para la automatización.....	30
2.4.9. Stakeholders Externos: En este caso las autoridades locales del municipio de Utica, la asociación de agricultores de caña azucarera, que podrían verse implicados en el proceso de producción de panela, también podrían considerarse.....	30
2.3 Definición de Variables o Categorías.....	31
2.3.1. Variable de la temperatura.	31
2.3.2. Variable del PH.	32
2.3.3. Variable del Grados Brix.	32
2.4 Procedimiento e Instrumentos.....	33
2.4.1. Procedimiento:	33
2.5 Consideraciones Éticas	35
2.5.1. Consentimiento Informado:	35
Se empleo un consentimiento informado para todas las partes	35
involucradas, incluidos los trabajadores de la central de mieles y cualquier	35
otro grupo afectado por la implementación del prototipo. (Véase Anexo No.1)	35

2.5.2. Impacto en el Empleo:	35
2.5.5. Evaluación Ética Continua:.....	36
2.5.6. Colaboración con la Comunidad:	36
2.6 Alcances y limitaciones.....	36
2.6.1. Optimización del Proceso de Evaporación:	36
2.6.2. Mejora en la Calidad del Producto:	37
2.6.3. Eficiencia Energética:	37
2.6.4. Integración Tecnológica:.....	37
2.6.5. Monitoreo y Control en Tiempo Real:	37
2.6.8. Adaptación a Condiciones Locales:.....	38
2.6.9. Inversiones Iniciales.	38
2.6.10. Resistencia al Cambio.	38
2.6.11. Mantenimiento y Soporte Técnico.	38
2.6.12. Seguridad de Datos:.....	39
Capítulo 3 – Resultados.....	40
3.1.1. ERA ETAPA. Diseños de Detalle	40
3.1.1. Definición de Diseños de Detalle.	40
3.1.2. Simulación del Proceso de Automatización (Opción 1).....	42
3.1.2. Criterios de Automatización.	44
3.1.2. 2DA ETAPA. Construcción del Prototipo	47
3.1.2.1 Modelos cinemáticos, dinámicos y de estabilidad:.....	49
3.1.2.2 Simulación del Prototipo.	50
3.1.2.3. Diseño mecánico del prototipo.	52
3.1.2.4. Construcción del prototipo.	54
.....	54
3.1.2.5. Ensamble Electronico del prototipo.	55
Resultados:	58
3.1.2.6. Pruebas del prototipo.	59
Capítulo 4 – Conclusiones	61
Referencias	64

Índice de Tablas

Tabla 1. Datos Generales de la Búsqueda.....	21
Tabla 2 Producción científica por país.....	23
Tabla 3 Pruebas de Múltiple Rangos para °Brix por LOTES	33
Tabla 4 Características de Sensores.....	40
Tabla 5 Definición de criterios en el diseño de Piezas	41
Tabla 6 Grados de Libertar en Eslabones.....	43
Tabla 7 Especificaciones Técnicas del PH-metro	46

Índice de Figuras

Figura 1 Producción científica anual	22
Figura 2 Ley de Bradford	22
Figura 3 Fuentes más relevantes Consultadas.....	23
Figura 4 Producción científica entre países	24
Figura 5 Artículos más citados.....	25
Figura 6 Concurrencia de palabras claves	26
Figura 6 Concurrencia de palabras claves	26
Figura 7 Estructura de desarrollo de Prototipo.....	27
Figura 7 Estructura de desarrollo de Prototipo.....	27
Figura 8 Caja y Bigotes Comparación de Medias de la Temperatura-Lotes31	
Figura 8 Caja y Bigotes Comparación de Medias de la Temperatura-Lotes31	
Figura 9 Caja y Bigotes Comparación de Medias del PH-Lotes	32
Figura 9 Caja y Bigotes Comparación de Medias del PH-Lotes	32
Figura 10 Diseño Propuesta de Automatización de Tolva de Evaporación..	41
Figura 10 Diseño Propuesta de Automatización de Tolva de Evaporación..	41
Figura 11 Diseño de la Estructura Scara.....	41
Figura 11 Diseño de la Estructura Scara.....	41
Figura 12 Simulación Brazo Scara.....	42
Figura 12 Simulación Brazo Scara.....	42
Figura 13 Simulación Árbol de Sensores.....	43
Figura 13 Simulación Árbol de Sensores.....	43
Figura 14 Sonda de Termocupla PL100	44

Figura 14 Sonda de Termocupla PL100	44
Figura 15 Termocupla de Medición	45
Figura 15 Termocupla de Medición	45
Figura 16 PH-metro Portatil Hanna Instrument	45
Figura 16 PH-metro Portatil Hanna Instrument	45
Figura 17 Conversor de Voltaje	46
Figura 17 Conversor de Voltaje	46
Figura 18 Interfaz de PLC-100	47
Figura 18 Interfaz de PLC-100	47
Figura 19 Estructura Metodológica en el desarrollo de Prototipos	48
Figura 19 Estructura Metodológica en el desarrollo de Prototipos	48
Figura 20 Estructura de Modelo de variables	49
Figura 20 Estructura de Modelo de variables	49
Figura 21 Simulación de Árbol de Sensores.....	50
Figura 21 Simulación de Árbol de Sensores.....	50
Figura 22 Diseño y Simulación de Válvulas + fluido (temperatura) (Input – Output)	51
Figura 22 Diseño y Simulación de Válvulas + fluido (temperatura) (Input – Output)	51
Figura 23 Diseño y Simulación de sensor tree	51
Figura 23 Diseño y Simulación de sensor tree	51
Figura 24 Simulación de Brazo Scara	52
Figura 24 Simulación de Brazo Scara	52
Figura 25 Diseño de Brazo Scara	52
Figura 25 Diseño de Brazo Scara	52
Figura 26 Estructura de Ensamblés Mecánicos.....	53
Figura 26 Estructura de Ensamblés Mecánicos.....	53
Figura 27 Estructura de Funcionamiento de cojinetes	53
Figura 27 Estructura de Funcionamiento de cojinetes	53
Figura 28 Perfiles Estructurales para brazo Scara	54
Figura 28 Perfiles Estructurales para brazo Scara	54
Figura 29 Corte en CNC de perfiles estructurales.....	54

Figura 29 Corte en CNC de perfiles estructurales.....	54
Figura 30 Ensamble de Piezas Scara	55
Figura 30 Ensamble de Piezas Scara	55
Figura 31 Montaje de Componentes Electronicos prototipo.....	55
Figura 31 Montaje de Componentes Electronicos prototipo.....	55
Figura 32 Respuesta calibrada RTD PT-100.....	57
Figura 32 Respuesta calibrada RTD PT-100.....	57
Figura 33 Plano de Diseño Electronico.....	58
Figura 33 Plano de Diseño Electronico.....	58
Figura 34 Montaje de Prototipo en Tolva de Evaporación	59
Figura 34 Montaje de Prototipo en Tolva de Evaporación	59
Figura 35 Pruebas Piloto en PH y configuración.....	59
Figura 35 Pruebas Piloto en PH y configuración.....	59
Figura 36 Pruebas Piloto en la Tolva de evaporación	60
Figura 36 Pruebas Piloto en la Tolva de evaporación	60
Figura 37 Pruebas finales con Termocuplas en Tolva de Evaporación.....	60
Figura 37 Pruebas finales con Termocuplas en Tolva de Evaporación.....	60

Introducción

Desde la llegada de la caña de azúcar a Colombia en 1538, introducida por los conquistadores españoles en las proximidades del río Cauca, los

colombianos han sido testigos de la expansión de los cultivos de caña en diversas regiones del país. Estos cultivos han sido destinados a la producción de un elemento tan fundamental como la panela, un producto alimenticio con más de cuatro siglos de tradición en Colombia. A lo largo de este extenso período, la panela ha refrescado las tardes de innumerables colombianos y ha endulzado las mañanas de miles de familias con su arraigada presencia en la cultura culinaria del país.

Estos cultivos de caña panelera se han extendido por 28 departamentos y 511 municipios en todo el país, ocupando alrededor de 198,856 hectáreas plantadas. Durante el último año (2020), esta extensión de tierra ha generado una producción de panela que alcanza las 1,091,502 toneladas. Para lograr este nivel de producción, actualmente se cuentan con más de 20,000 trapiches concentrados en 164 municipios, donde participan alrededor de 350,000 personas en diversas etapas, que van desde la siembra hasta la distribución y comercialización de la panela.

Según las estadísticas proporcionadas por FEDEPANELA, federación que agrupa a 164 municipios mediante comités municipales, se ha observado en los últimos años que este sector productivo ha adquirido una significativa participación del 3% en el Producto Interno Bruto (PIB). Esto lo consolida como la segunda industria agrícola más importante en términos de productividad para el país, según datos del Ministerio de Agricultura (2019).

En sintonía con esta realidad, de los aproximadamente 20,000 trapiches y 70,000 unidades productivas presentes en el país, que implican a cerca de 350,000 familias, se destaca su presencia especialmente en departamentos como Boyacá, Cundinamarca, Cauca, Antioquia, Santander, Nariño, Valle del Cauca, Tolima, Caldas, Norte de Santander, Risaralda y Huila. Estos departamentos concentran el 83% del área cultivada y albergan 276 organizaciones. El 99% de la producción de estas zonas se destina al mercado nacional, mientras que solo el 1% se dirige a la exportación, siendo

los principales destinos de exportación los Estados Unidos y España durante la última década.

Esta baja proporción en las exportaciones de panela refleja uno de los indicadores de las debilidades actuales en el sector panelero colombiano. La escasa cualificación en los procesos de producción, la limitada tecnificación y la falta de estandarización en los procesos productivos son factores determinantes que han generado restricciones en la oferta del producto en el mercado internacional.

Frente a este escenario y en concordancia con las cinco fases esenciales de la producción de panela, según la caracterización realizada en la zona de Útica (Cundinamarca) por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), se evidencia que en la etapa de molienda o extracción de la caña, no se llevan a cabo procesos de registro del porcentaje de extracción de jugo, con el único propósito de minimizar las pérdidas en el bagazo de la caña. Además, la falta de un plan de mantenimiento para el molino es una carencia notable.

En la segunda fase, que corresponde a la pre-limpieza del jugo, no se utilizan filtros o, en algunas ocasiones, se realizan de manera superficial, limitando así la calidad del producto final. En la etapa de encalado y purificación, la ausencia de fichas técnicas para el control del guácimo y la cal es evidente. La cuarta fase, dedicada a la evaporación y concentración, carece de registros o controles para la temperatura durante estos procesos, dependiendo exclusivamente de la experiencia del operario.

Finalmente, en la etapa de punteo, moldeo y batido, los operarios regulan el proceso de manera subjetiva, ocasionando retrasos en las entregas y un aumento en los costos de fabricación. Estos y otros aspectos señalados por AGROSAVIA son el resultado de observaciones llevadas a cabo por diversos investigadores vinculados a esta corporación de investigación agropecuaria. Estos señalamientos, enmarcados en la presente propuesta, constituyen las razones que respaldarán la iniciativa de integrar el proceso de investigación.

Considerando lo mencionado anteriormente y teniendo en cuenta los procesos de ampliación del mercado de la panela, es crucial eliminar cualquier restricción que pueda obstaculizar el desarrollo del sector. Esto implica la necesidad de ofrecer alternativas que mejoren sus procesos y optimicen su cadena productiva. En consecuencia, resulta fundamental destacar que: ¿En qué medida la construcción de un prototipo de automatización al proceso productivo de evaporación para la fabricación de la panela, para la central de mieles del municipio de Utica (Cundinamarca), mejorara la eficiencia y calidad de la producción?

Capítulo 1 – Fundamentación conceptual y teórica

La fundamentación teórica en la construcción de un prototipo para la automatización del proceso productivo de evaporación en la fabricación de panela se ha decidido abordar desde la perspectiva de la automatización industrial, la producción de panela y los sistemas de control. Por tanto, se presenta a continuación, la fundamentación teórica de estos conceptos.

1.1. Automatización Industrial.

La automatización industrial se refiere a la aplicación de sistemas y controladores automáticos para operar diferentes tipos de maquinaria y procesos en la fabricación. Según Groover (2001), *"la automatización industrial implica el uso de sistemas de control como computadoras o robots para el manejo de diferentes procesos y maquinaria en una variedad de industrias"*.

En este sentido la Importancia de la Automatización en la Industria Agroalimentaria busca contribuir a mejorar la eficiencia, la calidad del producto y la seguridad alimentaria (Bolaji et al., 2018). En el caso específico de la fabricación de panela, la implementación de sistemas automáticos puede optimizar el proceso productivo y reducir costos.

En este sentido, La incorporación de sensores para medir la temperatura, el pH y los grados Brix en el proceso de fabricación de panela es esencial para garantizar la calidad del producto final. Desde la fundamentación literaria, en el uso de sensores en cada una de estas variables, se encuentra que:

1.1.1. Medición de Temperatura:

La temperatura juega un papel crucial en diversas etapas del proceso de fabricación de panela, como la evaporación y la cristalización, afectando la calidad y la eficiencia del proceso. Lograr controlar, el grado de variabilidad de la temperatura, es un aspecto fundamental en el proceso de producción de la panela, pues según Smith et al. (2019), *"la medición precisa de la temperatura es esencial para garantizar la calidad y la eficiencia en los procesos industriales"*. Sensores como los termopares y las

termorresistencias permiten una monitorización precisa de la temperatura (García, 2017).

1.1.2. Medición del pH:

Un segundo aspecto, en este proceso de la automatización industrial, es el pH, el cual influye en la clarificación del jugo de caña y en la formación de cristales. Por lo cual, mantener un pH adecuado es crítico para evitar alteraciones en la acidez que podrían afectar la calidad del producto.

Lograr entonces, el control del nivel de PH, implica que la automatización de esta medición pueda regular el nivel de acidez del proceso de evaporación de la panela, por lo cual, Brown et al. (2018) destaca que "el control del pH en la industria alimentaria es vital para asegurar la estabilidad y la calidad del producto". Electrodo de pH permiten la monitorización y ajuste del pH durante el proceso (González, 2020).

1.1.3. Medición de Grados Brix.

Finalmente, en ultima variable del proceso de evaporación de la panela, se encuentran los grados Brix, los cuales indican la concentración de sacarosa en el jarabe de caña, siendo esenciales para determinar el punto de cristalización y la concentración de azúcar en la panela. Si se busca, asegurar el grado de automatización de esta variable, es necesario identificar la forma de realizar la medición, debido a que los niveles de sacarosa están ligados a la temperatura, de allí que sea necesario la toma de una muestra o emplear sensores de alta calibración que miden en tiempo real dicha variable. En este sentido Jones et al. (2021) señala que "la medición precisa de los grados Brix es crucial para garantizar la calidad y consistencia del producto en la industria azucarera". Refractómetros y sensores ópticos son comúnmente utilizados para determinar los grados Brix (Martínez, 2019).

Al integrar estos sensores en la producción de panela, se logrará un control más preciso, mejorando la eficiencia y asegurando la calidad del producto final. Aunque las citas específicas sobre la producción de panela pueden ser

limitadas, los conceptos generales sobre la importancia de la monitorización en la industria alimentaria son aplicables a este contexto.

1.2. Producción de Panela.

El proceso de fabricación de panela involucra diversas etapas, desde la extracción del jugo de caña de azúcar hasta la cristalización y moldeado del producto final. Según Ramírez et al. (2015), "el proceso productivo de la panela incluye las etapas de extracción de jugo, clarificación, evaporación, cristalización y secado". Es clave, por tanto, que durante la etapa de evaporación se pueda intensificar la energía y la mano de obra del proceso. Lograr automatizar este proceso, puede resolver desafíos relacionados con la consistencia del producto y la eficiencia del uso de recursos.

1.3. Sistemas de Control y Automatización:

La implementación de sistemas de control en la industria alimentaria permite monitorear y regular procesos de manera más precisa. Según Bequette (2003), "los sistemas de control proporcionan la capacidad de ajustar y mantener variables críticas en un proceso de fabricación".

De allí que las tecnologías de Automatización aplicadas a la Evaporación implican el uso de sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) y sistemas de PLC (Controladores Lógicos Programables), los cuales puede ser fundamentales en la automatización del proceso de evaporación. Según Zhang y Liu (2011), "la integración de sistemas SCADA y PLC mejora la eficiencia y la confiabilidad de los procesos industriales".

1.4 Criterios de Tecnificación en la Industria Panelera.

En la búsqueda de literatura que permita integrar la dinámica de automatización en los procesos de elaboración de la panela, se identifica que los conceptos de la Industria 4.0, son aplicables a la automatización o mejora de la industria panelera, en este sentido, la exploración de la literatura se realizó bajo ecuación de búsqueda en la base de datos de Scopus: (TITLE-ABS-KEY ("industry 4.0") OR TITLE-ABS-KEY ("blockchain") OR TITLE-ABS-KEY ("artificial intelligence") OR TITLE-ABS-KEY ("data

mining") OR TITLE-ABS-KEY ("lot") AND TITLE-ABS-KEY ("sugar cane") OR TITLE-ABS-KEY ("panela") Con los datos obtenidos de Scopus se lleva a cabo un proceso de análisis de los datos con apoyo del software R Studio en su paquete Bibliometrix y el software VOS VIEWER.

En esta búsqueda, se identificaron los siguientes resultados,

Tabla 1. Datos Generales de la Búsqueda

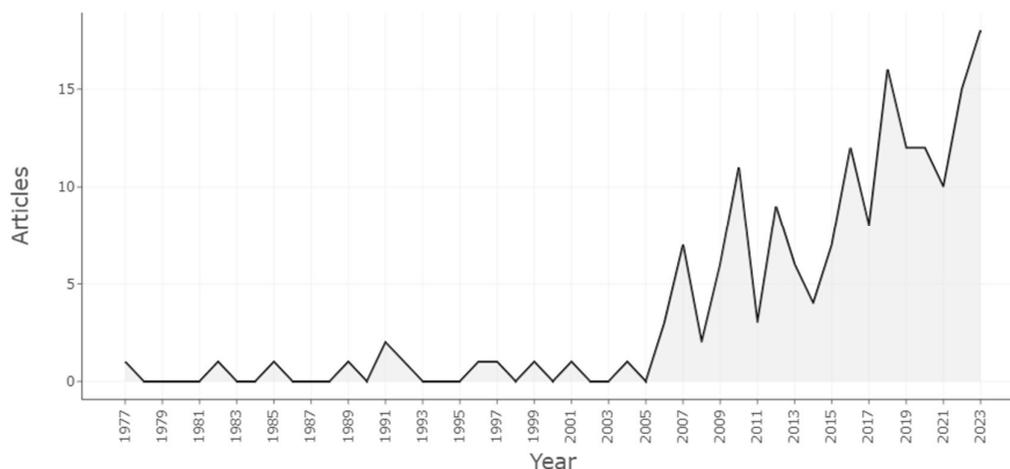
MAIN INFORMATION ABOUT DATA	
Timespan	1977:2023
Sources (Journals, Books, etc)	127
Documents	173
Annual Growth Rate %	6,49
Document Average Age	8,15
Average citations per doc	17,31
<u>References</u>	<u>5268</u>
DOCUMENT CONTENTS	
Keywords Plus (ID)	2024
<u>Author's Keywords (DE)</u>	<u>602</u>
AUTHORS	
Authors	640
<u>Authors of single-authored docs</u>	<u>15</u>
AUTHORS COLLABORATION	
Single-authored docs	16
Co-Authors per Doc	4,14
<u>International co-authorships %</u>	<u>19,65</u>
DOCUMENT TYPES	
Article	109
Book	1 book chapter
conference review	3 conference paper
	3
Retracted	1
<u>Review</u>	<u>5</u>

Fuente: autor empleando el software R con base en información de Scopus (2023).

La información proporcionada en la tabla anterior (tabla 1) permite identificar los aspectos generales vinculados a la producción científica en el área del conocimiento. Se evidencia un incremento del 6.49% en los últimos años, con un total de 173 fuentes que cuentan con la contribución de 640 autores en las respectivas publicaciones. Asimismo, la expansión de la

producción científica es más evidente al examinar la figura 1; se resaltan los años 2016 (12), 2018 (16) y 2023 (19), los cuales registraron un notorio aumento en las publicaciones relacionadas con el tema de investigación. Estos años en particular representan el 27% de la totalidad de la investigación realizada.

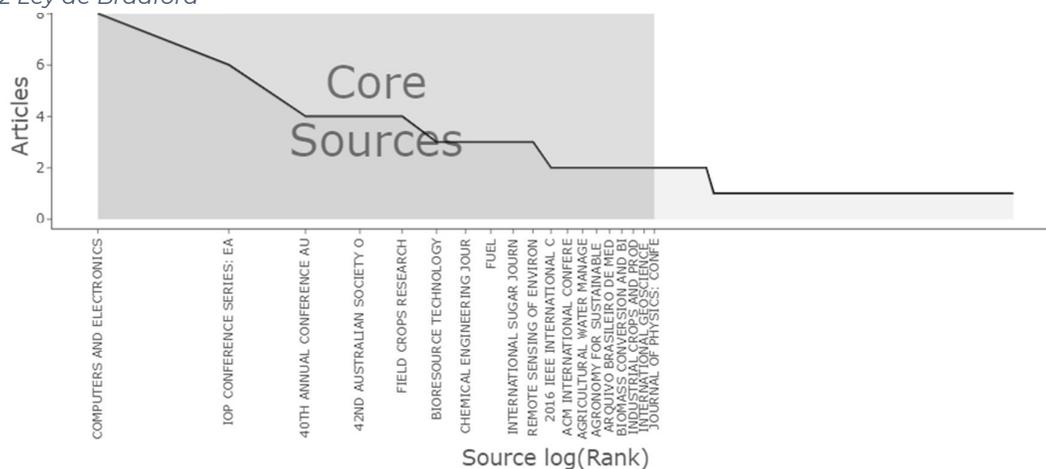
Figura 1 Producción científica anual



Fuente: autor con base en información de Scopus (2023).

A continuación, se presentan las fuentes más significativas con base en la frecuencia de publicación en el tema, utilizando los percentiles indicados mediante la aplicación de la ley de Bradford. Esta ley organiza las revistas en tres categorías de rendimiento, cada una con un incremento en la cantidad de revistas y una proporción equivalente de artículos. La valoración según la ley de Bradford fue implementada para determinar este criterio (Martín-del-Río et al., 2021).

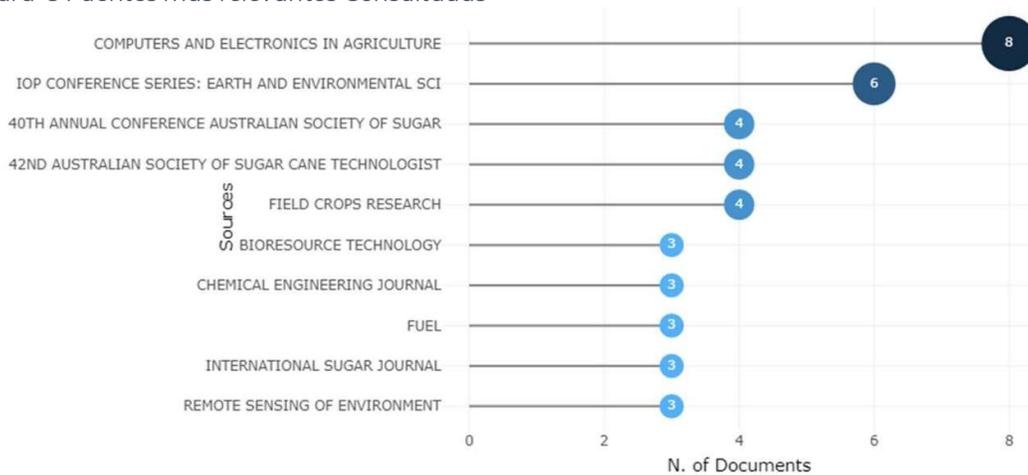
Figura 2 Ley de Bradford



Fuente: autor con base en información de Scopus (2023).

De acuerdo con lo mencionado previamente, la figura 3 muestra cómo la revista *Computers and Electronics in Agriculture* ocupa el primer lugar en el área, con un total de ocho publicaciones, seguida por *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, que cuenta con seis contribuciones.

Figura 3 Fuentes más relevantes Consultadas



Fuente: autor empleando el software R con base en información de Scopus (2023).

La revista *Computers and Electronics in Agriculture* ha publicado trabajos que se centran en la aplicación de inteligencia artificial para desarrollar modelos predictivos en la producción y rendimiento de la caña de panela, así como en la implementación de estrategias de agricultura de precisión (Felipe Maldaner et al., 2021).

En cuanto a la productividad científica a nivel global, se destaca que Brasil lidera con 192 contribuciones, seguido por India con 98, China con 88, Australia con 67, Indonesia con 30, Francia con 27 y Malasia con 20, entre otros países. Es importante destacar que se han llevado a cabo colaboraciones internacionales, siendo notable la coautoría entre Brasil e India, como se evidencia en la tabla 2.

Tabla 2 Producción científica por país.

Country	Frecuencia
BRAZIL	192
INDIA	98
CHINA	88

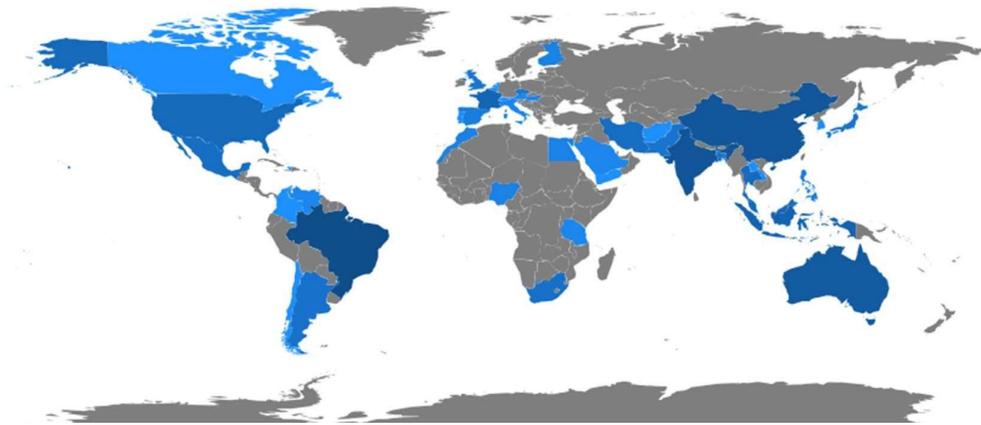
AUSTRALIA	67
INDONESIA	30
FRANCE	27
MALAYSIA	20
USA	19
THAILAND	17
IRAN	14

Fuente: autor con base en información de Scopus (2023).

Las publicaciones provenientes de Brasil constituyen el 30% del total. El propósito de la investigación fue crear una metodología que contribuyera a la automatización del mapeo de áreas extensas de caña de panela mediante el uso de series temporales de imágenes de sensores remotos (Vieira, M. A., Formaggio, A. R., Rennó, C. D., Atzberger, C., Aguiar, D. A., & Mello, M. P., 2012).

En otras investigaciones de origen brasileño, se emplean residuos de biomasa agrícola, específicamente bagazo de caña de panela en forma de carbón granular activado, como adsorbente para evaluar su sostenibilidad en la eliminación de cromo de aguas residuales en un proceso por lotes (Ama Rao Karri, J.N. Sahu, B.C. Meikap, 2020).

Figura 4 Producción científica entre países



Fuente: autor con base en información de Scopus (2023).

En contraste, en la tabla 5 se presentan los veinte documentos vinculados al área de investigación que cuentan con el mayor número de citas. Las tres más destacadas son las siguientes: LIOU T-H, 2010, publicado en la revista CHEM ENG J; VIEIRA MA, 2012, publicado en REMOTE SENS

ENVIRON; y EVERINGHAM Y, 2016, publicado en AGRON SUSTAINABLE DEV.

Figura 5 Artículos más citados

Paper	DOI	Total Citacions
LIU T-H, 2010, CHEM ENG J	10.1016/j.cej.2009.12.016	418
VIEIRA MA, 2012, REMOTE SENS ENVIRON EVERINGHAM Y, 2016, AGRON SUSTAINABLE DEV	10.1016/j.rse.2012.04.011 10.1007/s13593-016-0364-z	205 190
KAAB A, 2019, SCI TOTAL ENVIRON	10.1016/j.scitotenv.2019.02.004	164
WECKWERTH W, 2011, J PROTEOMICS	10.1016/j.jprot.2011.07.010	151
KARRI RR, 2020, IND CROPS PROD	10.1016/j.indcrop.2019.111927	103
FANG Z, 2020, CHEM ENG J	10.1016/j.cej.2020.124611	101
EL HAJJ M, 2009, REMOTE SENS ENVIRON	10.1016/j.rse.2009.04.009	85
BOCCA FF, 2016, COMPUT ELECTRON AGRIC 10.1016/j.compag.2016.08.015		72
GHATAK MD, 2018, FUEL RIVERA EC, 2010, J CHEM TECHNOL BIOTECHNOL	10.1016/j.fuel.2018.05.051 10.1002/jctb.2391	65 54
ZAFAR M, 2012, BIORESOUR TECHNOL	10.1016/j.biortech.2011.10.024	54
ZHANG Y, 2012, BIORESOUR		53
YANG W, 2013, FIELD CROPS RES	10.1016/j.fcr.2013.03.008	53
FERRARO DO, 2009, FIELD CROPS RES NATARAJAN R, 2016, COMPUT ELECTRON AGRIC	10.1016/j.fcr.2009.02.014 10.1016/j.compag.2016.05.016	52 47
STRAY BJ, 2012, COMPUT ELECTRON AGRIC	10.1016/j.compag.2012.01.009	47

Fuente: autor empleando el software R con base en información de Scopus (2023).

En última instancia, la evaluación de clústeres mediante el uso de VOS VIEWER, como se muestra en la figura 7, presenta los términos más influyentes agrupados por sus ocurrencias conjuntas. Se evidencia que términos como "sugar cane", "artificial intelligence", "data mining", "bagasse" y "saccharum" son algunos de los conceptos fundamentales vinculados al campo de aplicación de la industria 4.0 en la industria de la panela.

Capítulo 2 - Aplicación y Desarrollo

2.1 Tipo y Diseño de Investigación

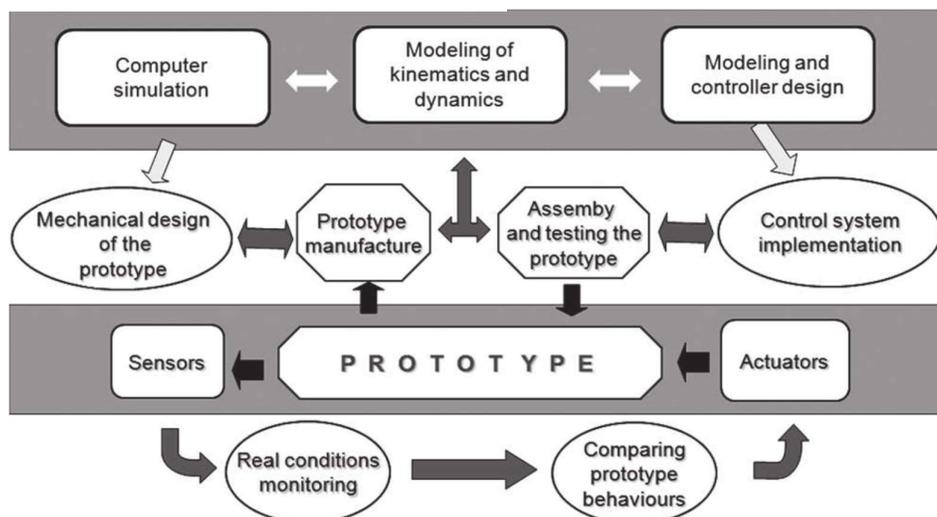
El tipo de Investigación que se identificó para la construcción del prototipo para la automatización del proceso productivo de evaporación en la fabricación de la panela fue una investigación aplicada y experimental.

En este sentido se identifica una investigación aplicada, puesto que la construcción del prototipo tiene un enfoque práctico orientado a abordar un problema específico en la industria de la fabricación de panela, que es la optimización del proceso de evaporación. Además, se establece desde una investigación tipo experimental puesto que, en la etapa de construcción del prototipo, los momentos de ensamble se pueden definir como experimentos controlados para probar la viabilidad y eficacia del prototipo diseñado. La manipulación de variables y la medición de resultados son características clave de este tipo de investigación.

2.1.2. Diseño de Investigación.

En este sentido el diseño de investigación más apropiado para el desarrollo del prototipo, se estructuró de la siguiente manera:

Figura 8 Estructura de desarrollo de Prototipo



Fuente. Mechatronics methodology E. Gorrostieta (2015)

2.1.2.1. Diseño de Prototipo: En esta primera etapa, se desarrolla el proceso de planificación, el cual implica la estructuración de los planos en despiece y del ensamble de las piezas, seguido a ello se define la identificación de cada uno los materiales, piezas y dispositivos electrónicos a emplear, que formaran parte de proceso de ensamble, la planificación también conlleva a la identificación de elementos y/o piezas auxiliares que permitan la funcionalidad del prototipo.

Finalmente, en una segunda etapa, se da la construcción del prototipo del sistema automatizado de evaporación para la fabricación de panela. Se presta especial atención a la funcionalidad y eficacia del prototipo.

2.1.2.2. Desarrollo y Evaluación de Prototipo: Este diseño implica el proceso de crear y probar el prototipo. Comprende la fase de diseño, construcción y evaluación del rendimiento del prototipo en condiciones controladas y, eventualmente, en el entorno de producción real.

2.2. Enfoque Metodológico:

En la construcción de este Prototipo para el control de la variables en el proceso de evaporización de la panela, se ha establecido un enfoque cuantitativo que incluye elementos de investigación de diseño y desarrollo, así como de investigación experimental, por consiguiente, la Investigación de diseño y desarrollo aborda la creación y mejora del prototipo a través de una serie de fases iterativas, en las cuales se incorporan conocimientos técnicos y científicos para diseñar y desarrollar un sistema automatizado eficiente.

Adicionalmente se empleará la Investigación Experimental, como el único camino transversal en el cual se llevarán a cabo experimentos para evaluar el rendimiento del prototipo en términos de eficiencia en la evaporación y mejora en el proceso productivo de la fabricación de panela.

2.3. Métodos de Recopilación de Datos: Para recopilar datos sobre la eficacia del prototipo y su impacto en el proceso productivo, se emplearon métodos como:

- 2.3.1 Observación: Observar el prototipo en acción y su influencia en el proceso de evaporación, identificando la forma de interacción del Prototipo con el jarabe de caña en su proceso de evaporación, además el registro de las observaciones permite el ajuste de necesidades en la configuración de los sensores y su proceso de calibración.
- 2.3.2 Mediciones y Registros: Desde el sistema de PLC 100, se realizaran las mediciones de las variables, como la temperatura, el tiempo de evaporación y el PH, con el único objetivo de validar que los niveles de medición estén acordes con los parámetros mínimos.
- 2.3.3 Entrevistas y Encuestas: Se realizaron diferentes procesos de indagación a cada uno de los expertos al interior de la central de Miel con el fin de validar que desde la experiencia y la experticia de los colaboradores los niveles de calibración de los sensores estén acorde con la realidad del proceso productivo.

2.4 Población o entidades participantes

La población en el contexto de la construcción del prototipo para la automatización del proceso productivo de evaporación en la fabricación de panela en la central de mieles del municipio de Útica se compone de los elementos o unidades que están directamente involucrados o afectados por el proceso de automatización en cuestión. En este sentido se identificaron las siguientes categorías de población que formaron parte del proceso de la investigación:

2.4.1. Operadores del Proceso de Evaporación: Incluye a los trabajadores directamente responsables de operar el equipo de evaporación (taque de Evaporación) en la fabricación de panela.

2.4.2. Personal de Mantenimiento y Soporte Técnico: son los dos técnicos en mantenimiento con los que cuenta ASPUT, pues son los encargados del mantenimiento y reparación de la maquinaria relacionada con el proceso de evaporación.

2.4.5. Supervisores y Gerente de Producción: Personas que supervisan y gestionan el proceso de producción de panela, ya que la automatización puede afectar las operaciones en general.

2.4.6. Personal de Control de Calidad: Incluye a quienes están involucrados en la verificación y control de la calidad del producto final.

2.4.7. Personal de Investigación y Desarrollo: En este es el caso del equipo de investigación y desarrollo involucrado en la construcción y evaluación del prototipo, también formaría parte de la población.

2.4.8. Proveedores y Suministradores de Equipos: Personas o empresas que suministran los equipos y tecnologías necesarios para la automatización.

2.4.9. Stakeholders Externos: En este caso las autoridades locales del municipio de Utica, la asociación de agricultores de caña azucarera, que podrían verse implicados en el proceso de producción de panela, también podrían considerarse.

Es crucial identificar y definir claramente quiénes son los actores clave involucrados en el proceso productivo y que podrían verse afectados por la automatización. Esta definición precisa de la población es esencial para planificar y ejecutar el proyecto de construcción del prototipo de manera efectiva, asegurando que las necesidades de todos los involucrados se tengan en cuenta.

2.3 Definición de Variables o Categorías

El proceso de definición de las variables para la construcción del prototipo de automatización para el proceso productivo de evaporación en la fabricación de panela en la central de mieles del municipio de Útica partió desde reconocer cada uno de los aspectos de fabricación de la panela molida en la central de mieles, desde una investigación previa, se constató entre los datos aportados desde la Literatura y la practica desde la experiencia productiva de los colaboradores.

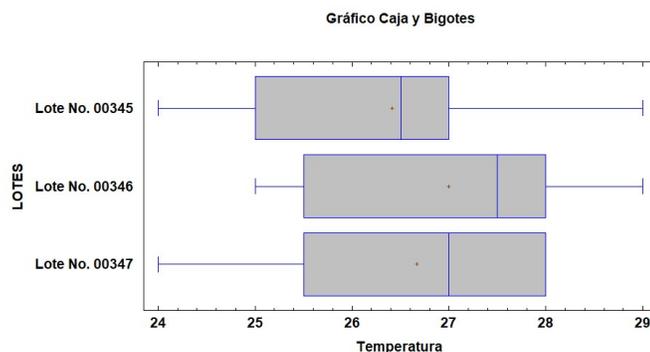
Es estudio de variables se realizó en la propuesta de automatización del proceso productivo de evaporación para la fabricación de la panela, en la central de mieles del municipio de utica

En dicha investigación se identificaron los siguientes aspectos:

2.3.1. Variable de la temperatura.

Es un punto de referencia para validar la relación entre las variables de los lotes estudiados y se convierte en un indicador de relación multivariado.

Figura 10 Caja y Bigotes Comparación de Medias de la Temperatura-Lotes



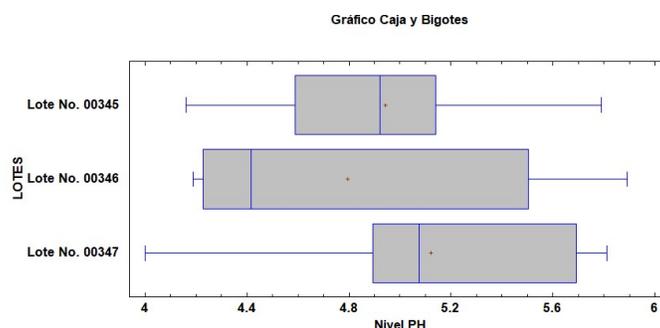
Fuente. Autor.

En este sentido y de acuerdo con la investigación realizada la temperatura en el punto de evaporación oscila entre los 112°C y los 117°C. Temperatura en la cual los niveles de azucares se liberan de sus enlaces de sacarosa y producen un estado de solidificación independiente (Azucares reductores). Por consiguiente, es indispensable mantener estable la temperatura, con el único de regular la calidad de producción de la panela.

2.3.2. Variable del PH.

que la procedencia de las mieles y la composición de esta cuestiona las prácticas de manufactura que se realizan desde los trapiches, pues es claro que la diferencia entre las mieles es mínima, pero la condiciones de PH de cada uno de los lotes, deja entre ver que existe un intervalo ideal entre los 4.56 y 5.7.

Figura 12 Caja y Bigotes Comparación de Medias del PH-Lotes



Fuente. Autor.

Los cuales dentro de la practica manufacturera de la CM y según la teoría de alistamiento de la panela, el PH es uno de los factores que garantiza que, para tener una panela de calidad con color natural y dureza óptima, el pH debe ser cercano a 6.1. El valor promedio de pH para todas las muestras fue de 5.34, valor que se ajusta a Durán et al. (2014) y Insuasty et al. (2003), quienes reportaron valores similares (entre 5,38 y 5,66).

Estas variables y categorías pueden servir como punto de partida y deben ajustarse según las especificidades del proyecto y las metas establecidas. Es crucial definir indicadores cuantitativos y cualitativos para cada variable a fin de evaluar de manera completa y precisa el impacto de la automatización en la fabricación de panela.

2.3.3. Variable del Grados Brix.

La validación de los datos de grados Brix, permite evaluar los niveles de concentración que alcanza el jugo de caña durante el proceso de evaporación, este nivel de concentración determina a futuro el posible nivel de fermentación del jarabe de caña y aumenta el nivel de agua. De acuerdo con lo datos obtenidos es evidente que entre las muestras analizadas no

existe una diferencia significativa entre la muestra, pero es evidente que en el Lote No. 00345, se tiene una media de °Brix por encima de los 66° lo cual garantiza mayores niveles de azúcares y por tanto mayor producción de panela.

Tabla 3 Pruebas de Múltiple Rangos para °Brix por LOTES

LOTES	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Lote No. 00347	12	65,685	X
Lote No. 00346	12	65,8142	X
Lote No. 00345	12	66,1175	X

Contraste	Sig	Diferencia	+/- Límites
Lote No. 00345 - Lote No. 00346	.	0,303333	0,503898
Lote No. 00345 - Lote No. 00347	.	0,4325	0,503898
Lote No. 00346 - Lote No. 00347	.	0,129167	0,503898

Método: 95,0 porcentaje LSD

* indica una diferencia significativa. Fuente. Autor.

Finalmente, y como se observa en el diagrama, existe un intervalo en el cual los niveles de sólidos solubles (grados Brix) garantizan un punto clave de no fermentación de las mieles, bajos niveles de agua o mayores rendimientos en la producción del Kilogramo de panela, los cuales pueden ser establecidos entre los 65.2 y los 66.4 °Brix.

2.4 Procedimiento e Instrumentos

El desarrollo de este prototipo para la automatización del proceso productivo de evaporación en la fabricación de la panela en la central de mieles del municipio de Útica implica la implementación de un procedimiento bien estructurado y el uso de instrumentos adecuados. Para el cual se asumió el siguiente enfoque:

2.4.1. Procedimiento:

En la construcción del prototipo fue necesario iniciar en la estructuración de un plan de trabajo que permitió el andamiaje de cada una de las etapas del proceso de elaboración, del mismo, lo anterior con el fin de controlar las variables de producción de la panela, para así mejorar la eficiencia, reducir costos, y mejorar la calidad del producto final.

Por tanto, se establecieron una serie de momentos en si consolidación como fueron:

- a). Identificación de los dispositivos de Construcción.
- b). Diseño, estructuración y montaje de piezas de ensamble
- c). Montaje de dispositivos electrónicos y de control.
- d). Pruebas de validación & Calibración de sensores
- e). Ventajas y Recomendación del prototipo.

Adicional a estos momentos de consolidación, fue indispensable tener presente, los siguientes criterios:

- f). Análisis de Requisitos: Identificar los requisitos específicos del proceso de evaporación y las necesidades de los usuarios, considerando las condiciones locales y los recursos disponibles.
- g). Diseño del Prototipo: Desarrollar un diseño técnico del prototipo, considerando la integración con el equipo existente, la automatización de procesos y la interfaz de usuario.
- h). Selección de Tecnologías: Seleccionar las tecnologías y componentes necesarios, como sensores de temperatura, actuadores, controladores lógicos programables (PLC), y sistemas de adquisición de datos (DAQ).
- i). Construcción del Prototipo: Construir físicamente el prototipo siguiendo el diseño especificado, asegurando la correcta instalación de sensores, actuadores y otros componentes.
- j). Integración de Software: Desarrollar o configurar el software necesario para el control del prototipo. Esto podría incluir la programación de PLC, interfaces de usuario y software de monitoreo.
- k). Ajustes y Optimización: Realizar ajustes y optimizaciones en función de los resultados de las pruebas, garantizando la mejora continua del prototipo.

l). Pruebas Piloto: Implementar el prototipo en una escala piloto en la central de mieles, observando su desempeño en condiciones reales de producción.

m). Evaluación y Retroalimentación: Recopilar datos sobre el rendimiento del prototipo, recopilar la retroalimentación del personal y realizar evaluaciones para determinar la efectividad.

n). Ajustes Finales: Realizar ajustes finales según la retroalimentación y los resultados obtenidos durante las pruebas piloto.

2.5 Consideraciones Éticas

En la construcción y estructuración del prototipo, fue evidente que se establecieron los siguientes aspectos en el marco de la ética en la práctica de la investigación.

2.5.1. Consentimiento Informado:

Se empleo un consentimiento informado para todas las partes involucradas, incluidos los trabajadores de la central de mieles y cualquier otro grupo afectado por la implementación del prototipo. (Véase Anexo No.1)

2.5.2. Impacto en el Empleo:

Se estableció un proceso de evaluación con los líderes del proceso productivo valorando cualquier impacto potencial en el empleo de los trabajadores existentes debido a la automatización. Adicional a esto, se indicó poder proporcionar capacitación en el uso de los dispositivos del prototipo.

2.5.3. Equidad y Acceso:

Se establecieron reuniones con los colaboradores de la central de mieles, a quienes se informó de cada uno de los procedimientos a acompañar, en pro de la consolidación del prototipo, además se formalizo un espacio de formación en el manejo de la buenas prácticas de Manufactura.

2.5.4. Seguridad y confidencialidad de los Datos.

Se le notificó a la Asociación de paneleros de Utica, el respeto y la confidencialidad por el uso de los datos, con el fin de garantizar la seguridad y privacidad de los datos recopilados durante la implementación del prototipo, especialmente si se utilizan sistemas de monitoreo y control conectados a redes.

2.5.5. Evaluación Ética Continua:

Realizar evaluaciones éticas continuas a lo largo del proceso de implementación, identificando y abordando cualquier problema ético que pueda surgir.

2.5.6. Colaboración con la Comunidad:

Involucrar a la comunidad local en el proceso de toma de decisiones, escuchando sus inquietudes y asegurándose de que se beneficien de manera equitativa de la automatización.

Al abordar estas consideraciones éticas, se busca garantizar que la implementación del prototipo sea ética, sostenible y beneficiosa para todas las partes involucradas, evitando cualquier impacto negativo innecesario.

2.6 Alcances y limitaciones

En la estructuración del prototipo se lograron evidenciar los siguientes alcances:

2.6.1. Optimización del Proceso de Evaporación:

El prototipo persiguió el objetivo principal de optimizar el proceso de evaporación en la fabricación de panela, mejorando la eficiencia y reduciendo los tiempos de producción, gracias al control de las variables como PH, grados Brix y Temperatura.

2.6.2. Mejora en la Calidad del Producto:

Fue evidente que en cada una de las pruebas de validación del prototipo se reflejó una mejora de la calidad del producto final, puesto que, al controlar la temperatura en función del tiempo, el nivel de PH, fue constante (5,9) y el nivel de grados Brix evidencio mejores resultados al interior del producto, pero además se aseguró propiedades organolépticas consistentes y un contenido de sacarosa adecuado.

2.6.3. Eficiencia Energética:

El control de cada una de las variables al interior del proceso productivo contribuyo aproximadamente a un aumento del 10% de la eficiencia energética en el proceso de evaporación, minimizando el consumo de recursos y reduciendo los costos asociados.

2.6.4. Integración Tecnológica:

Interpretando un alcance adicional se encuentra que el prototipo busca demostrar la viabilidad de la integración de tecnologías modernas, en el caso del uso de Termocuplas, PLC 100, sistemas integrados electrónicos y , como sensores y controladores automáticos, sensores de Temperatura sensores de PH, en el contexto de la fabricación tradicional de panela.

2.6.5. Monitoreo y Control en Tiempo Real:

Otro alcance notorio, como resultado del proceso, es el monitoreo y control de las variables señaladas, Proporcionará capacidades de seguimiento y alertas tempranas al proceso, permitiendo ajustes inmediatos para optimizar el rendimiento del proceso.

2.6.6. Pruebas Piloto Exitosas:

En la Validación del prototipo, las pruebas piloto en la central de mieles del municipio de Útica, validando su funcionalidad en condiciones reales de producción, mostraron con exactitud y detalle cada una de las mediciones.

2.6.7. Capacitación del Personal.

Finalmente, ligado a los alcances obtenidos se brindó una capacitación para el personal involucrado, en términos de las buenas prácticas de Manufactura, para garantizar el cumplimiento de las normas.

Limitaciones:

En términos de las limitaciones halladas en el proceso de construcción del prototipo, se evidencian los siguientes aspectos:

2.6.8. Adaptación a Condiciones Locales:

Se tiene un desafío actualmente y está ligado al tipo de caña panelera que se obtiene en la zona, debido a las condiciones geográficas de los terrenos, lo cual origina jarabes de caña, con mayor y/o menor concentración de azúcares, y en términos del prototipo implica la variabilidad en la mezcla de cierto nivel de PH, lo cual implica la adaptación del prototipo a las condiciones específicas de la central de mieles en Útica, como variaciones en la calidad de la caña de azúcar.

2.6.9. Inversiones Iniciales.

La implementación del prototipo puede requerir inversiones significativas en tecnología y capacitación, lo que podría ser una limitación financiera.

2.6.10. Resistencia al Cambio.

Existe la posibilidad de resistencia al cambio por parte de los trabajadores y la comunidad, lo que podría afectar la adopción y eficacia del prototipo, específicamente cada uno de los operarios de la tolva de evaporación.

2.6.11. Mantenimiento y Soporte Técnico.

Al ser un equipo con elementos de integración tecnológica, implica que la disponibilidad de mantenimiento y soporte técnico podría ser una limitación, especialmente si no hay recursos locales especializados.

2.6.12. Seguridad de Datos:

El proceso de recopilación de datos por parte del PLC 100, puede tener una limitación y está ligada a la seguridad de los datos recopilados y procesados por el prototipo es crucial, y su gestión adecuada puede ser una limitación en términos de recursos y capacidades.

2.6.13. Escalabilidad:

La adaptación del prototipo para su implementación en una escala mayor podría enfrentar desafíos y requerir una planificación adicional.

Al abordar tanto los alcances como las limitaciones, se puede gestionar de manera más efectiva la implementación del prototipo, maximizando los beneficios y mitigando los desafíos potenciales.

Capítulo 3 – Resultados

El proceso de construcción del prototipo de automatización del proceso de evaporación en la producción de panela, implicó seguir una metodología estructurada que permitió el desarrollo eficiente y efectivo del modelo inicial. A continuación, el desarrollo de la metodología para la construcción del prototipo se estableció de la siguiente manera.

Como el objetivo central de la propuesta era el de “*construir un prototipo de automatización del proceso productivo de evaporación para la fabricación de la panela, en la central de mieles ubicada en el municipio de Útica (Cundinamarca)*”, este implicó el desarrollo de tres etapas claves en la consecución de plan de trabajo.

3.1.1. ERA ETAPA. Diseños de Detalle

El objetivo de esta primera etapa es el establecimiento de los diseños de detalle para la fabricación del prototipo, los cuales involucran la articulación de los criterios del estudio de automatización previamente realizado con los resultados de simulación del proceso productivo. En este sentido la ejecución de esta primera etapa se estableció en tres momentos:

3.1.1. Definición de Diseños de Detalle.

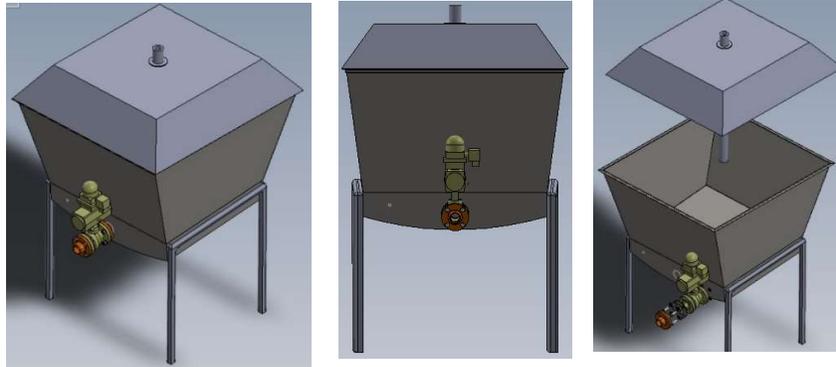
A partir de los criterios de la propuesta de automatización previa al presente estudio, se estableció un prototipo que cumplía con las siguientes características, en términos de equipos en etapa de censado:

Tabla 4 Características de Sensores

Pieza Estructural	Variabes (medir)	Dimensiones	Especificaciones
Sensor de PH	PH Rango Medida de >3.01 a >7.01 Temp. >100 °C	Sonda > 2 metros Dimensión Proporcional Display	PH Móvil con uso de Sonda superior a 2m
Sensor Grados Brix	BRIX Rango Medida de >67° Brix Temp. >100 °C	Sonda > 2 metros Dimensión Proporcional Display	Luxómetro Digital en Línea, que soporte Temp >110°C
Sensor de Temperatura	°C rango Medida de >0°C a >120°C	Termocupla MK-100	Con Sondas adaptables >2m

Fuente. Autor

Figura 14 Diseño Propuesta de Automatización de Tolva de Evaporación



Fuente. Autor.

En términos de las piezas mecánicas de montaje el diseño contemplo los siguientes criterios:

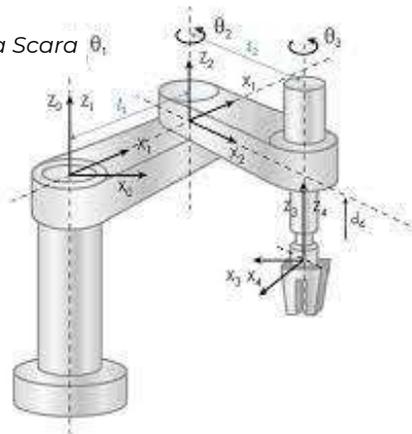
Tabla 5 Definición de criterios en el diseño de Piezas

Pieza Estructural	Material & Forma	Dimensiones	Especificaciones
Brazo Vertical de Enganche a Tolva de Evaporación	Acero Inoxidable AISI 304 (S30400) Rectángulo (4mm x 8mm)	Entre 25cm a 50cm de 360° de Libertad acuerdo a Nivel de Adaptación	PH Móvil con uso de Sónsa superior a 2m
Brazos o Eslabones de extensión	Acero Inoxidable AISI 304 (S30400) Rectángulo (4mm x 8mm)	Eslabones Extensión 270° de Libertad De 27 cm a 67.5cm Dimen. De Tolva	Luxómetro Digital en Línea, que soporte Temp >110°C
Árbol de Sensores	Acero Inoxidable AISI 304 (S30400) Redondo (1 – 3 Pulg)	Long, Profundidad: 89cm Nivel de Inmersión: 19cm	Con Sondas adaptables >2m

Fuente. Autor

De acuerdo, al proceso de caracterización de piezas y dispositivos de medición de variables (Sensores), el diseño que se ajusta mejor a la necesidad de desplazamiento es un robot Scara, el cual contienen una estructura de extensión por medio de eslabones y una base de ajuste, sus grados de libertad oscilan entre los 45° a los 360°, de acuerdo con las necesidades de ajuste

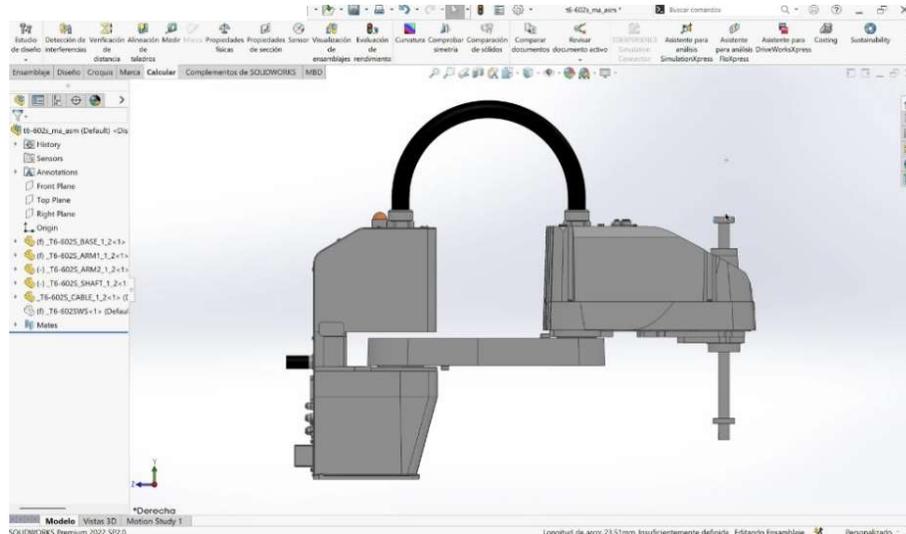
Figura 16 Diseño de la Estructura Scara



3.1.2. Simulación del Proceso de Automatización (Opción 1)

A partir de estas necesidades de diseño y acordes a los procesos de automatización en la Tolva de evaporación, se definió una propuesta inicial de simulación al interior de Solid Works, la cual muestra la articulación de Servomotores desde la base del Scara, allí en la dinámica normal del brazo se encuentran motores y sensores que permiten el movimiento del brazo en el plano horizontal. Seguido a ello en el primer eslabón (Base Rotation), permite el desplazamiento horizontal y dependiendo su dimensión tendrá el alcance al interior de la tolva, seguido a ello se encuentra un 2do servomotor desde el Base Extension, el permite extender y contraer el brazo en el plano horizontal garantizando la amplitud, Finalmente el Eslabón Vertical (Z-Axis), contendrá un desplazamiento vertical gracias a un tercer Servomotor que permitirá la graduación de los niveles de profundidad.

Figura 18 Simulación Brazo Scara



Fuente. Autor

Finalmente, en el extremo del Eslabón Vertical (Z-Axis) se encuentra el Eslabón Final o también conocido End Effector, el cual contiene dos termocuplas en sus extremos y la sonda de PH. En este sentido, al interior del brazo Scara se encuentra cables y extensiones provenientes de las termocuplas y del sensor de PH, los cuales se sumergen al interior del jarabe de caña para enviar sus datos al PLC-100 y desde se pueda visualizar el comportamiento de la temperatura y el PH.

De acuerdo con los procesos de Simulación de estos tres (3) eslabones, se evidencia un alcance de rotación del 89% sobre el Jarabe de Caña que está en proceso de Evaporación, para ello se logran los siguientes grados de Libertad al interior de los eslabones:

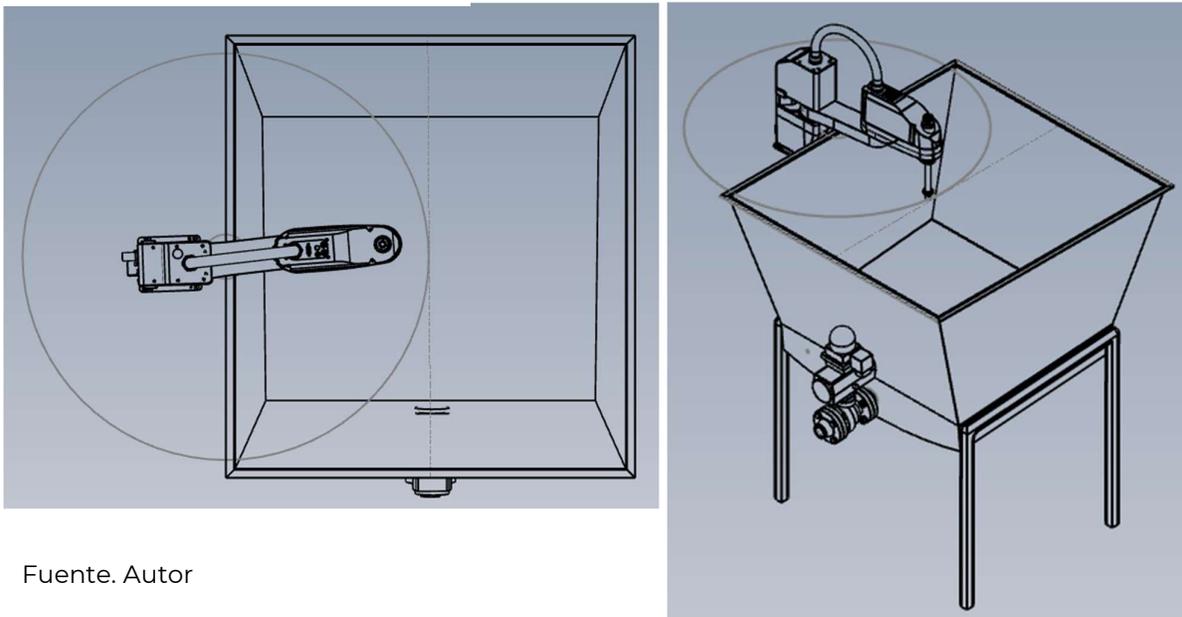
Tabla 6 Grados de Libertar en Eslabones

Tipo Eslabón	Grados de Libertad	Amplitud	Alcance Radial
ES 1. Base Rotation	12°>Rotation>121° Rotación Horizontal	Barre un área 38% del Espacio Tolva	R = 65 cm
Base Extension	12°>Rotation>121° Rotación Horizontal	Barre un área 79% del Espacio Tolva	R = 65 cm
Eslabón Vertical (Z-Axis)	12°>Rotation>121° Rotación Horizontal	Barre en posición Vertical 100%	- No aplica -
End Effector	12°>Rotation>121° Rotación Horizontal	Barre un área 87% del Espacio Tolva	- No aplica -

Fuente. Autor

En lo que corresponde al ensamble entre el “árbol de Sensores” y la tolva o “tache” de Evaporación la simulación contempla, que cada uno de los eslabones horizontales tenga el alcance máximo, en ese sentido la configuración de los eslabones, permitirán alcanzar una mayor distancia, con el fin de garantizar mediciones en diferentes puntos del jarabe de caña en evaporación.

Figura 20 Simulación Árbol de Sensores



Fuente. Autor

3.1.2. Criterios de Automatización.

En consonancia con la estructura definida en el diseño de detalle del prototipo es evidente que las variables a automatizar estarán articuladas al conjunto de sensores indicados y desde allí el nivel de alcance del Scara, será garantía del posicionamiento de nuevas mediciones que permitan monitorear en tiempo real el comportamiento de la Temperatura, el nivel de PH y los grados Brix presentes en el jarabe de caña.

En este sentido es indispensable tener en cuenta los siguientes criterios:

a). Monitoreo y Control de Temperatura:

Para el control de esta variable se ha decidido Implementar sensores de temperatura como tres Termocuplas tipo K de 10cm, con su respectiva punta de prueba para monitorear y controlar la temperatura durante el proceso de evaporación, para poder articular cada una de ellas al sistema PLC-100, con el fin de garantizar la visualización de los resultados.

Figura 22 Sonda de Termocupla PL100



Fuente. Didáctic Electronics.

Para la instalación de esta termocupla es necesario realizar la articulación de sus señales empleando un Conversor RTD PT100 a 4-20mA, el cual garantiza la conversión de los voltajes, por ello la que más se ajusta, a las necesidades de temperatura son:

- Rango de medición: 0°C hasta 200°C
- Salida de señal estándar internacional: 4~20mA
- Para sondas PT-100 de 2 ó 3 hilos
- Precisión: $\pm 0.5\%$ (En toda la escala)
- Máxima salida de corriente: 26mA

b). Nivel de Automatización Gradual.

Planificar una implementación gradual de la automatización para evitar interrupciones en la producción es un primer paso, pero como la automatización inicial está ligada a poder controlar las variables en estudio, en una sola tolva de evaporación para asegurar el control de la temperatura, el PH y los grados Brix, el proceso de producción no se interrumpirá.

Figura 24 Termocupla de Medición



Fuente. Didactic Electronics.

Las pruebas del prototipo se realizan paulatinamente identificando no interferir en las tareas críticas y luego expandirse a otras áreas del proceso.

c). Sensores de PH:

Al interior del “Arbol de sensores”, como se ha denominado al prototipo, se utilizó un sensor para valorar el nivel de PH, el cual permite monitorear y controlar el nivel de acidez del jarabe de Caña con el fin de garantizar la mejor calidad en la producción de la Panela. Se implemento un sensor Hanna HI98161, el cual es un PH metro portátil de flujo continuo que valora muestra entre los 0°C y los 125°C, la Implementación de este sensor garantiza un flujo constante del jarabe de caña a través del proceso y permite la toma de decisiones en la estabilización del PH en el proceso.

Figura 26 PH-metro Portatil Hanna Instrument



Fuente. Didactic Electronics.

Las especificaciones técnicas cumplen con los criterios de producción del jarabe de Caña, las cuales son:

Tabla 7 Especificaciones Técnicas del PH-metro

pH	Rango	-2.0 a 20.0 pH; -2.00 a 20.00 pH; -2.000 a 20000 pH
	Resolución	0.1 pH; 0.01 pH; 0.001 pH
	Precisión	±.1; ±0.002 pH
	Calibración	Hasta 5 puntos de calibración, siete estándar buffers disponibles (1.68, 4.01, 6.86, 7.01, 9.18, 10.01, 12.45) + cinco buffers personalizados
mV	Rango	±2000 mV
	Resolución	0.1 mV
	Precisión	±0.2 mV
Temperatura	Rango	-20.0 a 120.0°C (-4.0 a 248.0°F)
	Resolución	0.1°C (0.1°F)
	Precisión	±0.4°C (±0.8°F) (excluyendo error de la sonda)
	Compensación por temperatura	-20.0 a 120.0°C (-4.0 a 248.0°F)
Especificaciones Adicionales	Electrodo / sonda	FC2023 Foodcare cuerpo PVDF, electrodo de pH con sensor interno de temperatura, conector rápido DIN y 1m (3.3' cable)
	Pendiente de Calibración	de 80% a 110%
	Registro de datos	200 muestras (100 de pH y 100 de temperatura)
	Conexión a PC	USB opto aislado con software HI 92000 y cable MicroUSB
	Impedancia de entrada	10 ¹² Ω
	Tipo de batería / Vida	Baterías AA 1.5V (4) / aproximadamente 200 horas de uso continuo sin iluminación (50 horas con iluminación)
	Auto apagado	Seleccionable 5, 10 30, 60 min o deshabilitado
	Ambiente	0 a 50°C (32 a 122°F); RH 100% IP67
Dimensiones / Peso	185 x 93 x 35.2 mm (7.3 x 3.6 x 1.4") / 400 g (14.2 oz.)	

Fuente. Didactic Electronics.

d). Control de Tiempo y Velocidad:

Las mismas termocuplas Incorporadas, permiten controlar el tiempo y la velocidad del flujo permitiendo que la evaporación este de acuerdo con los estándares de producción. Puesto que si se logra controlar la velocidad y tiempos de los equipos de evaporación se puede hablar de optimizar la eficiencia y la calidad del producto.

Figura 28 Conversor de Voltaje



Fuente. Didactic Electronics.

e). Integración de Alarmas y Alertas:

Al interior del PLC-100 se configura un sistema de notificación, para los intervalos de temperatura permitidos en el proceso de evaporación (115°C – 120 °C), establecer un sistema de alarmas para notificar sobre posibles problemas o desviaciones en el proceso.

Integrar alertas para informar sobre mantenimiento preventivo y situaciones de emergencia.

f). Interfaz de Usuario Intuitiva:

El Desarrollo de la interfaz de usuario por el momento es predeterminada del entorno del PLC-100, aunque es amigable pues permite a los operadores supervisar y controlar el proceso de manera efectiva, es necesario a futuro desarrollar otro tipo de interfaz que se adapte a las necesidades de los sensores y del prototipo.

Figura 30 Interfaz de PLC-100



Fuente. Didáctic Electronics.

3.1.2. 2DA ETAPA. Construcción del Prototipo

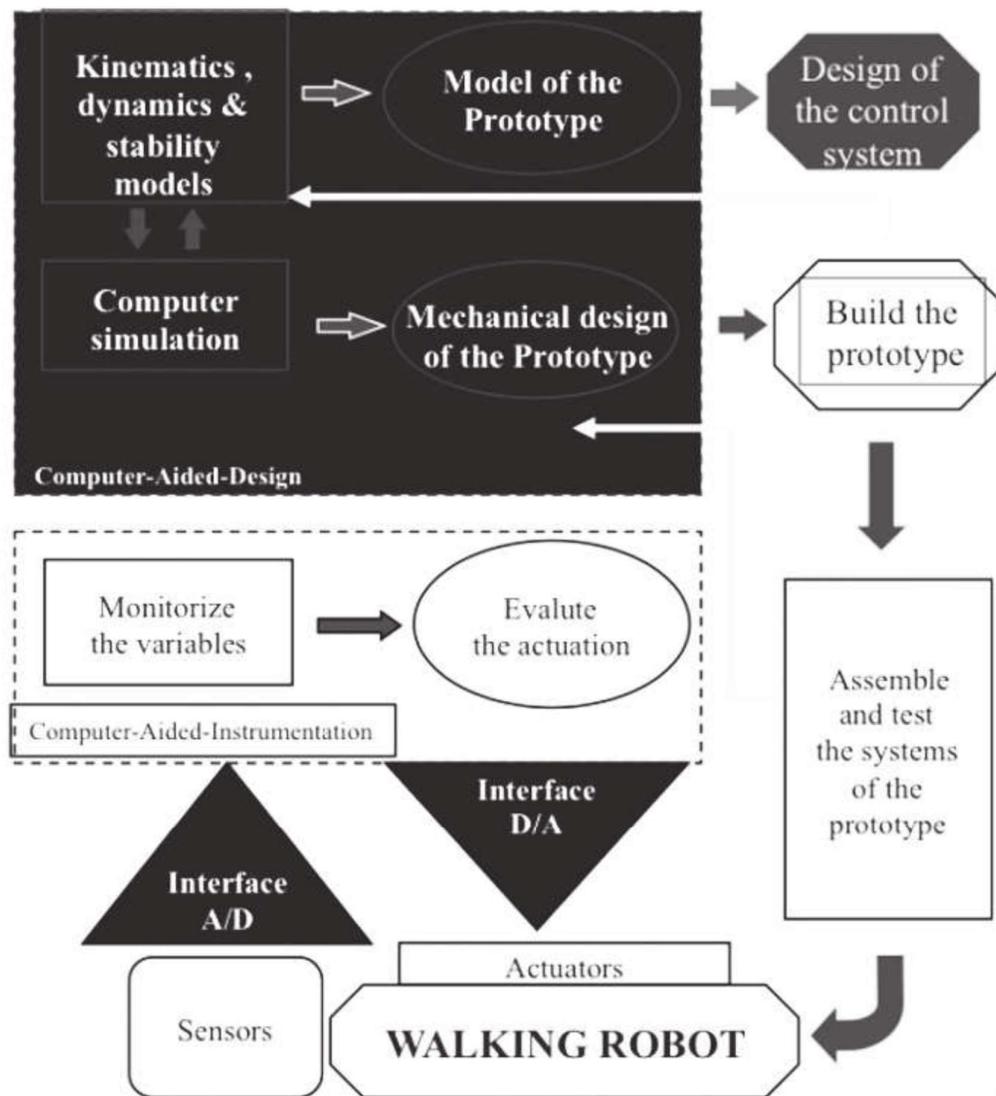
En la construcción del prototipo de automatización se empleó la Metodología en Mecatronica de Corrostieta¹, esta metodología implementada en las academias de educación superior en Latinoamérica y

¹ Efrén Corrostieta: Electronics Engineer, ITESO, Mexico. Ph.D. in Mechatronics Engineering, CIDESI, Mexico. Affiliation: Professor at the Autonomous University of Queretaro, Mexico. E-mail: efrengorrostieta@gmail.com

Colombia se estructura en tres grandes grupos. El primero se basa en la parte formal y teórica del proyecto desarrollado. El segunda es la parte de construcción e implementación. Y la última parte es la de evaluación y medición. Normalmente, se observa que cuando un desarrollo no se realiza bajo una metodología determinada, se trabaja directamente a nivel de construcción y a nivel de implementación.

Por consiguiente, la estructura que se siguió en el desarrollo de la construcción del prototipo fue la siguiente:

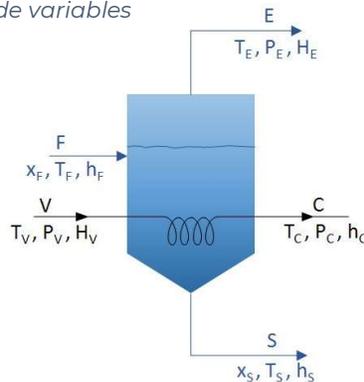
Figura 32 Estructura Metodológica en el desarrollo de Prototipos



3.1.2.1 Modelos cinemáticos, dinámicos y de estabilidad:

En este primer momento ejecutado por parte de los investigadores se retomó el modelo de optimización establecido en investigaciones anteriores el cual se estableció como: De allí que es necesario tener en cuenta parámetros del proceso como el área de intercambiador necesaria para la evaporación, para determinar dicha área se tuvo en cuenta el balance entre materia (162 Litros) y energía. En el caso específico del evaporador que se propone este recibirá una corriente F y dará paso a dos salidas (S,E), la primera de ellas una corriente (S) con el jarabe de caña concentrado y la segunda (E), con el vapor de salida

Figura 34 Estructura de Modelo de variables



Fuente. (Condorchem Envitech, 2021)

Por consiguiente, para poder establecer, estos balances de materia y energía, es necesario primero calcular el balance de materia global(F), el cual está determinado como: $F = E + S$ donde el nivel de Vapor $V = C$ (Condensación), ahora será indispensable asumir el nivel de materia proveniente del soluto, el cual es equivalente al doble de la entrada de materia $F \times F = S \times S$, Finalmente, los balances de energía se establecen de acuerdo con volumen entrante en términos de la Temperatura, la presión y la altura, es decir que el caudal de calor transmitido será proporcional a la diferencia del producto entre el volumen y su altura y el producto entre el calor específico, por tanto se asume:

$$V HV + F hF = C hC + E HE + S hS$$

$$Q = V HV - C hC = V (HV - hC) = U A \Delta T$$

Q: caudal de calor transmitido a través de la superficie de calefacción del evaporador.

U: el coeficiente global de transferencia de calor.

A: el área necesaria para la evaporación

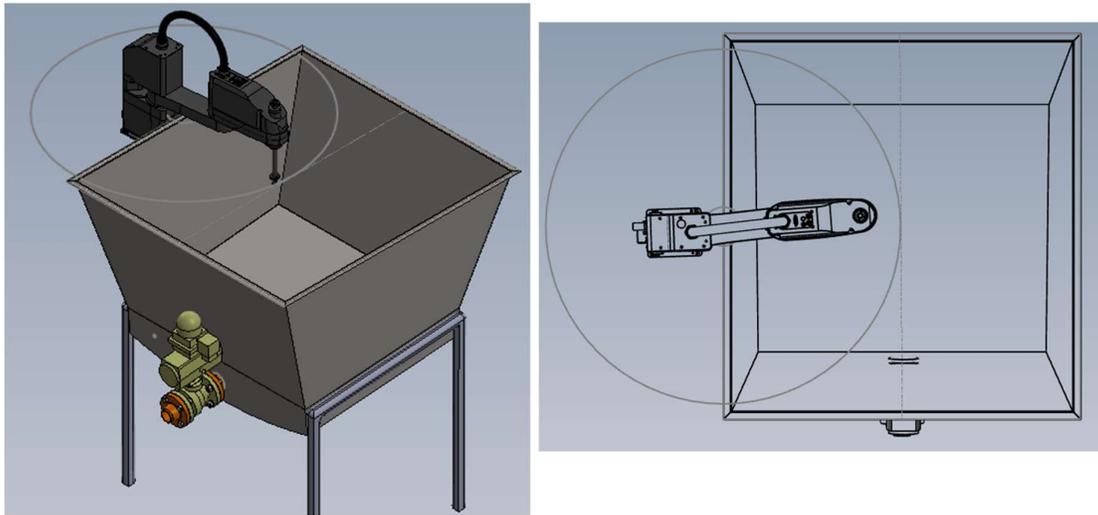
ΔT : la diferencia de temperaturas entre el agente calefactor y el líquido a evaporar

3.1.2 Simulación del Prototipo.

El proceso de simulación del prototipo se desarrolló al interior de solid Works, en el cual se diseñaron cada una de las piezas que conforman el modelo, la simulación contiene la articulación de las piezas de un modelo Scara, en este se validaron criterios como:

- + Dimensiones de las piezas y apertura de barrido de los eslabones
- + Configuración de grados de Libertad.

Figura 36 Simulación de Árbol de Sensores



Fuente. Autor

El Diseño y simulación de cada una de las piezas al interior de solid work, permitió establecer criterios de ajuste de las piezas a la tolva de evaporación, en este sentido, se simularon piezas al detalle como: las válvulas de salida en las cuales se observa una configuración funcional propuesta para este tipo de tolvas, que implican el uso de válvulas laterales que sean controladas por un sistema de regulación, ya sea manual o automático. En este sistema, se validarán variables como el volumen del flujo y la temperatura. La vinculación temprana de estas variables en el sistema de control asegura la estabilidad del proceso productivo, permitiendo la regulación de aspectos como el uso de antiespumante, el porcentaje de humedad en la mezcla, los grados Brix y, por ende, el grado de concentración de los azúcares reductores. En otras palabras, al regular los volúmenes de entrada y salida de fluido, se garantiza la estabilidad de las demás variables del sistema.

Figura 38 Diseño y Simulación de Válvulas + fluido (temperatura) (Input – Output)



Fuente. Autor

Dada la falta de medidas y regulación de variables críticas como los grados Brix, el pH, el porcentaje de humedad y la temperatura, es esencial establecer una estructura funcional en las tolvas para garantizar la calidad de la panela granulada. En este contexto, se propone la implementación de un "Sensor tree" que incorpore una sonda para medir la temperatura del fluido, un sensor para medir el pH y otro para medir los grados Brix en el flujo. Estos dispositivos estarán conectados a un panel de control único que mostrará los datos de comportamiento y permitirá regular aspectos como la temperatura y la presión en la caldera del sistema.

La base de este sistema es un dispositivo de aleación de metal que alberga una sonda para medir la temperatura y el pH, junto con un sensor Inmec Modelo G2. Este último es un sensor de flujo digital mediante microondas aplicable para sólidos disueltos y suspendidos en un rango de 0-95%. En resumen, la simulación de este dispositivo se asemeja a un "pequeño intercambiador de fluidos"

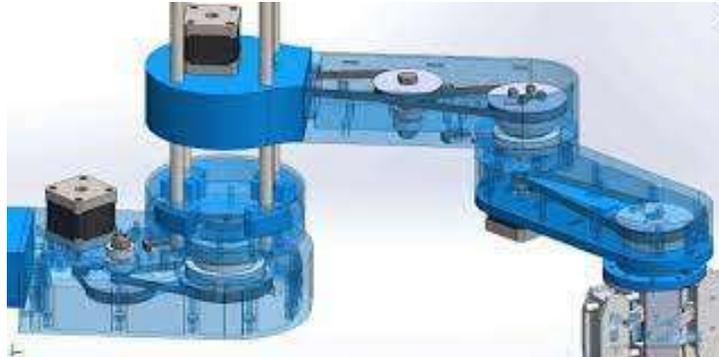
Figura 40 Diseño y Simulación de sensor tree



Fuente. Autor.

Por lo tanto, este "Sensor tree" estará conectado al panel de control, permitiendo la transmisión en tiempo real de los datos medidos de las variables. De esta manera, el operario estará capacitado para tomar decisiones en relación con los aditivos y los elementos manuales de operación, especialmente en lo que respecta a la concentración del jarabe de caña.

Figura 42 Simulación de Brazo Scara



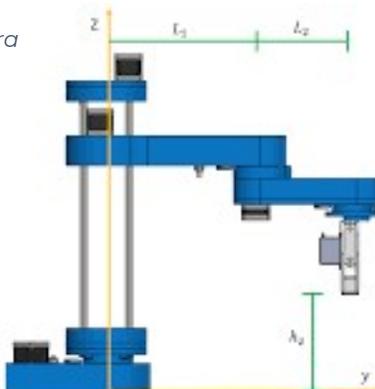
Fuente. Autor.

Finalmente, en lo que concierne con la estructura general del prototipo, se realizó la simulación de movimiento de cada uno de los eslabones de extensión y se validó la carga estructural de cada uno ellos con relación a la velocidad de movimiento del sistema, lo anterior con el fin de garantizar que el diseño mecánico del prototipo sea funcional, la simulación se generó con servomotores que lograron el desplazamiento de las piezas.

3.1.2.3. Diseño mecánico del prototipo.

En la implementación de este diseño mecánico, se tubo en cuenta el criterio de articulación de un brazo Scara por medio de rodamientos, para ello fue indispensable asumir los criterios de ensamble de la articulación de un Scara, el cual señala:

Figura 44 Diseño de Brazo Scara



Fuente. Autor

Que cuando se emplea una articulación por rodamientos es porque se busca emplear un mecanismo que permita el movimiento relativo controlado entre dos partes o componentes de la estructura, estos ayudan además a reducir la fricción entre las superficies en contacto y generar un movimiento en dos dimensiones.

Además, la estructura de articulación por rodamientos se incorpora en la estructura con el fin de generar un movimiento unificado.

En este tipo de mecanismos es indispensable la lubricación de los ejes y el ajuste del rodamiento a las piezas.

Figura 46 Estructura de Ensamblajes Mecánicos



Fuente. Autor.

Otro aspecto clave en el diseño mecánico, es la definición de las dimensiones de las piezas, proporcionales al esfuerzo que realizara los cojinetes y la posición de ensamble que asuma el sistema.

Para ello fue necesario realizar el cálculo de carga la cual asume un valor de 125kN.

Figura 48 Estructura de Funcionamiento de cojinetes



Fuente. Diseño de cojinetes (2019)

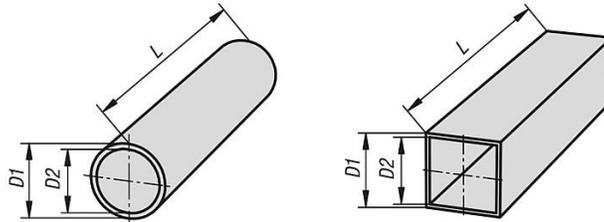
3.1.2.4. Construcción del prototipo.

En el proceso de construcción del prototipo se consolidó inicialmente la construcción de la estructura de cada uno de los eslabones del “árbol de Sensores”, para ello se emplearon los tubos de acero Inoxidable con un perfil de 40mmX80mm, con los cuales se realizaron las siguientes actividades:

a). Dimensionamiento de Material

Se identificó el tipo de perfil a emplear para la construcción de los eslabones del prototipo, validando perfiles circulares para las posiciones verticales con diámetros $D1=18\text{mm}$ // $D2=16,3\text{ mm}$ y perfiles rectangulares de $D1=40\text{mm}$ y $D2=80\text{mm}$. Además, se ratificó el tipo de material en acero Inoxidable.

Figura 50 Perfiles Estructurales para brazo Scara



Fuente. Autor.

b). Corte del Material.

Se realizaron los respectivos dimensionamientos de las piezas, definiendo la extensión de estas de acuerdo con los diseños establecidos, además se realizaron las respectivas marcaciones del material, con el fin de garantizar ajustes satisfactorios en la articulación de los cojinetes, para ello se emplearon máquinas de corte en CNC, las cuales bajo las especificaciones del diseño se procedieron a calibrar.

Figura 52 Corte en CNC de perfiles estructurales



Fuente. Autor

c). Ensamble de Piezas.

Se realizaron los ensambles en cada una de las piezas articulando los cojinetes en sus respectivas ranuras de operación y se soldaron a los espacios indicados, además se definieron los grados de libertad que se debían ajustar para lograr el mayor alcance en su desplazamiento.

Figura 54 Ensamble de Piezas Scara



Fuente. Autor.

3.1.2.5. Ensamble Electronico del prototipo.

Se procedió a realizar los ensambles de cada uno de los sensores al interior de la estructura, conectando las termocuplas y los sensores en el proceso.

Figura 56 Montaje de Componentes Electronicos prototipo



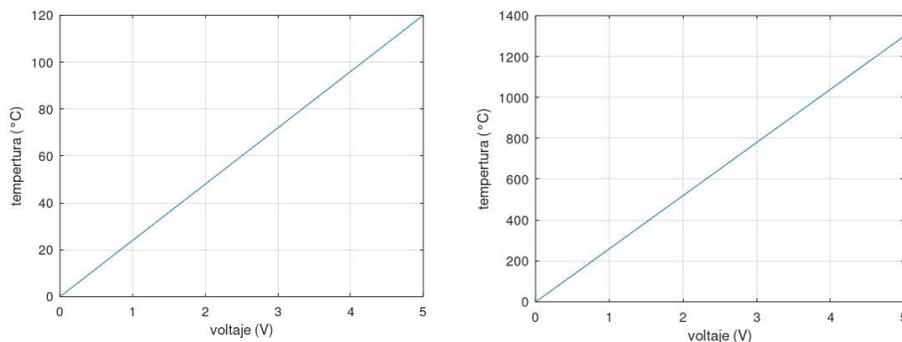
Fuente. Autor

El sistema de medición de variables está compuesto por los siguientes sistemas:

- Sensores: Se usa una resistencia RTD Pt-100, un termopar tipo K y un termopar tipo J para medir temperatura. Asimismo, se tiene también un sensor de pH.
- Una RTD o Resistencia Dependiente de la Temperatura (RTD, por sus siglas en inglés), como su nombre lo indica, es una resistencia cuyo valor varía dependiendo de la temperatura a la que esté expuesta. En cambio, los termopares consisten en dos metales que generan una pequeña diferencia de potencial cuando se encuentran sometidos a una determinada temperatura. El tipo de termopar se seleccionó usando el rango más parecido al de la operación del proceso de enfriado de la paila (de 115°C a temperatura ambiente, que puede estar entre 23 y 30°C, dependiendo del lugar y estado del tiempo)
- Transmisores 4-20mA: Su función consiste en amplificar la señal de los sensores de temperatura a un rango de valores que son normalmente usados en la industria de procesos (señales de corriente de 4-20mA, 24VDC). Esto se realiza porque es necesario amplificar las señales de los sensores de temperatura. Aunque inicialmente la idea era conectar la salida de estas tarjetas a un computador industrial (Controlador Lógico Programable o PLC). Sin embargo, luego se determinó que los PLC disponibles en la ETITC no tenían entradas compatibles con los transmisores, por eso se cambió el sistema para almacenar los datos. Se usó la escala predeterminada. Los transmisores también tienen como función linealizar la respuesta de los sensores de temperatura, ya que en realidad la respuesta de los sensores no es lineal con los incrementos de temperatura. En este caso, se solicitó al fabricante de la RTD Pt-100 que calibrara el transmisor a una temperatura entre 0 y 120°C y se usaron los rangos predeterminados de los transmisores de los termopares J y K , respectivamente.

- Convertidores 4-20mA a 5V: Estas tarjetas convierten la señal de corriente a un voltaje que puede ser leído por el sistema de adquisición de datos. Fue necesario calibrar los valores usando los potenciómetros de ajuste.
- Sistema de adquisición de datos: Consiste en una tarjeta de adquisición de datos National Instruments NI-6009 USB. Esta se encarga de leer los voltajes de los convertidores de 4-20mA y la señal se convierte en un dato. Una aplicación desarrollada en el lenguaje de programación LABVIEW., se encarga de leer los datos de la tarjeta de adquisición de datos, visualizar los datos y almacenar los datos en un archivo en EXCEL. El programa multiplica la señal adquirida por una constante, para que el dato se muestre y almacene en grados centígrados. En este caso, se ajustó la escala tanto del transmisor como del convertidor corriente-voltaje. Las siguientes gráficas muestran la temperatura en función de la salida de voltaje.

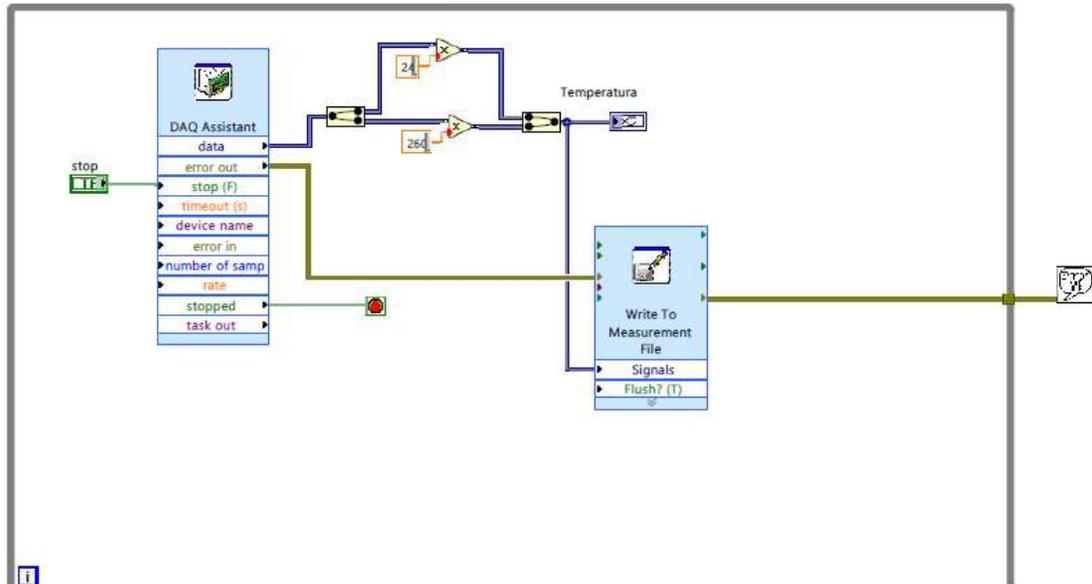
Figura 58 Respuesta calibrada RTD PT-100



Fuente. Autor

Al ajustar que el valor mínimo sea de 0V a 0°C, sólo se hace necesario hallar la pendiente de la recta, por lo cual sólo se debe multiplicar el valor medido de voltaje por una constante y se obtendría el valor en grados centígrados. Para ajustar los valores de corriente y voltaje mínimos, se sumergieron los sensores en un recipiente con hielo y con agua caliente, cercanos a los valores extremos.

Figura 60 Plano de Diseño Electronico



Fuente. Autor

El sensor de pH funciona de forma independiente, aunque es posible tomar registros usando un puerto USB y realizando una comunicación serial. El sensor se calibró en la visita realizada el 2 de diciembre de 2022.

Resultados:

El sistema de medición de temperatura y pH funciona de forma exitosa, aunque las mediciones de temperatura de las termocuplas fluctúan un poco más porque la constante por la que se multiplica la señal del sensor es más alta y esto puede generar algunos errores en las medidas. Cabe anotar que en el momento de calibrar los sensores, es importante que buena parte o todo el sensor está completamente sumergido, ya que esto puede ocasionar ligeros errores y desfases en la medición de temperatura, ya que entre más largo sea el sensor, la transferencia de calor es más lenta y el sensor va a detectar el valor promedio de toda el tubo del sensor, por lo que si una parte del tubo está a temperatura ambiente y la otra mitad sumergido en el líquido caliente, el sensor dará un valor intermedio entre las dos temperaturas y, a pesar de que el tubo es de acero inoxidable, es posible que el tubo no incremente su temperatura de forma homogénea, lo cual puede ocasionar errores de medición.

3.1.2.6. Pruebas del prototipo.

Se realizan las primeras pruebas de adaptabilidad del prototipo a la tolva de evaporación validando las medidas de ajuste de las piezas y se realiza la graduación de las piezas verticales a las alturas y profundidades del proceso productivo.

Figura 62 Montaje de Prototipo en Tolva de Evaporación



Fuente. Autor

Y luego se valida la configuración de los sensores de PH y termocuplas validando las configuraciones en el PLC-100 y verificando el comportamiento de los mismo desde la interfaz.

Figura 64 Pruebas Piloto en PH y configuración



Fuente. Autor

Finalmente, en el proceso de prueba y validación de variables de funcionamiento en los sensores se realizó el levantamiento de los datos de temperatura y PH, a partir del árbol de Sensores.

En esta primera prueba se validó el comportamiento del PH, en un histórico de tiempo, donde se observa el decaimiento del PH, a medida que se aplica el clarificante al interior del jarabe de caña, lo cual permite inferir que el sensor es sensible a los cambios fisicoquímicos del proceso de evaporación.

Figura 66 Pruebas Piloto en la Tolva de evaporación



Fuente. Autor

Finalmente, se realizan las validaciones de las termocuplas, verificando que las mediciones de temperatura muestren el punto de conversión adecuado entre el voltaje y los grados Celsius y que estos resultados permiten interpretar la exactitud entre la temperatura medida y el voltaje alcanzado en el sensor.

Figura 68 Pruebas finales con Termocuplas en Tolva de Evaporación



Fuente. Autor

Al cierre de este proceso de prueba se establece como satisfactorio el resultado de implementación del prototipo, y se realiza la primera descarga de datos de forma continua, los cuales queda alojados en el PLC-100 de la Interfaz y desde allí son exportados para su análisis y confrontación a futuro con los modelos establecidos previamente.

Capítulo 4 – Conclusiones

4.1 En términos del cumplimiento del objetivo general de la investigación fue evidente que la construcción del prototipo para el proceso de evaporación en la fábrica de panela en la central de mieles del municipio de Útica, permite controlar en tiempo real, los niveles de variabilidad de la temperatura y el PH, durante el periodo de tiempo del ciclo de evaporación del jarabe de caña, allí es importante resaltar el impacto que dichos prototipo alcanza al poder indicar desde el PLC-100 los niveles de Ph y temperatura alcanzados en el lote de producción, lo cual de acuerdo al modelo de optimización de las variables, muestra una alerta al operario de la caldera, con el fin de regular estas variables y así garantizar la calidad del producto panelero obtenido. Por tanto, la implementación de este árbol de sensores muestra la efectividad de los sistemas de automatización en la mejora de los procesos de producción agroindustrial.

4.2 Ligado a la Línea de Investigación del GIGCIC de la Facultad de Ingeniería es evidente que el desarrollo del presente prototipo, busca abrir la puerta al desarrollo de un mayor número de iniciativas en la Gestión e Innovación Tecnológica Sustentable, puesto que promueve una mejora al proceso productivo de elaboración de la panela molida, gracias a una innovación por medio de la automatización en el control de variables de producción, lo cual es coherente con el ODS Objetivo No.9, que garantiza el desarrollo y crecimiento de la industria, por medio de iniciativas que promuevan la mejora y el crecimiento productivo de pequeñas comunidades.

4.3 El impacto de esta propuesta investigativa se orienta en tres aspectos claves, primero un impacto social en el cual las familias y microempresas afiliadas a ASPRUT, percibirán desde la implementación de este sistema, mayores ordenes de pedido, que implican una mejora en los ingresos de su cadena productiva, a medida que se optimizan los tiempos de producción, pero sobre todo la calidad para la comercialización del producto. Un segundo impacto esta ligado a la Innovación tecnológica – sostenible, que este “Árbol de Sensores”, trae, al poder controlar las variables operativas de evaporación de la panela, se garantiza una continuación del proceso productivo minimizando el uso de recursos naturales para la movilización de la caldera de evaporación, es decir, que entre mas optimo sea el proceso de evaporación, menor serán los tiempos que permanezcan encendido la caldera y el uso de recursos naturales se minimiza.

4.4 La producción generada en el desarrollo de la investigación converge en la materialización de un prototipo que se convierte en una puerta de entrada a una innovación tecnológica que tiene como visión la automatización total del proceso de evaporación de las mieles en la elaboración de la panela.

Tipología	Cantidad	Detalle	Autores²
Nuevo Conocimiento	1	Capítulo de Libro (Memorias Eventos se Publicarán 2024)	Jonny Rafael Plazas Alvarado Hugo Gaspar Hernández Palma Sergio Enrique Ramírez Eduardo May Osio Ramiro González Horta Gerardo Israel De Atocha Pech
	1	Artículo de Publicación en revista: “Journal of Environmental Chemical Engineering” Tipo Q2	Jonny Rafael Plazas Alvarado Hugo Gaspar Hernández Palma
	1	Un Technological Tools Based on Artificial Intelligence in the Sugar Industry: A Bibliometric Analysis and Future Perspectives for Energy Efficiency Fecha de publicación 2023/12/17 Revista. LADEE; Volumen 4; Número 2, Páginas. 49-64	Jonny Rafael Plazas Alvarado Hugo Gaspar Hernández Palma

² Para productos de formación del Recurso Humano, se deben precisar los investigadores o colaboradores responsables del asesoramiento, dirección o gestión de esos productos.

Desarrollo Tecnológico e Innovación	1	Certificado en Innovación Empresarial	Jonny Rafael Plazas Alvarado Hugo Gaspar Hernández Palma Sergio Enrique Ramírez Eduardo May Osio Ramiro González Horta Gerardo Israel De Atocha Pech Caraveo
Apropiación Social	1	Ponencia en Evento <i>"Aplicación de la industria 4.0 en el sector Panelero: Estudio bibliométrico"</i> , presentado en el II Congreso internacional de investigación y I encuentro de semilleros, evento académico el cual fue organizado por la Universidad Autónoma de Ica y se llevó a cabo los días 23 y 24 de octubre en la ciudad de Ica.	Jonny Rafael Plazas Alvarado Hugo Gaspar Hernández Palma
Convocatoria Ibero	1	Informe Final	Jonny Rafael Plazas Alvarado Hugo Gaspar Hernández Palma
	1	RAI	Jonny Rafael Plazas Alvarado Hugo Gaspar Hernández Palma

sumado a este, se obtuvieron productos de nuevo conocimiento como una bibliometría en la exploración de los conceptos de aplicación y un artículo resultado de investigación que sintetiza el proceso de automatización y control de las variables, como la participación en escenarios de socialización de los resultados de la investigación.

4.5 Queda abierta la puerta para una línea de investigación en automatización de procesos agroindustriales en la cual converjan investigadores de diferentes programas de formación profesional, como Ingenieros de Software, Ingenieros mecatrónicos, ingenieros ambientales y demás que desde su disciplina aportan en la consolidación de una visión por el fortalecimiento de las cadenas productivas de nuestros campesinos, que ven en la Universidades la oportunidad de un mejor mañana.

Referencias

Bolaji, A. L., Adeoti, O., & Adeyanju, A. A. (2018). Automation in Food and Beverage Industry: Its Impact on Employees and Organizational Performance. *Journal of Automation and Control Engineering*, 6(6), 409-416.

Groover, M. P. (2001). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. Prentice Hall.

Ramírez, A., Sotolongo, M., & Mendoza, M. (2015). Proceso de elaboración de la panela. *Centro Azúcar*, 42(2), 77-82.

Bequette, B. W. (2003). *Process Control: Modeling, Design, and Simulation*. Prentice Hall.

Zhang, H., & Liu, Y. (2011). Design and implementation of a SCADA system: A case study of a wastewater treatment plant. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(3), 428-438.

Barbosa, R. M., Batista, B. L., Barião, C. V., Varriquer, R. M., Coelho, V. A., Campiglia, A. D., & Barbosa Jr, F. (2015). A simple and practical control of the authenticity of organic sugarcane samples based on the use of machine-learning algorithms and trace elements determination by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Food chemistry*, 184, 154-159.

Bocca, F. F., & Rodrigues, L. H. A. (2016). The effect of tuning, feature engineering, and feature selection in data mining applied to rainfed sugarcane yield modelling. *Computers and electronics in agriculture*, 128, 67-76.

Fernandes, A. R. M., Sampaio, A. A. M., Henrique, W., Perecin, D., Oliveira, E. A. D., & Túllio, R. R. (2007). Avaliação econômica e desempenho de machos e fêmeas Canchim em confinamento alimentados com dietas à base de silagem de milho e concentrado ou cana-de-açúcar e concentrado contendo grãos de girassol. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 36, 855-864.

Ferraro, D. O., Rivero, D. E., & Ghera, C. M. (2009). An analysis of the factors that influence sugarcane yield in Northern Argentina using classification and regression trees. *Field crops research*, 112(2-3), 149-157.

Kaab, A., Sharifi, M., Mobli, H., Nabavi-Pelesaraei, A., & Chau, K. W. (2019). Combined life cycle assessment and artificial intelligence for prediction of output energy and environmental impacts of sugarcane production. *Science of the Total Environment*, 664, 1005-1019.

Kamzon, M. A., Abderafi, S., & Bounahmidi, T. (2016). Promising bioethanol processes for developing a biorefinery in the Moroccan sugar industry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(45), 20880-20896.

Karri, R. R., Sahu, J. N., & Meikap, B. C. (2020). Improving efficacy of Cr (VI) adsorption process on sustainable adsorbent derived from waste biomass (sugarcane bagasse) with help of ant colony optimization. *Industrial Crops and Products*, 143, 111927.

Weckwerth, W. (2011). Green systems biology—from single genomes, proteomes and metabolomes to ecosystems research and biotechnology. *Journal of proteomics*, 75(1), 284-305.

Yang, W., Li, Z., Wang, J., Wu, P., & Zhang, Y. (2013). Crop yield, nitrogen acquisition and sugarcane quality as affected by interspecific competition and nitrogen application. *Field Crops Research*, 146, 44-50.

Zafar, M., Kumar, S., Kumar, S., & Dhiman, A. K. (2012). Artificial intelligence based modeling and optimization of poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) production process by using *Azohydromonas lata* MTCC 2311 from cane molasses supplemented with volatile fatty acids: a genetic algorithm paradigm. *Bioresource technology*, 104, 631-641.