

Sistema automatizado de tamiz perforado basculante para el pretratamiento de aguas residuales cárnicas basado en diseño conceptual y caracterización hidráulica

RESUMEN: El manejo ineficiente de los residuos sólidos generados por la industria cárnica provoca obstrucciones y sobrecargas en las unidades de tratamiento de aguas residuales, lo que disminuye su eficiencia, incrementa los costos operativos y compromete la sostenibilidad del sistema. Ante esta problemática, se propone el diseño conceptual y dimensionamiento técnico de un sistema automatizado basado en un tamiz perforado basculante para la retención temprana de sólidos durante el pretratamiento.

Se realizó una caracterización hidráulica del efluente, obteniendo un volumen total de 12.0 m^3 en un periodo de 4 horas, un caudal promedio de 0.833 L/s , una masa de sólidos retenidos de 30.50 kg y un factor de punta de 2.67, lo que evidencia un régimen de descarga altamente intermitente. Con base en estos datos, se desarrolló un sistema automatizado que integra un sensor óptico de distancia tipo ToF, una válvula motorizada y un motor a pasos para la ejecución del ciclo de limpieza.

Adicionalmente, se realizó un análisis preliminar de diseño mecánico que permite estimar las condiciones de operación bajo carga máxima, estableciendo criterios para la selección de componentes y la viabilidad técnica del sistema. El sistema propuesto busca reducir la acumulación de sólidos gruesos, facilitar el mantenimiento y mejorar el desempeño hidráulico del pretratamiento.

Este trabajo constituye una base para el desarrollo e implementación de sistemas automatizados de bajo costo en mataderos de pequeña escala, proponiendo como trabajo futuro la validación experimental del prototipo en condiciones reales de operación.

PALABRAS CLAVE: Automatización, Pretratamiento, Industria cárnica, humedales construidos.



Colaboración

Diego Armando Bravo Foglia; Obed Oropeza Morales; Víctor Eliasib Pérez Méndez; Humberto Raymundo González Moreno; Jesús Castellanos Rivera, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 12 de diciembre de 2025

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2025

ABSTRACT: The inefficient management of solid waste generated by the meat industry causes blockages and overloads in wastewater treatment units, reducing their efficiency, increasing operational costs, and compromising system sustainability. To address this issue, the conceptual design and technical sizing of an automated system based on a tilting perforated screen for early solids removal during pretreatment is proposed.

A hydraulic characterization of the effluent was conducted, obtaining a total volume of 12.0 m^3 over a 4-hour period, an average flow rate of 0.833 L/s , a retained solids mass of 30.50 kg , and a peak factor of 2.67, indicating a highly intermittent discharge regime. Based on these results, an automated system was developed integrating a time-of-flight (ToF) optical distance sensor, a motorized valve, and a stepper motor to perform the cleaning cycle.

Additionally, a preliminary mechanical design analysis was carried out to estimate operating conditions under maximum load, establishing criteria for component selection and supporting the technical feasibility of the system. The proposed system aims to reduce coarse solids accumulation, facilitate maintenance, and improve the hydraulic performance of the pretreatment stage.

This work provides a basis for the development and implementation of low-cost automated systems for small-scale slaughterhouses, proposing experimental validation of the prototype under real operating conditions as future work.

KEYWORDS: Automation, Pretreatment, Meat Industry, Constructed wetlands.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales en mataderos representa un reto ambiental significativo debido a su elevada carga de materia orgánica, grasas y sólidos gruesos, los cuales reducen la eficiencia de los sistemas de depuración y aceleran la colmatación de humedales construidos [1][2][3]. Como se observa en la Figura 1, la rejilla de desbaste del matadero municipal presenta colmatación severa por sólidos orgánicos, lo que evidencia la necesidad de implementar un sistema de limpieza más eficiente.



Figura 1. Estado actual de la rejilla de desbaste del matadero municipal, donde se observa colmatación severa por sólidos orgánicos.

Fuente: Elaboración propia.

Además, el cumplimiento de normativas como la NOM-001-SEMARNAT-2021 exige implementar procesos de pretratamiento más eficaces para prevenir obstrucciones, proteger las unidades posteriores y garantizar la calidad del efluente descargado [4][5].

El desbaste mediante tamices perforados constituye la primera barrera de protección en el tratamiento de aguas residuales, especialmente en mataderos donde una parte importante de los sólidos no ingresa únicamente por arrastre hidráulico, sino que es arrojada o cae directamente desde la parte superior del canal durante las actividades de sacrificio [7]. Esta deposición vertical provoca acumulaciones rápidas que, sin una limpieza frecuente, generan obstrucciones y sobrecargas en las unidades posteriores, acelerando la colmatación de los humedales construidos [3][6][7]. La automatización del proceso de desbaste permite mantener una limpieza continua, mejorar la eficiencia hidráulica del pretratamiento y prolongar la vida útil del sistema, además de reducir la intervención operativa y el mantenimiento asociado [8][9].

En el ámbito local, el matadero municipal de Misantla, Veracruz, presenta una elevada generación de sólidos orgánicos por caída directa durante las faenas de sacrificio, lo que favorece la colmatación temprana de las unidades de desbaste y compromete el desempeño hidráulico del sistema de tratamiento.

Este trabajo parte de la hipótesis de que un sistema de desbaste automatizado, equipado con microcontroladores Arduino y un mecanismo de accionamiento basculante, reduce la carga de sólidos gruesos que normalmente acelera la colmatación del humedal construido [3].

Objetivo general: diseñar un sistema automatizado basado en un tamiz perforado basculante para el pretratamiento de aguas residuales en un matadero.

Objetivos específicos: caracterizar el efluente generado; analizar tecnologías de desbaste aplicables a caudales pequeños y medianos; seleccionar la alternativa más eficiente para la remoción de sólidos gruesos caídos por gravedad; diseñar el mecanismo automatizado basado en un tamiz perforado basculante con control mediante sensores.

A pesar de la existencia de tecnologías de desbaste mecánico, la mayoría de los sistemas automatizados disponibles están diseñados para plantas de gran escala y presentan altos costos de implementación. Existe un vacío en el desarrollo de soluciones automatizadas de bajo costo adaptadas a mataderos municipales, donde la descarga de sólidos ocurre predominantemente por caída vertical y en régimen intermitente.

En este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible diseñar un sistema de desbaste automatizado, basado en un tamiz perforado basculante, capaz de operar bajo condiciones de descarga intermitente y alta carga de sólidos en mataderos de pequeña escala?

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en las instalaciones del matadero municipal de Misantla, Veracruz (México), donde actualmente opera un sistema de tratamiento de aguas residuales compuesto por rejillas de desbaste, sedimentadores y un humedal construido. Las actividades de campo y la toma de datos se realizaron durante el segundo semestre de 2025, considerando dos jornadas representativas de operación.

El material analizado correspondió al efluente generado durante las faenas de sacrificio bovino y porcino. Se registraron los caudales horarios, el volumen total de agua utilizada, el número de animales procesados y el volumen de sólidos gruesos retenidos en las rejillas del sistema de desbaste existente. La población de estudio se definió como el conjunto de descargas generadas por las operaciones del matadero, mientras que la muestra estuvo integrada por dos jornadas de muestreo representativas, denominadas A y B.

Las actividades realizadas durante la apertura de la caja de registro y la toma de datos pueden observarse en la Figura 2.



Figura 2. Actividades de campo durante la apertura de la caja de registro para inspección y toma de datos.

Fuente: Elaboración propia.

Se adoptó un enfoque cuantitativo, descriptivo y no experimental, fundamentado en observación directa, mediciones hidráulicas y un análisis comparativo de tecnologías de pretratamiento reportadas en la literatura [1] [2]. El procedimiento general comprendió las siguientes fases:

Investigación documental y revisión del estado del arte

Se realizó una revisión bibliográfica sobre tecnologías de prefiltrado para la protección de humedales construidos y sistemas de tratamiento secundarios. El objetivo fue identificar los rangos típicos de luz de paso, materiales de fabricación, esquemas de operación (manual vs. mecánico) y su impacto en la colmatación del medio filtrante [6][7][12][13][14].

En particular, se analizaron las siguientes tecnologías:
 Rejillas de barras (desbaste grueso): se utilizan como primera barrera para retener sólidos grandes (hojas, plásticos, restos orgánicos). Se recomiendan luces de paso entre 10 y 30 mm, con valores de 15–25 mm cuando el objetivo es proteger humedales de flujo sub-superficial y minimizar la colmatación [12][15][16]. La inclinación típica se sitúa entre 60 y 75° para facilitar la limpieza [6].

Cestas perforadas o mallas fijas: fabricadas en acero perforado o polímeros de alta densidad, con orificios de 5–15 mm. Suelen emplearse como segunda barrera extraíble para concentrar los sólidos retirados de la rejilla [12].

Tamices estáticos de cuña (wedgewire): presentan ranuras finas (0.5–2 mm) y un comportamiento autolimpiante. Ofrecen alta eficiencia y resistencia mecánica, aunque a un costo mayor [17][16].

Tamices rotativos mecánicos: permiten aperturas incluso menores a 1 mm, con operación continua y limpieza automática. Suelen reservarse para caudales elevados o instalaciones con alto nivel de automatización debido a su costo e infraestructura asociada [18][12][19].

También se revisaron comparaciones entre sistemas de limpieza manuales y mecánicos.

Los primeros son de bajo costo, pero dependen fuertemente de la disciplina operativa; en cambio, los segundos aseguran una remoción continua de sólidos a cambio de mayor inversión y mantenimiento especializado [19][11][18].

En humedales construidos, un pretratamiento adecuado reduce la colmatación, prolonga la vida útil del lecho y mantiene la capacidad hidráulica del sistema [12][14][3].

Caracterización del efluente

Las mediciones de caudal se efectuaron mediante un recipiente volumétrico calibrado y un cronómetro digital, determinando la tasa promedio de flujo (Q) conforme a la relación:

$$Q = \frac{V}{\Delta t} \quad \text{Ec. (1)}$$

donde V representa el volumen (m^3) y Δt el tiempo de llenado (s).

La toma manual de los sólidos gruesos retenidos durante este proceso de muestra en la Figura 3.



Figura 3. Toma manual de sólidos gruesos en la caja de registro durante la caracterización hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

La masa de sólidos retenidos (M_s) se estimó a partir del volumen de screenings (V_s) y la densidad aparente (ρ_s), considerando que la mayor parte de los sólidos se deposita desde arriba por caída directa durante las actividades de sacrificio, y no exclusiva-

mente por arrastre del flujo, según:

$$M_s = \rho_s V_s \quad \text{Ec. (2)}$$

Las mediciones se realizaron utilizando unidades del Sistema Internacional (SI).

El principal factor analizado fue la variación del caudal de descarga y del volumen de sólidos gruesos en función de la cantidad de animales sacrificados. El estudio comprendió dos jornadas operativas completas (Jornada A y Jornada B); sin embargo, únicamente se emplearon los datos de la Jornada A, pues la Jornada B fue proporcionada por el propietario del sitio y no contó con registro de tiempo medido, por lo que no permitió calcular caudales ni tasas comparables.

Aunque el muestreo consideró dos jornadas operativas (A y B), únicamente los datos de la Jornada A fueron empleados para el análisis hidráulico y el diseño del sistema automatizado. La Jornada B fue proporcionada por el responsable del sitio sin registro confiable de tiempos de descarga, lo que impidió el cálculo de caudales, tasas de generación de sólidos y factores de punta comparables. Por esta razón, dichos datos no fueron considerados representativos desde el punto de vista hidráulico y se excluyeron del análisis cuantitativo, constituyendo una limitación metodológica del presente estudio.

Selección tecnológica y criterios de automatización

La matriz de decisión mostró que, aunque la rejilla de barras presenta bajo costo de inversión, su operación manual y la tendencia a saturarse por la caída vertical de sólidos la vuelven poco adecuada para mataderos. El tamiz perforado basculante obtuvo el puntaje ponderado más alto debido a su mayor área efectiva de paso, su menor susceptibilidad al taponamiento y su capacidad de limpieza por gravedad mediante un giro controlado. Además, esta tecnología permite integrar sensores, una válvula motorizada y un motor a pasos a bajo costo, lo que la convierte en la opción óptima para el sitio estudiado.

Junto a la evaluación mecánica y económica, se analizó la compatibilidad de cada alternativa con la incorporación de sistemas de detección automática. En este sentido, el tamiz perforado basculante es el único que permite instalar sensores ópticos de distancia tipo tiempo de vuelo (ToF) fuera del contacto directo con el agua y los sólidos. Estos sensores emiten pulsos de luz infrarroja y miden el tiempo que tarda en regresar al detector, lo que permite calcular la distancia libre dentro del colador perforado con alta precisión.

Cuando la acumulación de screenings reduce la distancia medida por debajo de un umbral crítico, de-

terminando mediante la caracterización hidráulica, el ToF envía una señal al microcontrolador indicando saturación. Esto permite activar el ciclo automático de cierre de la válvula mariposa, giro del tamiz y vaciado del sólido retenido, restableciendo después la operación normal sin supervisión constante.

La Tabla 1 presenta la matriz de decisión cualitativa con escala de 1 a 5 (1 = desempeño muy bajo, 5 = desempeño muy alto). Las ponderaciones se normalizaron para que su suma total fuera igual a 1.0.

Tabla 1. Matriz de decisión cualitativa (escala 1-5) para la selección del tamiz perforado basculante como tecnología de desbaste.

Criterio	Peso	Rejilla barras	Tamiz perforado basculante	Tamiz estático	Tamiz rotativo
Eficiencia sólidos gruesos	0.25	4	5	5	5
Operación y mantenimiento	0.25	3	4	3	3
Costo de inversión	0.20	5	4	3	2
Compatibilidad con humedales	0.15	4	5	5	4
Automatización futura	0.15	3	5	2	4
Puntaje ponderado		3.8	4.6	3.7	3.6

Fuente: Elaboración propia.

La ponderación asignada a cada criterio responde a consideraciones de ingeniería asociadas a la problemática específica del sitio. Se otorgó un mayor peso a la eficiencia en la remoción de sólidos gruesos (0.25) debido a que la principal causa de falla del sistema actual es la colmatación acelerada por deposición vertical de residuos orgánicos, lo cual compromete directamente la operación del sedimentador y del humedal construido. En contraste, aunque el costo de inversión es un factor relevante (0.20), su peso se consideró secundario frente a la necesidad de garantizar la continuidad hidráulica y la protección de las unidades posteriores, priorizando así la funcionalidad y confiabilidad del pretratamiento sobre la inversión inicial.

La Figura 4 muestra la comparación global de las alternativas de acuerdo con su puntaje ponderado.

Dimensionamiento mecánico del sistema

Con el fin de estimar las condiciones operativas del sistema, se realizó un análisis preliminar del torque requerido para el giro del tamiz bajo condiciones de carga máxima.

Se consideró una masa de sólidos retenidos de aproximadamente 30.5 kg, asumiendo un radio

efectivo de giro de 0.20 m, el momento generado por la carga se estimó como:

$$T = m \cdot g \cdot r \quad \text{Ec. (3)}$$

donde:

$$m = 30.5 \text{ kg}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$r = 0.20 \text{ m}$$

Por lo tanto:

$$T \approx 30.5 \times 9.81 \times 0.20 \approx 59.8 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Este valor representa el torque mínimo requerido para iniciar el movimiento del sistema en condiciones críticas.

Para complementar el análisis, se estimó la potencia mecánica necesaria considerando una velocidad de operación baja del tamiz, adecuada para procesos de separación de sólidos, de aproximadamente:

$$N=30 \text{ rpm}$$

Valor adoptado como velocidad de operación lenta para evitar salpicaduras, reducir esfuerzos dinámicos y favorecer una descarga controlada de los sólidos.

La velocidad angular correspondiente se calcula como:

$$\omega = (2\pi N)/60 \quad \text{Ec. (4)}$$

$$\omega = 3.14 \text{ rad/s}$$

La potencia mecánica teórica se determina mediante:

$$P = T \cdot \omega \quad \text{Ec. (5)}$$

$$P \approx 59.8 \times 3.14 \approx 187.7 \text{ W}$$

Considerando pérdidas mecánicas en el sistema (fricción en ejes, transmisión y condiciones reales de operación), se adopta una eficiencia global estimada del 80 %, por lo que la potencia real requerida se calcula como:

$$P_{real} = P/\eta \quad \text{Ec. (6)}$$

$$P_{real} \approx 187.7/0.8 \approx 234.6 \text{ W}$$

Bajo estas condiciones, se recomienda la selección de un motor con potencia mínima de 250 W y capacidad de torque superior a 70 N·m, incorporando un factor de seguridad que contemple variaciones en la carga, acumulación de sólidos y posibles condiciones de operación no ideales.

Con base en la potencia requerida estimada, se propone la selección de un motor eléctrico comercial con una potencia nominal superior a 0.25 kW ($\approx 1/3$ HP), garantizando un margen de seguridad adecuado para condiciones reales de operación y posibles sobrecargas del sistema.

Estos cálculos representan una estimación teórica inicial, por lo que su validación experimental forma parte del trabajo futuro para corroborar el desempeño real del sistema.

Diseño de ingeniería del sistema automatizado

El sistema propuesto se basa en un recipiente perforado tipo colador, fabricado en acero galvanizado y diseñado para recibir directamente el flujo que cae por gravedad desde la tubería de ingreso.

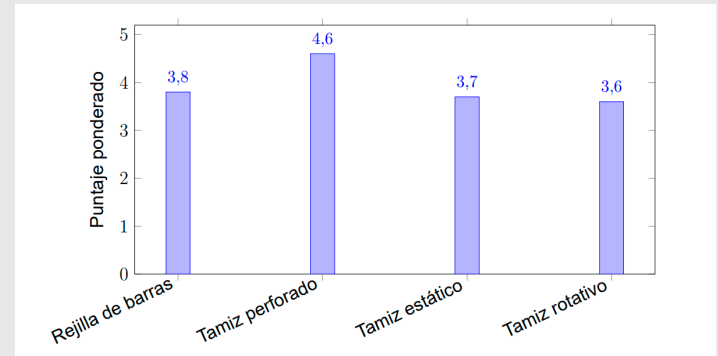


Figura 4. Puntaje ponderado de las alternativas de desbaste según la matriz multicriterio

.Fuente: Elaboración propia.

Las perforaciones circulares distribuidas en toda la superficie del tamiz permiten el paso del agua mientras los sólidos gruesos quedan retenidos temporalmente. Este tipo de geometría perforada presenta menor riesgo de taponamiento que las rejillas de barras tradicionales, las cuales tienden a obstruirse con restos fibrosos y grasas cuando la deposición de sólidos ocurre verticalmente, como sucede en mataderos durante las faenas de sacrificio [6][7][12][14]. Asimismo, la forma semiesférica del recipiente proporciona un área hidráulica efectiva mayor, disminuyendo la pérdida de carga y retrasando el punto de saturación que compromete la continuidad del flujo.

En operación normal, el tamiz permanece en reposo, permitiendo que el agua atraviese las perforaciones mientras los screenings se van acumulando. Con el fin de identificar el momento en que la carga sólida alcanza un nivel crítico, se integra un sensor óptico de distancia tipo tiempo de vuelo (ToF). Este sensor, instalado en la parte superior del tanque, emite pulsos de luz infrarroja y mide el tiempo de retorno del haz, determinando así la distancia entre el dispositivo y la superficie visible del material acumulado. La reducción progresiva de esta distancia permite detectar de manera precisa y continua el punto de saturación. La elección de sensores ópticos no intrusivos es ampliamente recomendada en sistemas de desbaste automatizados debido a su confiabilidad, rápida respuesta y mínima susceptibilidad a incrustaciones [8][9][15].

Una vez que el sensor indica que se ha alcanzado el umbral de saturación previamente calibrado, basado en las condiciones reales observadas en la Jornada A, el microcontrolador Arduino ejecuta el ciclo au-

tomático del sistema. La primera acción consiste en cerrar temporalmente la válvula mariposa eléctrica instalada en la tubería de ingreso, evitando el paso de agua hacia el recipiente durante la descarga. El uso de válvulas motorizadas es común en sistemas compactos de pretratamiento y permite gestionar flujos intermitentes con alta precisión [6][13][18].

Con el flujo detenido, el motor a pasos con sistema de reducción mecánica acciona el eje solidario al tamiz y ejecuta un giro controlado de aproximadamente 180°, vertiendo los sólidos acumulados en un contenedor lateral independiente. El uso de un sistema de reducción permite adaptar motores de bajo costo a los requerimientos de torque del sistema. Este esquema de basculamiento imita el funcionamiento de equipos autolimpiables utilizados en plantas pequeñas y medianas, donde el giro mecánico permite liberar la carga sin la necesidad de sistemas de lavado a presión [18][19][20]. Tras la descarga, el motor invierte su sentido de giro para devolver el tamiz perforado a su posición inicial, y posteriormente la válvula motorizada se reabre para reanudar el paso del agua.

El proceso completo es coordinado por un circuito de control gobernado por Arduino, que integra tres funciones esenciales:

- lectura continua del sensor ToF a través de comunicación digital I²C;
- operación de la electroválvula para gestionar el ingreso del flujo;
- control secuencial del motor a pasos para ejecutar el ciclo de basculamiento con precisión angular.

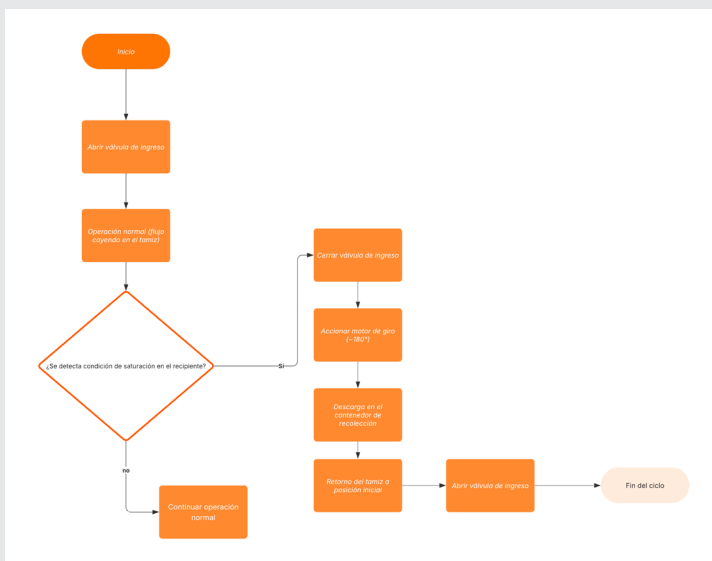


Figura 5. Diagrama de flujo del ciclo operativo del tamiz perforado basculante automatizado.

Fuente: elaboración propia.

tricos está ampliamente documentado en sistemas de automatización ligera, gracias a su fiabilidad, facilidad de programación y bajo mantenimiento [10][11]. La Figura 5 muestra el ciclo operativo completo del sistema y la interacción entre los elementos que conforman el proceso.

El algoritmo de control considera una lógica secuencial con temporizaciones definidas para asegurar una operación estable del sistema. Una vez que el sensor ToF detecta que la distancia medida es inferior al umbral de saturación establecido, el microcontrolador ejecuta un retardo de verificación para evitar activaciones por lecturas espurias o fluctuaciones momentáneas del flujo. Confirmada la condición de saturación, se ordena el cierre de la válvula mariposa y se introduce un tiempo de espera que garantiza la interrupción total del ingreso de agua antes de accionar el motor a pasos. Posteriormente, el motor ejecuta el giro de 180° del tamiz, mantiene la posición de descarga durante un intervalo predefinido y retorna el sistema a su posición inicial. Finalmente, se reabre la válvula y se restablece el monitoreo continuo del sensor. Esta lógica incorpora redundancias básicas para mejorar la robustez del proceso automatizado.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos pertenecen exclusivamente a la caracterización hidráulica y de sólidos del sistema de desbaste existente; la evaluación experimental del prototipo automatizado se llevará a cabo en una fase posterior. Esta primera etapa permitió identificar las condiciones reales bajo las cuales el pretratamiento pierde eficiencia, así como los parámetros críticos que determinan el inicio de la colmatación. Tales observaciones son indispensables para definir el umbral de activación del sensor óptico de distancia (ToF), responsable de iniciar el ciclo automático de vaciado del tamiz.

Durante la Jornada A se registró una variación considerable tanto en el caudal instantáneo como en la tasa de generación de screenings. En particular, se observó un aumento abrupto de sólidos gruesos en los momentos de mayor actividad de sacrificio, lo cual provocó una reducción progresiva del área libre útil en el recipiente perforado. Esta disminución del paso hidráulico derivó en un incremento local de nivel y en una pérdida temporal de capacidad de conducción hacia el sedimentador. Dicho comportamiento confirma que la acumulación sobre la superficie del tamiz no es uniforme, sino que ocurre en oleadas asociadas a la operación diaria del matadero.

A partir de estas observaciones se determinó el nivel crítico de saturación que compromete la operación normal del sistema. Estos valores serán empleados

El uso de microcontroladores de bajo costo combinados con sensores ópticos y actuadores eléc-

para calibrar el umbral de disparo del sensor ToF, garantizando que el ciclo de limpieza únicamente se active en condiciones representativas y no ante fluctuaciones menores del flujo. Además, los datos obtenidos constituyen la base para el dimensionamiento hidráulico del componente perforado, la selección del torque necesario para el motor a pasos y la configuración de la válvula motorizada responsable del cierre temporal del ingreso. Los parámetros principales obtenidos en la Jornada A se muestran en la Tabla 2, y representan la referencia operativa para el diseño final del sistema automatizado, especialmente en lo relativo a los límites de control del sensor y al algoritmo de operación incorporado en el microcontrolador.

El factor de punta obtenido (PFS = 2.67) indica un régimen de descarga altamente intermitente, característico de mataderos donde el vertido se concentra en periodos cortos asociados a la faena y limpieza.

Tabla 2. Parámetros hidráulicos y de retención de sólidos registrados en la Jornada A.

PARÁMETROS	Jornada A	Unidad
Volumen total de agua (V)	12.0	m ³
Duración (Δt)	4	h
Caudal promedio (Q)	0.833	L/s
Screenings capturados (Vs)	32.8	L
Masa de sólidos (Ms)	30.50	kg
Factor de punta (PFS)	2.67	—

Fuente: Elaboración propia.

Este valor se encuentra dentro del rango reportado por guías de diseño y estudios de variación horaria para sistemas de pequeña escala (≈2.5–2.7), aunque resulta superior a los factores típicos de descargas predominantemente domésticas (2.2), lo que evidencia una mayor exigencia hidráulica, lo cual valida la representatividad de los datos obtenidos para fines de diseño preliminar.

Este PFS implica que el sistema debe dimensionarse considerando un caudal pico aproximado de 2.22 L/s, y no únicamente el caudal promedio. Esto incrementa el riesgo de colmatación durante los eventos

de máxima descarga, justificando la necesidad de un pretratamiento con mayor área efectiva de paso y capacidad de operación bajo picos hidráulicos. El factor de punta constituye un parámetro clave para sustentar técnicamente la selección de un sistema de desbaste con tolerancia a sobrecargas y potencial de automatización para las condiciones operativas observadas en Misantla.

El factor de punta registrado en la Jornada A (PFS = 2.67) tuvo una influencia directa en el diseño del sistema automatizado. Este valor determinó la necesidad de seleccionar un motor a pasos con suficiente margen de torque para operar bajo condiciones de carga máxima durante los eventos de descarga pico, así como de programar un umbral del sensor ToF que evite activaciones prematuras durante fluctuaciones normales del flujo. Asimismo, el carácter intermitente del régimen hidráulico observado justificó la incorporación de tiempos de espera y confirmación en el algoritmo de control, asegurando que el ciclo de limpieza se active únicamente en condiciones representativas de saturación real del tamiz.

Los valores de acumulación de sólidos obtenidos durante la caracterización del sistema fueron utilizados como base para el análisis preliminar de carga mecánica del tamiz.

El sistema propuesto demuestra viabilidad técnica desde el punto de vista hidráulico y mecánico, constituyendo una alternativa de bajo costo para el pretratamiento automatizado en mataderos de pequeña escala.

No obstante, se requiere validación experimental del prototipo para confirmar su desempeño en condiciones reales de operación.

Desde el punto de vista económico, el sistema propuesto presenta una ventaja significativa frente a soluciones comerciales de desbaste mecánico. El costo estimado de los principales componentes del sistema automatizado, microcontrolador Arduino, sensor ToF, motor a pasos con reductor y válvula motorizada, se sitúa en un orden de magnitud inferior al de un tamiz rotativo comercial, cuyo precio puede superar fácilmente los USD 5,000–10,000 para aplicaciones de pequeña escala. En contraste, el sistema propuesto puede implementarse con una inversión aproximada inferior a USD 500, lo que lo convierte en una alternativa técnicamente viable y económicamente accesible para mataderos municipales con recursos limitados.

Adicionalmente, el análisis preliminar de torque confirma que el sistema puede ser operado mediante actuadores de bajo costo disponibles comercialmente, siempre que se consideren factores de se-

guridad adecuados. Esto respalda la viabilidad técnica del diseño propuesto bajo condiciones de carga máxima observadas en campo.

Discusión

El sistema propuesto responde a una problemática específica de mataderos municipales, donde la carga de sólidos es altamente variable y la deposición ocurre por caída directa. A diferencia de sistemas convencionales, el diseño planteado prioriza simplicidad mecánica y bajo costo.

Sin embargo, el presente estudio se limita a un análisis conceptual y preliminar, por lo que factores como desgaste mecánico, ensuciamiento del sensor y comportamiento dinámico del flujo requieren validación experimental en condiciones reales.

Asimismo, la dependencia de sensores ópticos implica la necesidad de mantenimiento periódico, lo cual debe considerarse en futuras implementaciones.

CONCLUSIONES

Los datos obtenidos en la caracterización hidráulica evidencian variaciones significativas en el volumen descargado y una alta presencia de sólidos gruesos caídos por gravedad durante las actividades de sacrificio. Esto confirma la necesidad de un sistema de desbaste con mayor capacidad de remoción y menor dependencia de operación manual.

Con base en los criterios de selección tecnológica evaluados, el tamiz perforado basculante constituye la alternativa más adecuada para el sitio: presenta bajo riesgo de colmatación, puede manejar sólidos irregulares con dimensiones variables y es totalmente compatible con esquemas de automatización basados en sensores y microcontroladores de bajo costo.

La incorporación de un sensor óptico de distancia tipo ToF aporta un mecanismo de detección temprana de saturación que mejora la oportunidad del ciclo de limpieza y reduce la intervención humana, aumentando la confiabilidad del pretratamiento. No obstante, la validación del desempeño del sensor y del accionamiento mecánico requiere su instalación en un entorno controlado y posteriormente en condiciones reales.

Se recomienda implementar una fase piloto para evaluar el sistema completo en operación real, estimar su impacto sobre la eficiencia del sedimentador y del humedal construido, y cuantificar los beneficios operativos en términos de mantenimiento, continuidad hidráulica y reducción de sobrecargas.

La principal contribución del estudio consiste en integrar caracterización hidráulica, selección tecnológica

multicriterio y dimensionamiento mecánico preliminar en una propuesta automatizada de bajo costo para mataderos municipales de pequeña escala.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo otorgado para la formación académica y el desarrollo del presente proyecto, respaldo que hizo posible la realización de este trabajo.

Asimismo, se reconocen las facilidades brindadas por el Matadero Municipal de Misantla "El Java", cuya colaboración permitió la toma de datos y observaciones técnicas indispensables para esta investigación. Finalmente, se agradece al Instituto Tecnológico Superior de Misantla (ITSM) por el acompañamiento académico y la infraestructura proporcionada durante el desarrollo del estudio.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Aziz, A., Basheer, F., Sengar, A., Khan, S. U., & Farooqi, I. H. (2019). *Biological wastewater treatment (anaerobic-aerobic) technologies for safe discharge of treated slaughterhouse and meat processing wastewater*. *Science of the Total Environment*, 686, 681–708. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.295>.

[2] Díez, V., Cámara, J. M., Ruiz, M. O., Martínez, R., & Ramos, C. (2021). *A novel jet-loop anaerobic filter membrane bioreactor treating raw slaughterhouse wastewater: Biological and filtration processes*. *Chemical Engineering Journal*, 417, 128002. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128002>.

[3] Dai, S., Wang, R., Lin, J., Zhang, G., Chen, Z., Li, L., & Shi, Q. (2025). *Study on physical clogging process and practical application of horizontal subsurface flow constructed wetlands*. *Scientific Reports*, 15, Article 10234. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10234-x>.

[4] *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)*. (2022). *NOM-001-SEMARNAT-2021: Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. *Diario Oficial de la Federación*.

[5] *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) & Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)*. (2023). *Guía técnica para la aplicación de la NOM-001-SEMARNAT-2021*. *Gobierno de México*.

[6] SUEZ. (2008). *Water treatment handbook: Pre-treatment and mechanical screens*. *SUEZ Environment*.

[7] U.S. Environmental Protection Agency. (2003). *Wastewater technology fact sheet: Screening and grit removal (EPA 832-F-03-011)*. U.S. EPA.

[8] JWC Environmental. (2024). *Guide to wastewater screening equipment*. JWC Environmental.

[9] HUBER SE. (2022). *HUBER Fine Screen ROTAMAT® (Ro1/Ro2/RPPS): Technical brochure*. HUBER Technology.

[10] Hughes, A., & Drury, B. (2019). *Electric motors and drives: Fundamentals, types and applications (5th ed.)*. Elsevier.

[11] Banzi, M., & Shiloh, M. (2022). *Getting started with Arduino (4th ed.)*. Maker Media.

[12] Karungamy, P. (2021). *Wastewater pretreatment methods for constructed wetlands: A review*. *Journal of Materials and Environmental Science*, 12(12), 1614–1626.

[13] Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery (5th ed.)*. McGraw-Hill Education.

[14] Rodríguez-González, L., Martínez-Santos, M., & Sánchez-Leal, L. (2013). *Evaluación de tecnologías de pretratamiento para humedales construidos*. *Revista Ingeniería Ambiental*, 34(2), 45–56.

[15] En-Nabety, K., & Boudi, Y. (2024). *Screening and pretreatment methods in small treatment plants*. *Water Science and Technology*, 89(4), 1123–1134. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.065>.

[16] Saju, R., Thomas, J., & Binu, A. (2020). *Performance of screening systems in decentralized wastewater treatment units*. *Journal of Environmental Engineering*, 146(9), 04020089. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001765](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001765).

[17] WedgeWire Screen Co. (2022). *Wedgewire static screens: Technical manual*. WedgeWire Screen Company.

[18] Hydro-Dyne Engineering. (2023). *Screens and screening handling systems: Technical catalogue*. Hydro-Dyne Engineering.

[19] Franklin Miller Inc. (2021). *Wastewater headworks screens: Product and performance guide*. Franklin Miller Inc.

[20] Hydro-Dyne Engineering. (2023). *Hydro-Flo® / Hydro-Grit® screening systems: Technical overview*. Hydro-Dyne Engineering.

