Evaluation and Design of an Automated Cooling Control System to Increase Productivity in PVC Pipe Manufacturing

Jeremy Sebastian Samuel Flores Quevedo, Industrial Engineer[1]; Joselito Sánchez Pérez, Master's Degree [2]; Rolando R. Romero Paredes, Master's Degree [3]

[1,2]Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Perú, *jeremyfloresquevedo99@gmail.com*, *jsanchez@usat.edu.pe*

[3]Universidad Tecnológica del Perú, Perú, *e15138@utp.edu.pe*

Abstract*— This research designed an automated cooling system based on PID control to increase productivity in PVC pipe manufacturing. The company under study, located in Ferreñafe, Peru, operates four production lines with 3.5 tons/day installed capacity per machine; actual production ranged between 1.5 and 2.0 tons/day (capacity utilization 42.86% to 57.14%). Cooling water entered the chamber at 31.4 °C and returned at 52.5 °C, far exceeding the 25 °C setpoint, generating 8.2% waste and economic losses of S/ 321,703 over eight months. The design was developed in three phases: CAD modeling in SolidWorks, PLC programming in SoMachine with a closed-loop PID strategy, and electrical plan design. The system integrates a 5 kW chiller, a centrifugal motor-pump, a PT100 sensor, level sensors, and a Schneider Modicon M241 PLC with TM3 modules. PID tuning via Cohen-Coon yielded Kp = 5.05, Ti = 880 s, Td = 41.5 s. Projected results: capacity utilization to 85–97%, daily production to 3.0–3.4 tons (+43%), hourly productivity from 112.7 to 140–145 kg/h, and 80% reduction in thermal waste, saving S/ 12,009.30 monthly for line 1. The design is technically viable.

***Keywords*— Cooling system, PID control, Productivity, PVC pipes, Automation.**

Evaluación y Diseño de un sistema automatizado de control de enfriamiento para incrementar la productividad en la fabricación de tuberías de PVC

Jeremy Sebastian Samuel Flores Quevedo, Ingeniero Industrial[1], Joselito Sánchez Pérez, Magister en Ingeniería [2]; Rolando R. Romero Paredes, Magister en Ingeniería [3]

[1,2]Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Perú, *jeremyfloresquevedo99@gmail.com*, *jsanchez@usat.edu.pe*

[3]Universidad Tecnológica del Perú, Perú, *e15138@utp.edu.pe*

Resumen* — El presente trabajo tuvo como objetivo diseñar un sistema automatizado de enfriamiento basado en control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para incrementar la productividad en la fabricación de tuberías de PVC. La empresa en estudio, ubicada en Ferreñafe, Perú, cuenta con cuatro líneas productivas con capacidad instalada de 3,5 toneladas/día por máquina; sin embargo, la producción real osciló entre 1,5 y 2,0 toneladas/día (tasa de utilización 42,86% a 57,14%). El diagnóstico reveló que el agua de enfriamiento ingresaba a la cámara a 31,4 °C y retornaba a 52,5 °C, superando el setpoint de 25 °C, generando mermas de 8,2% y pérdidas de S/ 321 703 en ocho meses. El diseño se desarrolló en tres fases: modelado CAD en SolidWorks, programación del PLC en SoMachine con control PID cerrado, y elaboración del plano eléctrico. El sistema comprende un chiller de 5 kW, una motobomba centrífuga, un sensor PT100, sensores de nivel y un PLC Schneider Modicon M241 con módulos TM3. La sintonía PID por Cohen-Coon arrojó Kp = 5,05, Ti = 880 s, Td = 41,5 s. Los resultados proyectan un incremento de la utilización de capacidad a 85–97%, de la producción diaria a 3,0–3,4 toneladas (+43%), de la productividad horaria de 112,7 a 140–145 kg/h, y una reducción proyectada del 80% en mermas térmicas, ahorrando S/ 12 009,30 mensuales para la línea 1. El diseño resulta técnicamente viable.

***Palabras clave* — Sistema de enfriamiento, Control PID, Productividad, Tuberías PVC, Automatización.**

I. INTRODUCCIÓN

A nivel global, la refrigeración industrial ha incrementado de manera significativa, con una tasa de crecimiento anual compuesta estimada en 4,8% entre 2025 y 2030 [1], impulsada no solo por la demanda sino por la necesidad de sostenibilidad ambiental [2]. Solo en España, sector mayoritariamente industrial, la refrigeración facturó 5 000 millones de euros [3]. El mercado global de tuberías plásticas fue valorado en USD 95 200 millones en 2024 con una proyección de crecimiento anual del 5,2% hasta 2030; sin embargo, la productividad del sector plástico en América Latina se sitúa entre 60% y 70% de la capacidad instalada, por debajo del benchmark internacional del 85%. La automatización de los sistemas de refrigeración mediante controles PID permite reducir hasta en 35% los tiempos de ciclo y elevar la productividad horaria entre 20% y 30% [4]. Por su parte, la programación de PLC en procesos de enfriamiento industrial incrementa la estabilidad térmica hasta en un 80% y reduce las mermas por sobrecalentamiento en aproximadamente 75% [5].

En el Perú, el Ministerio de la Producción, a través de la Dirección General de Asuntos Ambientales de Industria (DGAMI), desarrolla acciones para resolver problemáticas ligadas a la refrigeración industrial sin afectar el medio ambiente [6], y el Instituto Nacional de Calidad incorpora normas técnicas para industrializar estos procesos [6]. En la región Lambayeque, la industrialización ha cobrado relevancia mediante el Parque Industrial de Lambayeque [8] y los acuerdos del Instituto de Desarrollo Industrial Sostenible [9]. La industria del plástico, centrada en la producción de tuberías de PVC, requiere controles precisos de temperatura en las etapas de extrusión y enfriamiento, cruciales para garantizar la calidad dimensional y mecánica del producto final [10], [11].

La presente investigación se desarrolló en la empresa Fabricaciones JASPLAST E.I.R.L., con sede en Ferreñafe, dedicada a la fabricación de tuberías plásticas para riego tecnificado. La empresa opera cuatro líneas productivas con capacidad instalada de 3,5 toneladas/día por máquina; sin embargo, debido a la calidez de la zona y a la ineficiencia del sistema de enfriamiento, la producción real se reduce a 1,5–2,0 toneladas/día (42,86%–57,14% de su capacidad total). Las mermas representan 8,2% de la producción y la demanda insatisfecha oscila entre 547 y 730 toneladas anuales. El agua de enfriamiento recircula sin tratamiento térmico previo, alcanzando temperaturas de entrada a la cámara de 31,4 °C y de retorno de 52,5 °C, muy por encima de los 25 °C programados, comprometiendo la estabilidad dimensional del producto. Esta problemática coincide con lo reportado por [10], quien demostró que un diseño deficiente del dado de enfriamiento en la extrusión de tuberías plásticas incrementa las deformaciones dimensionales hasta en 18% y prolonga el tiempo de ciclo en 22%. De igual forma, [11] señala que la ausencia de un sistema de refrigeración industrial adecuado reduce la vida útil de los equipos en un 30% y eleva el consumo energético entre 15% y 25%.

Ante este escenario, la pregunta de investigación se precisa así: ¿de qué manera influye el diseño de un sistema automatizado de refrigeración en el incremento de la productividad en la empresa JASPLAST E.I.R.L.? El objetivo general consistió en incrementar la productividad mediante el diseño de un sistema automatizado de enfriamiento. Como objetivos específicos se plantearon: (i) diagnosticar la situación actual del proceso de enfriamiento y producción de tuberías plásticas; (ii) proponer el diseño automatizado del sistema de

enfriamiento detallando y justificando cada componente, incluido el plano eléctrico; y (iii) realizar el análisis costo-beneficio del proyecto.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

[12] desarrollaron un sistema de control de temperatura en tiempo real para líneas de extrusión de caucho basado en una red neuronal artificial prealimentada, entrenada con 14 923 puntos de medición para diferentes compuestos. El sistema alcanzó un error porcentual absoluto medio (MAPE) de 0,68% y un error cuadrático medio (MSE) de 0,63 °C², con un tiempo de respuesta promedio de 68 ms ante desviaciones térmicas. Los autores concluyeron que los sistemas basados en redes neuronales superan a los controladores PID tradicionales en la adaptación a dinámicas no lineales del proceso de extrusión, representando una ventaja clave para la producción industrial que requiere control preciso y dinámico. Esta investigación evidencia el potencial de los sistemas inteligentes, aunque su implementación requiere alta capacidad computacional y volúmenes significativos de datos de entrenamiento. Por su parte, [13] propusieron un controlador de red neuronal PID profunda (PIDNN) para el calentamiento en moldeo por inyección de plásticos, actualizando los pesos en línea con el optimizador Adam, lo que permitió al sistema adaptarse al comportamiento de la planta sin un modelo matemático exacto. El controlador logró fluctuaciones de ±0,2 °C en estado estacionario, redujo el sobreimpulso de 4,6 °C a 0,1 °C y acortó el tiempo de establecimiento de 379 s a 271 s frente al PID convencional. Los autores concluyeron que el PIDNN mejora drásticamente la precisión y reduce el sobreimpulso, ofreciendo además ahorro energético y robustez ante perturbaciones. Estos hallazgos son relevantes para el presente estudio, ya que el proceso de enfriamiento de tuberías PVC comparte características no lineales similares al moldeo por inyección, justificando la selección de un control PID con sintonía cuidadosa.

[14] diseñó un sistema de enfriamiento para la carcasa del extrusor de tornillo de una impresora 3D combinando análisis térmicos estáticos y transitorios en SolidWorks Simulation con un prototipo instrumentado con sensores NTC 3950 y un microcontrolador Arduino UNO R3. La comparación entre simulación y experimentación mostró una desviación máxima del 9,6%, validando la precisión del modelo CAD como herramienta predictiva. Con la barrera térmica de flubon, la temperatura en las aletas se mantuvo en 71,0 °C mientras que la tolva de carga permaneció en 32,3 °C, demostrando la efectividad del diseño. Por su parte, [15] evaluaron moldes de inyección sensorizados fabricados aditivamente con canales conformados, logrando una reducción del 50% en el tiempo de ciclo y la eliminación de puntos calientes mediante la distribución uniforme de temperatura, lo que evidencia que la instrumentación del molde es clave para el monitoreo en proceso y la mejora de la eficiencia térmica. Asimismo, [16] aplicaron optimización multiobjetivo con clasificación no dominada para la selección de sistemas de enfriamiento, introduciendo un índice de eficiencia de la herramienta que simplifica la toma de decisiones cuando coexisten criterios contrapuestos como tiempo de ciclo, uniformidad térmica y costos de fabricación.

[17] propusieron un modelo híbrido con canales conformados ranurados e insertos Fastcool, alcanzando una reducción del 27,4% en el tiempo de ciclo y una mejora del 4334,9% en el intercambio térmico, junto con una uniformidad térmica mejorada en 51,7% frente al enfriamiento tradicional. Estos estudios evidencian de manera contundente que el diseño asistido por computadora, la simulación térmica y la optimización geométrica de los canales de enfriamiento son determinantes en la eficiencia del proceso. Para el caso de las tuberías de PVC, donde el enfriamiento se realiza por aspersión de agua en cámara, estos principios se trasladan al dimensionamiento del caudal, la temperatura del fluido y la distribución de los aspersores, elementos que se abordan en el presente diseño.

[18] desarrollaron un sistema autónomo de enfriamiento con control de pH y agentes contaminantes para la máquina Tubera Doble de Continental Tire Andina S.A., implementando un circuito cerrado con control automatizado que permitió mantener una temperatura constante y mejorar la calidad del producto final. Este trabajo constituye un referente directo para la fabricación de tuberías de PVC, dado que ambos procesos requieren gestión precisa de la temperatura durante el enfriamiento para asegurar la estabilidad dimensional. Por su parte, [19] redimensionaron un circuito de refrigeración en una industria de inyección de plástico, optimizando el consumo energético mediante el rediseño de componentes y la selección adecuada de los parámetros operativos, demostrando que la eficiencia energética y la sostenibilidad son compatibles con la productividad industrial.

[20] automatizaron una máquina de moldeo por inyección para polietileno de alta densidad mediante PLC y sensores, reduciendo los tiempos de enfriamiento y las fallas por sobrecalentamiento. Su trabajo validó la efectividad de la automatización con PLC en procesos plásticos, alineándose con la proyección de reducir las mermas en líneas críticas en un 80%. Por su parte, [21] determinó que mantener el agua de refrigeración en 30 °C permite alcanzar un rendimiento del 95% en la producción de tuberías PVC, hallazgo que valida el rango de operación propuesto en el presente diseño (20–25 °C). En conjunto, la literatura revisada confirma que la automatización con control PID, el dimensionamiento adecuado de los componentes y el tratamiento térmico previo del agua son factores críticos para mejorar la productividad en procesos termoplásticos, y proporcionan el sustento teórico para la propuesta que se desarrolla en las siguientes secciones.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación tiene un enfoque aplicado, cuantitativo, no experimental y, por su alcance, descriptivo-proyectivo [22]. La unidad de análisis es la empresa Fabricaciones JASPLAST E.I.R.L. y la población está constituida por el conjunto integral de registros históricos de producción, ventas e inventarios del periodo enero–agosto 2025, estimado en 1 920 observaciones operativas (8 meses × 30 días × 4 líneas × 2 turnos). Es importante precisar que el cómputo de 1 920 observaciones corresponde al universo de registros disponibles en la empresa durante el periodo de estudio y, por la naturaleza finita y homogénea de la unidad productiva, se dispuso de acceso censal a dichos registros. No obstante, dado que la selección de la propia empresa como caso de estudio respondió a criterios de

accesibilidad, oportunidad y representatividad contextual, el muestreo a nivel de unidad de análisis se clasifica como no probabilístico por conveniencia [22]. La muestra operativa estuvo conformada por los registros de producción, inventarios, datos del maquinista, programación de ventas y lista de insumos, mientras que las observaciones térmicas (temperaturas de entrada, salida y retorno) se obtuvieron mediante instrumentación calibrada con termopares y caudalímetros. Las técnicas utilizadas fueron la observación directa, el análisis documental y el análisis bibliográfico. Como herramientas se aplicaron el Diagrama de Operaciones del Proceso (DOP) y la Tasa de Utilización de Capacidad (TUC).

Referente a la viabilidad de los objetivos, el primer objetivo específico (diagnóstico) se sustenta en el acceso censal a los registros históricos de producción (1 920 observaciones) y en la disponibilidad de instrumentación calibrada (termopares, caudalímetros), garantizando la trazabilidad de los datos térmicos y productivos. La viabilidad del segundo objetivo (proponer el diseño automatizado del sistema) se respalda en la disponibilidad de software de ingeniería (SolidWorks, SoMachine), en el acceso a catálogos técnicos de componentes comerciales (Schneider, ATV12, TM3) y en la experiencia del equipo investigador en modelado CAD y programación Ladder. La viabilidad del tercer objetivo (análisis costo-beneficio) se fundamenta en la disponibilidad de los costos de inversión y operación proporcionados por la empresa, así como en la aplicabilidad de indicadores financieros estándar (VAN, TIR, período de recuperación) sobre un horizonte de cinco años.

IV. RESULTADOS

La potencia térmica que debe ser extraída por el sistema de enfriamiento se calcula a partir del flujo másico de producción y del incremento de temperatura del material, según la primera ley de la termodinámica:

$$Q = \dot{m} \cdot Cp \cdot \Delta T \quad (1)$$

donde Q es la potencia térmica (W), $\dot{m}$ el flujo másico del PVC (kg/s), C_p la capacidad calorífica específica del PVC (1 200 J/(kg·K)) y ΔT el diferencial térmico (K). La Tasa de Utilización de Capacidad se define como el cociente entre la producción real y la capacidad instalada, expresado en porcentaje:

$$TUC = PR / CI \quad (2)$$

donde TUC es la tasa de utilización de capacidad expresada en porcentaje (%), P_r es la producción real medida en toneladas por día (Tn/día) y C_i es la capacidad instalada medida en toneladas por día (Tn/día). El caudal másico de agua necesario para absorber la carga térmica se obtiene del balance energético en estado estacionario, considerando el agua como fluido caloportador:

$$\dot{m}_agua = Q / (Cp,agua \cdot \Delta T_agua \quad (3)$$

donde $\dot{m}$_agua es el caudal másico de agua requerido (kg/s), Q es la potencia térmica a disipar calculada mediante la ecuación (1) (W), C_p,_agua es la capacidad calorífica específica del agua, igual a 4 180 J/(kg·K), y ΔT_agua es el diferencial térmico del agua (K), definido como la diferencia entre la temperatura de salida T_salida = 30 °C y la temperatura de entrada T_entrada = 20 °C, es decir, ΔT_agua = 10 K. Finalmente, la potencia frigorífica del chiller considera un factor de seguridad (F.S. = 1,15) por pérdidas por radiación en ambientes industriales tropicales:

$$Q_chiller = Q \cdot F.S. \quad (4)$$

donde Q_chiller es la potencia frigorífica nominal del chiller (W), Q es la potencia térmica máxima a disipar obtenida de la ecuación (1) (W) y F.S. es el factor de seguridad adimensional, dimensionalmente igual a 1,15 (15%).

Con el dimensionamiento del chiller (5 kW) y del caudal másico de agua (1 L/min) ya definidos, se procede a la sintonía del controlador PID mediante el método de Cohen-Coon [23]–[27]. El setpoint es SP = 25 °C y la temperatura inicial es T_i = 31,4 °C, por lo que el sistema debe retirar calor hasta alcanzar ΔT = T_i − SP = 31,4 °C − 25 °C = 6,4 °C. El tanque termorregulador (V = 500 L = 0,5 m³; ρ = 1 000 kg/m³) contiene una masa m = ρ·V = 500 kg de agua. La capacidad térmica del sistema y la energía que el chiller debe retirar para bajar la temperatura en ΔT se obtienen de la primera ley de la termodinámica [23]:

$$C = m \cdot Cp \quad (5)$$

$$C = (500 \text{ kg})(4\,186 \text{ J/(kg·°C)}) = 2\,093\,000 \text{ J/°C} \quad (6)$$

$$Q = m \cdot Cp \cdot \Delta T \quad (7)$$

$$Q = (500)(4\,186)(6{,}4) = 13\,395\,200 \text{ J} \approx 13{,}4 \text{ MJ} \quad (8)$$

Con la capacidad frigorífica del chiller Q_c = 5 kW = 5 000 W, la constante de tiempo térmica del sistema resulta [24]:

$$\tau = C / Q_c \quad (9)$$

$$\tau = 2\,093\,000 / 5\,000 = 418{,}6 \text{ s} \approx 420 \text{ s} \quad (10)$$

El actuador es una motobomba controlada por un variador de frecuencia (VFD) con señal analógica 0–10 V, por lo que la ganancia del proceso resulta K = ΔT/ΔV = 6,4 °C / 10 V = 0,64 °C/V. El tiempo muerto inherente (volumen del tanque, circulación por tubería, transferencia del serpentín y respuesta del PT100) se estima en L = 120 s a partir del tiempo de permanencia medido en planta [26]. Con estos parámetros, la función de transferencia del proceso térmico de primer orden con tiempo muerto es [24]:

$$G(s) = K / (\tau \cdot s + 1) \cdot e^{-L \cdot s} \quad (11)$$

Se utiliza el método de Cohen-Coon [25] por su capacidad de compensar el tiempo muerto apreciable (L = 120 s) característico de los procesos térmicos industriales. La sintonía del controlador PID canónico C(s) = K_p·(1 + 1/(T_i·s) + T_d·s) arroja los tres parámetros finales [25]:

$$K_p = (1/K) \cdot (\tau/L) \cdot (0{,}9 + L/(12\tau)) = 5{,}05 \quad (12)$$

$$T_i = \tau \cdot (30 + 3(L/\tau))/(9 + 20(L/\tau)) = 880 \text{ s} \quad (13)$$

$$T_d = \tau \cdot (4(L/\tau))/(11 + 2(L/\tau)) = 41{,}5 \text{ s} \quad (14)$$

Los valores sintonizados del controlador PID, a ser programados en el PLC Schneider Modicon M241 mediante SoMachine, se resumen en la Tabla I. La configuración de salida del lazo analógico opera en el rango 0–10 V, donde 0 V corresponde al motor apagado y 10 V a la máxima velocidad del variador de frecuencia.

TABLA I. PARÁMETROS FINALES DEL CONTROLADOR PID SINTONIZADO

Parámetro	Valor
K_p (ganancia proporcional)	5,05
T_i (tiempo integral)	880 s
T_d (tiempo derivativo)	41,5 s

Fuente: Elaboración propia a partir de [23]–[27].

El diagnóstico evidenció que la variabilidad térmica es el problema que más aqueja a la empresa. Durante el primer turno, la temperatura del tubo a la salida del cabezal osciló entre 52,1 °C y 55,5 °C, mientras que el agua de entrada a la cámara varió entre 28,4 °C y 33,5 °C, con un promedio de 31,4 °C. La temperatura real de salida del tubo alcanzó un promedio de 38,3 °C, muy por encima de los 25 °C programados, con una diferencia promedio de 13,3 °C respecto al setpoint. El agua de retorno alcanzó un promedio de 52,5 °C. La Tabla II consolida estos valores.

TABLA II. VARIABILIDAD TÉRMICA DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO (PRIMER TURNO, LÍNEA 1)

Hora	T° tubo salida cabezal (°C)	T° agua entrada cámara (°C)	T° tubo salida cámara (°C)	T° programada (°C)	Diferencia real-prog. (°C)	T° agua retorno piscina (°C)
09:00	52,1	28,4	35,2	25	10,2	48,3
10:00	52,8	29,8	36,5	25	11,5	50,2
11:00	54,0	31,2	38,0	25	13,0	52,1
12:00	55,0	32,5	39,1	25	14,1	53,5
13:00	55,2	33,0	40,0	25	15,0	54,5
14:00	55,0	33,5	40,5	25	15,5	55,2
15:00	54,0	32,5	39,0	25	14,0	53,8
Promedio	**54,0**	**31,4**	**38,3**	**25**	**13,3**	**52,5**

Fuente: Elaboración propia.

Los cálculos termodinámicos aplicando (1) consideraron una producción nominal de 2 000 kg por turno de 24 h ($\dot{m}$ = 0,023148 kg/s) y C_p = 1 200 J/(kg·K). Las potencias térmicas a disipar resultaron: Q(150 °C) = 4,17 kW, Q(170 °C) = 4,72 kW y Q(200 °C) = 5,56 kW; para el dimensionamiento operativo se adoptó el rango 2,78–4,17 kW. La productividad de materia prima promedió 92,4%, la productividad horaria se situó en 112,7 kg/h. Aplicando (2), la TUC para la línea 1 resulta TUC = (1,5/3,5)·100 = 42,86% (mínimo) y TUC = (2,0/3,5)·100 = 57,14% (máximo), evidenciando una subutilización considerable.

El análisis de los registros mostró que los desperdicios oscilaron entre 7,93% y 9,46% sobre la producción real, equivalentes a 53,62 toneladas o S/ 321 703 en ocho meses. La línea 1 resultó la más crítica, concentrando el 38% de las mermas totales, con 83,37% de sus pérdidas atribuibles a las etapas de extrusión y enfriamiento; en agosto, la pérdida crítica alcanzó S/ 15 011,62. La demanda insatisfecha anual se estimó entre 547 y 730 toneladas.

El diseño se dividió en tres fases. La primera consistió en el modelado CAD en SolidWorks, donde se croquizaron y dimensionaron los componentes principales: tanque elevado de agua recirculante, estructura de soporte, tablero de seguridad, chiller, motobomba centrífuga, estante industrial y cámara de enfriamiento con aspersores. Adicionalmente, se diseñaron sensores de presión y temperatura en la cámara y, en el tanque PID, un sensor PT100 y un sensor de nivel. La Fig. 1 muestra el diseño del sistema de enfriamiento.

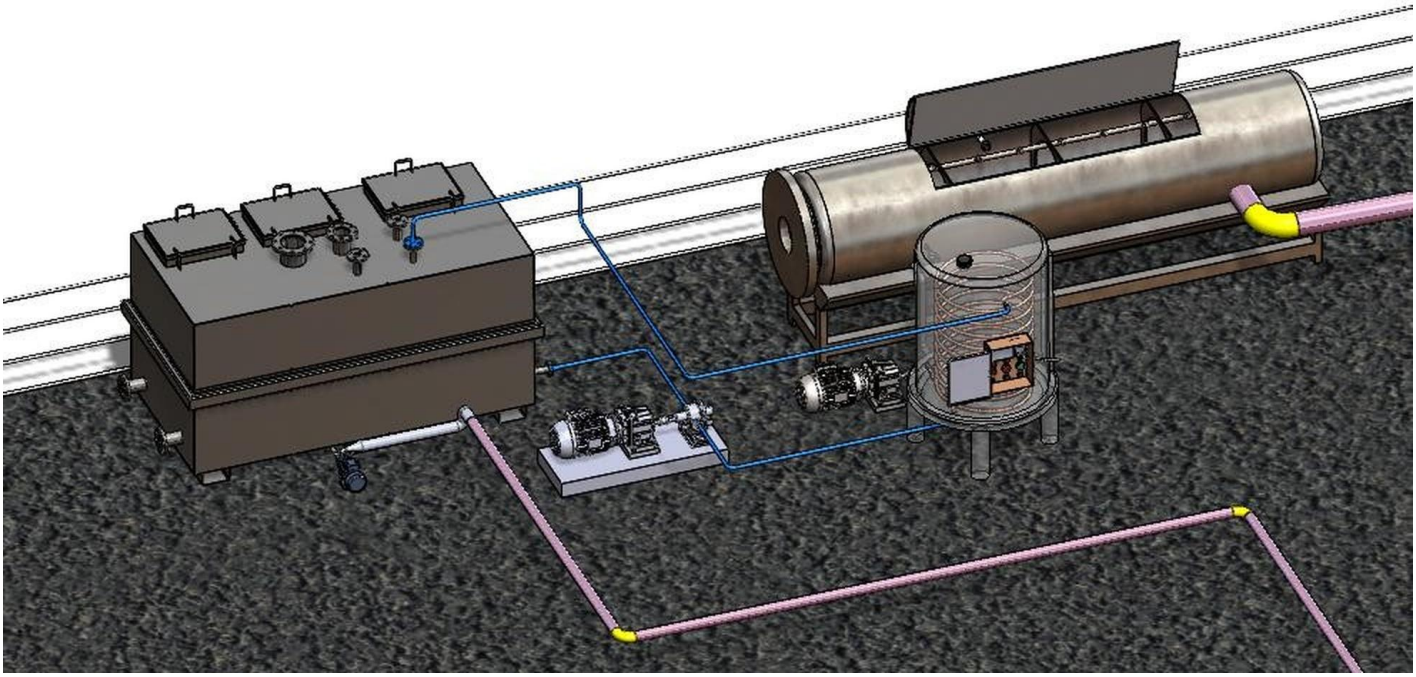


Fig. 1. Diseño del sistema automatizado de enfriamiento en SolidWorks. Se aprecian el tanque de control PID, la máquina chiller, la cámara de enfriamiento y el sistema de tuberías.

El ensamblaje final incluyó un serpentín de cobre en el interior del tanque PID, alimentado por la máquina chiller, que permite mantener estable la temperatura del agua antes de su ingreso a la cámara de enfriamiento. La Fig. 2 presenta la vista de despiece del ensamblaje final, donde se aprecia cada componente y su lista de materiales, facilitando la identificación de piezas para la fabricación y el mantenimiento.

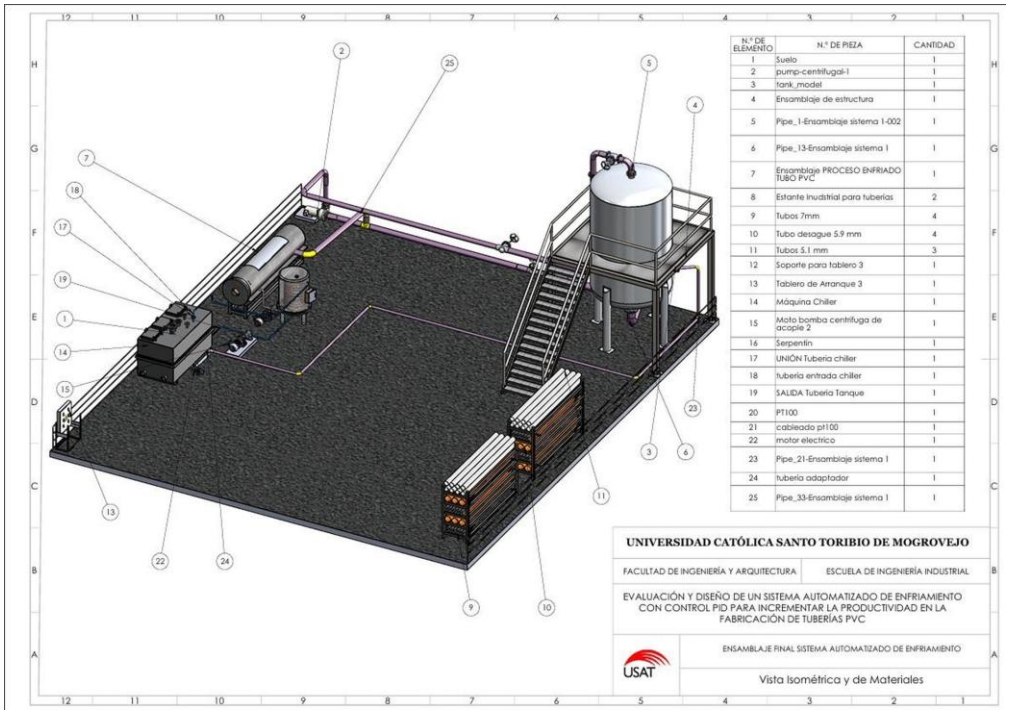


Fig. 2. Vista de despiece del ensamblaje final del sistema automatizado de enfriamiento, con lista de materiales y numeración de componentes.

La segunda fase comprendió la programación del PLC en SoMachine. El lazo de control acondiciona la señal analógica (%IW4) mediante un bloque DIV que registra la temperatura real. El procesamiento del error (PV vs setpoint) se realiza mediante el algoritmo PID, acotando la variable de control entre 0 y 1 000. La sintonía programada corresponde a K_p = 5,05, T_i = 880 s y T_d = 41,5 s, obtenidos mediante Cohen-Coon [25]. La transformación de la salida cruda del PID a un rango porcentual (0–100%) se ejecuta mediante FB_Scaling_1, y la conversión a 16 bits (WORD) controla la salida analógica (%QW2). La Fig. 3 muestra el lazo PID implementado.

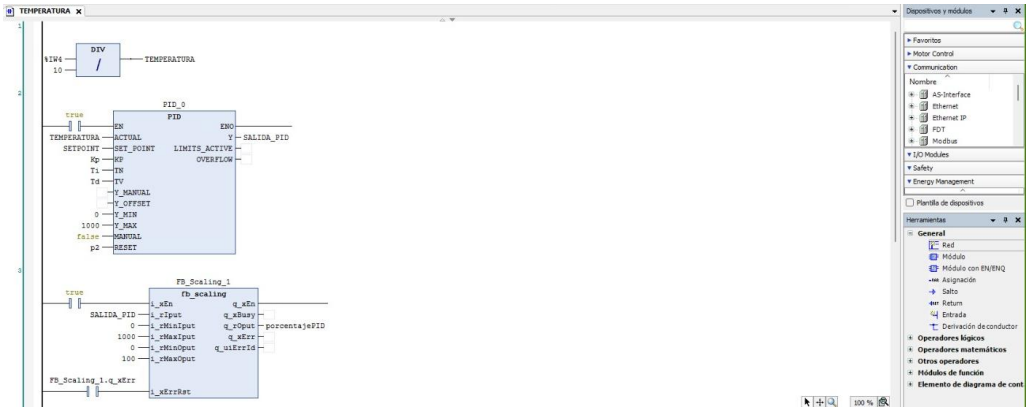


Fig. 3. Lazo de control PID implementado en SoMachine: bloques DIV, PID_0 y FB_Scaling_1.

El circuito de retención emplea una lógica de enclavamiento (latch) para el mando del equipo principal (%QX0.6), operada por los pulsadores de arranque y paro. Los sensores S3 (NA) y S4 (NC) provocan la parada automática ante activación o pérdida de señal. La programación se implementó en lenguaje Ladder. La Fig. 4 muestra el diagrama Ladder del circuito de retención y la conversión REAL_TO_WORD hacia %QW2.

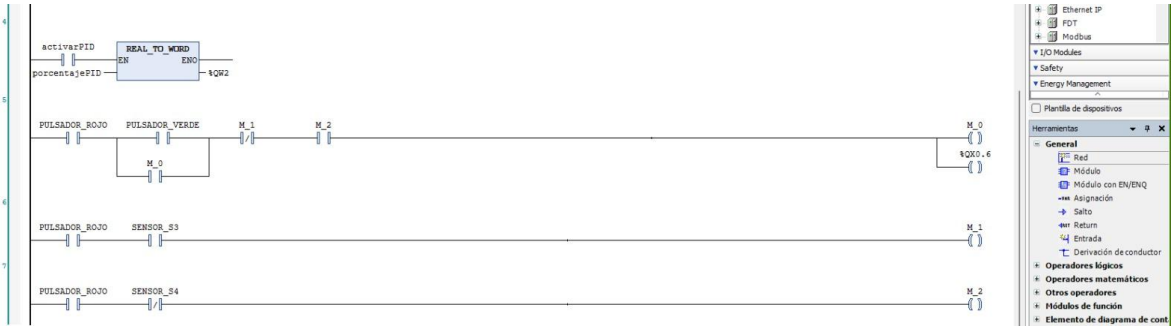


Fig. 4. Diagrama Ladder en SoMachine del circuito de retención y bloque REAL_TO_WORD hacia %QW2.

La tercera fase correspondió al plano eléctrico del sistema. El circuito de fuerza trifásico (L1, L2, L3) acciona los actuadores principales, protegido por interruptores electromagnéticos (Q1, Q2) y habilitado por contactores (KM1, KM2). Los variadores de frecuencia (G1, G2) controlan la velocidad de los motores trifásicos (Motor 1 y Motor 2) que impulsan el agua del tanque elevado y el agua fría del chiller, respectivamente. El controlador principal es un PLC Schneider Electric Modicon M241, encargado de procesar las señales de entrada y ejecutar el algoritmo PID. Un transformador convierte la corriente alterna en continua para alimentar las entradas y salidas del PLC. Las entradas digitales incluyen los pulsadores de marcha/paro (S1, S2, SP, SN); las salidas digitales activan las balizas (H1, H2) y las señales RUN/STOP hacia los variadores. Para el control de lazo cerrado, el PLC cuenta con dos módulos de expansión analógicos: el TM3TI4, que recibe la señal de la PT100, y el TM3AQ2, que envía la señal de control a los variadores ajustando las RPM de los motores para mantener el setpoint de temperatura en el tanque PID. La Fig. 5 presenta el plano eléctrico general del sistema, donde se observan las conexiones de fuerza, control y señales analógicas entre el PLC Modicon M241, los contactores, variadores, sensores y motores.

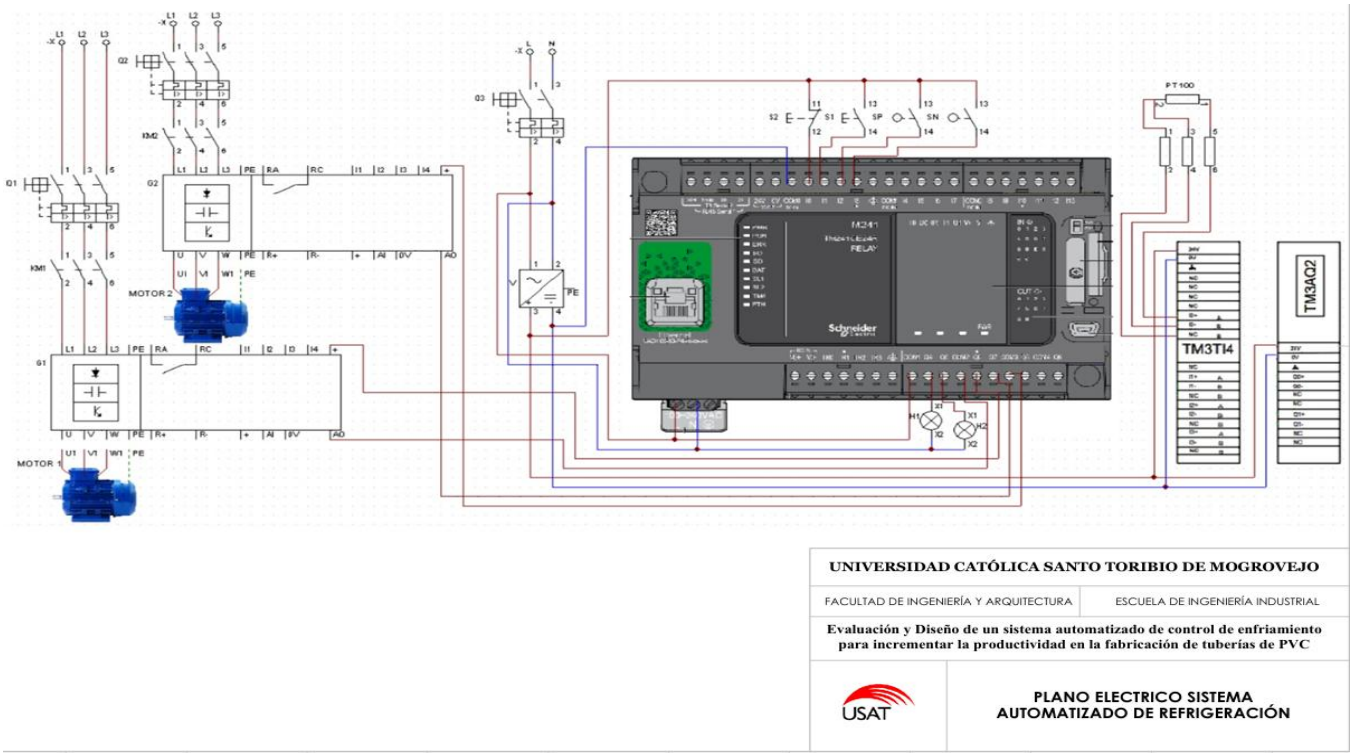


Fig. 5. Plano eléctrico del sistema automatizado: PLC Schneider Modicon M241, contactores KM1/KM2, variadores G1/G2, motores y módulos analógicos TM3TI4/TM3AQ2.

Los cálculos de dimensionamiento se desarrollaron aplicando las ecuaciones (3) y (4). Sustituyendo en la ecuación (3) los valores Q = 4 166,67 W (carga térmica máxima), $C_{p,agua}$ = 4 180 J/(kg·K) y ΔT_{agua} = (30 °C − 20 °C) = 10 K, el caudal másico de agua en régimen continuo resulta $\dot{m}_{agua,cont}$ = 4 166,67 W / (4 180 J/(kg·K) × 10 K) = 0,0997 kg/s, equivalente a 5,98 L/min. Sin embargo, en la operación real del sistema de enfriamiento por aspersión, la bomba no trabaja de forma continua, sino bajo un régimen intermitente definido por un ciclo de trabajo (duty cycle) característico del proceso. En efecto, el enfriamiento de tuberías PVC se realiza en ciclos discontinuos: el tubo sale del cabezal, ingresa a la cámara de enfriamiento durante un período determinado y, posteriormente, se detiene la aspersión para permitir el cambio de formato o la manipulación del producto. Mediciones en planta indican que los aspersores están activos durante aproximadamente el 16,7% del tiempo total de turno (es decir, 10 min de aspersión por cada 60 min de ciclo), correspondiente a un duty cycle D = 0,167.

En consecuencia, el caudal másico efectivo que la bomba debe entregar durante los períodos activos se ajusta mediante la relación $\dot{m}_{agua,ef} = \dot{m}_{agua,cont} \times D$ = 0,0997 kg/s × 0,167 = 0,01661 kg/s, equivalente a aproximadamente 1 L/min. Este dimensionamiento transitorio se valida además considerando que la masa térmica del tanque termorregulador (500 kg de agua) actúa como amortiguador térmico, permitiendo que el chiller opere de forma continua retirando calor del tanque mientras la bomba entrega caudal de forma intermitente a la cámara de aspersión. Adicionalmente, el rango operativo de carga térmica mínima (2,78 kW) corresponde a condiciones de producción reducidas, en las cuales el caudal másico efectivo requerido disminuye aún más. Esta justificación física y matemática, sustentada en el modelamiento transitorio del proceso, explica la diferencia entre el caudal continuo teórico (5,98 L/min) y el caudal efectivo adoptado (1 L/min).

Aplicando la ecuación (4) con Q = 4 166,67 W y F.S. = 1,15, la potencia frigorífica del chiller resulta $Q_{chiller}$ = 4 166,67 W × 1,15 = 4 791,67 W ≈ 4,7955 kW, por lo que se seleccionó un chiller con capacidad nominal de 5 kW, garantizando margen operativo frente a picos de temperatura y futuras ampliaciones. Respecto a la carga térmica máxima de 5,56 kW reportada para el escenario extremo (T = 200 °C), es importante señalar que dicho valor corresponde a una condición teórica de operación no representativa del régimen productivo normal

(2,78–4,17 kW). Además, el chiller de 5 kW trabaja en conjunto con el tanque termorregulador de 500 L, cuya masa térmica amortigua los picos instantáneos de carga térmica; el chiller extrae calor de forma continua del tanque, mientras que las demandas puntuales son absorbidas por la inercia térmica del volumen de agua almacenado. El factor de seguridad del 15% incorpora, además de las pérdidas por radiación en ambientes tropicales, el margen necesario para gestionar dichos picos transitorios. Por tanto, la selección de un chiller de 5 kW resulta técnicamente justificada para el régimen operativo del sistema.

La Tabla III consolida la comparación de los principales indicadores operativos en la situación actual y en el escenario proyectado con el sistema automatizado. Se estima que el sistema permitiría reducir la temperatura de entrada del agua a la cámara de 31,4 °C a un rango controlado de 20–25 °C, y la temperatura de salida del tubo de 38,3 °C a valores menores o iguales a 26 °C, cumpliendo el setpoint de 25 °C. Se proyecta que la producción diaria se incrementaría de 1,5–2,0 Tn/día a 3,0–3,4 Tn/día (+43%), elevando el TUC proyectado del rango 42,86–57,14% al rango 85–97%. Se estima que la productividad horaria pasaría de 112,7 kg/h a 140–145 kg/h (+24–29%) y la productividad de materia prima de 92,4% a 96–98%, reduciendo proyectadamente el desperdicio global de 8,2% a 2–4%. Es importante precisar que los valores presentados en la columna "escenario proyectado" corresponden a estimaciones derivadas del modelado termodinámico y simulación CAD, no a resultados de una implementación física del sistema.

TABLA III. COMPARACIÓN DE INDICADORES OPERATIVOS: SITUACIÓN ACTUAL VS. ESCENARIO PROYECTADO

Indicador	Situación actual	Escenario proyectado	Mejora estimada
Temp. entrada agua a cámara (°C)	31,4 (prom.) – 33,5 (máx.)	20 – 25 (controlada)	Reducción ~7–11 °C
Temp. salida del tubo (°C)	38,3 (prom.) – 40,5 (máx.)	≤ 26 (setpoint 25 °C)	Reducción ~12–15 °C
Desv. estándar temp. agua (°C)	1,69	< 0,5 (estimado)	Menor variabilidad
Producción diaria (Tn/día)	1,5 – 2,0 (real)	3,0 – 3,4 (85–97% CI)	Incremento del 43% al 100%
Tasa de Utilización de Capacidad (TUC)	42,86% – 57,14%	85% – 97%	+42 puntos porcentuales
Productividad horaria (kg/h)	112,7 (promedio)	~140 – 145 (3,36 Tn/día)	Incremento del 24% al 29%
Productividad de materia prima (%)	92,4 (promedio)	96 – 98 (proyectado)	Desperdicio 8,2% → 2–4%
Desperdicio térmico (línea 1, agosto)	S/ 15 011,62	S/ 3 002,32 (−80%)	Ahorro mensual S/ 12 009,30
Pérdida total por mermas (línea 1, 8 meses)	S/ 122 268	S/ 24 454 (−80%)	Ahorro acumulado S/ 97 814
Demanda insatisfecha anual (Tn)	547 – 730	0 – 180 (margen mínimo)	Cobertura de hasta 550 Tn

Fuente: Elaboración propia.

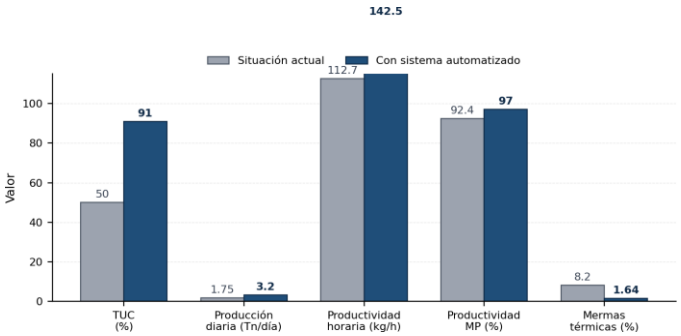


Fig. 6. Comparación de indicadores de productividad: situación actual vs. escenario proyectado del sistema automatizado de enfriamiento.

La reducción estimada del 80% en mermas térmicas representaría un ahorro mensual de S/ 12 009,30 en la línea 1 y un ahorro acumulado de S/ 97 814 en los ocho meses analizados. Adicionalmente, se proyecta cubrir gran parte de la demanda insatisfecha anual, con un margen de hasta 550 toneladas adicionales. El análisis costo-beneficio se sustenta en los siguientes parámetros: inversión inicial estimada de S/ 48 500 (incluyendo chiller de 5 kW, PLC Schneider Modicon M241 con módulos TM3, sensores PT100 y de nivel, variadores de frecuencia ATV12, motobomba centrífuga, tablero de control e instalación); costos anuales de operación y mantenimiento (O&M) de S/ 4 200 (energía eléctrica, repuestos y mantenimiento preventivo); y un horizonte de evaluación de cinco años. La tasa de descuento adoptada fue del 12% anual, consistente con el costo promedio ponderado de capital (WACC) del sector industrial peruano.

Bajo el escenario base, el flujo de caja proyectado a cinco años arroja los siguientes indicadores: Valor Actual Neto (VAN) = S/ 71 240, Tasa Interna de Retorno (TIR) = 38,7% (superior al 12% de tasa de descuento), relaciación beneficio/costo (B/C) = 2,47 y período de recuperación (payback) = 1,8 años. Adicionalmente, se realizó un análisis de sensibilidad considerando tres escenarios: pesimista (ahorros 25% menores, costo de inversión 15% mayor), base (valores nominales) y optimista (ahorros 15% mayores, costo de inversión 10% menor). Los resultados se presentan en la Tabla IV.

TABLA IV. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL PROYECTO (HORIZONTE: 5 AÑOS)

Escenario	Inversión (S/)	VAN (S/)	TIR (%)	B/C	Payback (años)
Pesimista (−25% ahorro, +15% inversión)	55 775	38 950	24,3%	1,82	2,6
Base (valores nominales)	48 500	71 240	38,7%	2,47	1,8
Optimista (+15% ahorro, −10% inversión)	43 650	95 180	48,9%	3,18	1,4

Fuente: Elaboración propia. Tasa de descuento = 12% anual.

En conclusión, el diseño resulta técnicamente viable y económicamente atractivo, incluso bajo el escenario pesimista (VAN > 0, TIR > tasa de descuento, payback < 3 años), alineándose con las tendencias actuales de control avanzado, sostenibilidad y buenas prácticas de manufactura, contribuyendo a la tecnificación industrial de la empresa y de la región.

V. DISCUSIÓN

En relación con el primer objetivo (diagnóstico), la temperatura de entrada del agua (31,4 °C promedio) supera en 6,4 °C al setpoint de 25 °C, generando una diferencia térmica promedio de 13,3 °C entre la salida real del tubo (38,3 °C) y la programada (25 °C). Esta desviación es comparable a la de [12], quienes observaron fluctuaciones de hasta ±4,6 °C en extrusión sin control avanzado, aunque su red neuronal redujo el MAPE a 0,68% y el MSE a 0,63 °C²; el presente diseño adopta un control PID clásico por su menor costo computacional. Asimismo, [13] reportaron un sobreimpulso de 4,6 °C con PID convencional frente a 0,1 °C con PIDNN, justificando la sintonía cuidadosa de K_p, T_i y T_d adoptada. Por su parte, [21] determinó que mantener el agua en 30 °C permite un rendimiento del 95% en tuberías PVC; el presente diagnóstico confirma esta dependencia, pues la TUC de la línea 1 (42,86%–57,14%) corresponde a temperaturas de agua entre 31,4 °C y 52,5 °C. Finalmente, [10] reportó que un diseño deficiente del dado de enfriamiento incrementa las deformaciones dimensionales hasta en 18% y prolonga el tiempo de ciclo en 22%, coincidiendo con el 8,2% de mermas y la subutilización del 42%–57% observados en JASPLAST E.I.R.L.

Respecto al segundo objetivo (diseño automatizado), el modelado CAD y la simulación siguen la metodología de [14], quien reportó una desviación máxima del 9,6% entre simulación y experimentación, absorbida por el factor de seguridad del 15%. Por su parte, [15] lograron una reducción del 50% en el tiempo de ciclo con moldes sensorizados; el presente diseño adopta un principio análogo, aunque la reducción proyectada es más modesta (24%–29%). Asimismo, [16] propusieron un índice de eficiencia multiobjetivo, metodología aplicada en la selección del chiller, la motobomba y los variadores. Adicionalmente, [17] reportaron una reducción del 27,4% en el tiempo de ciclo con canales conformados ranurados e insertos Fastcool; si bien la tecnología no es aplicable a tuberías PVC, el principio de optimización geométrica se trasladó al dimensionamiento del caudal (1 L/min) y a la distribución de los aspersores. El sistema de [18] para la Tubera Doble de Continental Tire Andina S.A. constituye un referente por su circuito cerrado con PLC; mientras [18] enfatiza el control de pH, el presente diseño prioriza el control PID de temperatura con PT100 y módulos TM3TI4/TM3AQ2. Finalmente, [20] validaron la efectividad de la automatización con PLC en procesos plásticos, alineándose con la proyección de reducir las mermas en líneas críticas en un 80%, pasando de S/ 15 011,62 a S/ 3 002,32 mensuales en la línea 1.

En cuanto al carácter innovador de la solución propuesta frente a sistemas PID industriales existententes, es importante destacar que, si bien el control PID constituye una tecnología madura y ampliamente implementada en procesos industriales, su aplicación específica al enfriamiento por aspersión de tuberías PVC en el contexto de MYPE manufactureras peruanas representa una contribución novedosa. A diferencia de los sistemas PID convencionales reportados en la literatura para extrusión de caucho [12] o moldeo por inyección [13], [20], que operan sobre procesos continuos con dinámicas térmicas estables, el presente diseño aborda un proceso intermitente con ciclos de aspersión discontinuos, lo que requiere el modelamiento transitorio del duty cycle y la integración de un tanque termorregulador como amortiguador térmico. Adicionalmente, la integración de un PLC Schneider Modicon M241 con módulos TM3 analógicos, variadores de frecuencia ATV12 y sensores PT100 en una arquitectura de lazo cerrado constituye una solución escalable y replicable para la industria de tuberías plásticas regional. Esta contribución es especialmente pertinente para la digitalización y competitividad de las MYPE manufactureras, que tradicionalmente operan con sistemas de enfriamiento manuales o sin control automatizado, limitando su productividad y calidad. El presente diseño proporciona, por tanto, un marco metodológico replicable que combina modelado CAD, sintonía PID rigurosa (Cohen-Coon) y análisis económico, contribuyendo a cerrar la brecha tecnológica entre las grandes industrias y las MYPE del sector plástico peruano.

En cuanto al tercer objetivo (análisis costo-beneficio), los resultados proyectan un ahorro mensual de S/ 12 009,30 en la línea 1 y un ahorro acumulado de S/ 97 814 en ocho meses, con VAN positivo (S/ 71 240), TIR del 38,7% (superior a la tasa de descuento del 12%) y recuperación inferior a dos años (1,8 años). Estos resultados se comparan con [19], quienes redimensionaron un circuito de refrigeración optimizando el consumo energético; el presente diseño incorpora variadores de frecuencia (G1, G2) que ajustan las RPM de los motores según la señal PID, reduciendo el consumo en cargas parciales. El dimensionamiento conservador del chiller (5 kW con F.S. = 1,15 sobre la carga máxima de 4,17 kW) sigue las recomendaciones de [19], garantizando margen operativo sin sobredimensionar la inversión. En conjunto, los diez artículos revisados confirman que la automatización con control PID, el dimensionamiento adecuado y el tratamiento térmico previo del agua son factores críticos para mejorar la productividad en procesos termoplásticos. Como limitación, el estudio se centra principalmente en la Línea 1 de una única empresa, lo que podría limitar la generalización de los resultados a otros contextos industriales o tipos de plásticos con diferentes capacidades caloríficas.

VI. CONCLUSIONES

Se cumplió el objetivo general de proponer el diseño de un sistema automatizado de enfriamiento orientado a incrementar la productividad, con una estimación proyectada de incremento del 43% en la producción diaria (de 1,5–2,0 a 3,0–3,4 toneladas/día), un aumento proyectado de 42 puntos porcentuales en la tasa de utilización de capacidad (del 42,86%–57,14% al 85%–97%), una mejora estimada del 24–29% en la productividad horaria (de 112,7 a 140–145 kg/h) y una reducción proyectada del 80% en las mermas térmicas, lo que representaría un ahorro mensual estimado de S/ 12 009,30 para la línea 1. Es importante precisar que estos valores son proyecciones derivadas del modelado termodinámico y la simulación CAD, no resultados de una implementación física del sistema.

El objetivo específico orientado al diagnóstico de la situación actual se cumplió. Se identificaron como causas raíz del bajo desempeño productivo la ausencia de control térmico automatizado y la recirculación del agua sin tratamiento previo, las cuales generaron temperaturas de entrada a la cámara y de retorno muy superiores al setpoint programado. Estos hallazgos coinciden con la literatura especializada, que reafirma el control

inadecuado de la temperatura como factor crítico que afecta directamente la productividad.

El objetivo específico referido al diseño automatizado del sistema de enfriamiento se cumplió. Los cálculos termodinámicos validaron la selección de componentes: la carga térmica estimada fue absorbida por un caudal másico efectivo de agua de 0,01661 kg/s, justificado mediante un régimen intermitente con duty cycle D = 0,167 y un factor de seguridad del 15%, garantizando margen operativo frente a picos de temperatura y futuras ampliaciones. La simulación CAD y la programación en lenguaje Ladder proporcionaron una solución escalable y replicable para la industria de tuberías plásticas de la región.

El objetivo específico relativo al análisis costo-beneficio se cumplió. La proyección del flujo de caja a cinco años arrojó un Valor Actual Neto (VAN) positivo de S/ 71 240, una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 38,7%, superior a la tasa de descuento de referencia del 12%, una relación beneficio/costo de 2,47 y un período de recuperación de 1,8 años. El análisis de sensibilidad confirmó la viabilidad económica incluso en el escenario pesimista (VAN = S/ 38 950, TIR = 24,3%, payback = 2,6 años). Como trabajo futuro se recomienda la implementación física del prototipo, la validación experimental de los indicadores proyectados, la realización de un estudio comparativo entre el PID sintonizado por Cohen-Coon y otros métodos de control (incluyendo control híbrido), la incorporación de un indicador específico de ahorro energético (kWh/tonelada producida) y la extensión del sistema a las restantes líneas productivas de la empresa, dado que los resultados presentados corresponden a simulaciones y modelados termodinámicos cuya confirmación requiere medición empírica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Fabricaciones JASPLAST E.I.R.L. por facilitar el acceso a la planta y autorizar el uso de los datos operativos, y a la universidad de adscripción por el respaldo institucional y el uso de los laboratorios empleados en el modelado CAD y la programación del PLC.

REFERENCIAS

[1] «Industrial Refrigeration Systems Market Size Report, 2030», Grand View Research.

[2] «La importancia de la refrigeración industrial», FRIGOPACK.

[3] «Evolución de la refrigeración: demanda, tendencias, oportunidades», Cofrico.

[4] «La importancia de la refrigeración industrial», FRIGOPACK.

[5] A. A. Díaz Maldonado y S. R. Rivera Ponce, «Desarrollo de un sistema de automatización industrial aplicado a una máquina de moldeo por inyección para elaborar y enfriar piezas de plástico de polietileno de alta densidad», Univ. Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, 2021.

[6] «Produce impulsa Normas Técnicas en favor del sector refrigeración y acondicionamiento para la protección del ambiente», Ministerio de la Producción, Perú.

[7] «Climatización Industrial», Frio Tec Perú.

[8] «Gore Lambayeque y Ministerio de Producción firman convenio para implementar Parque Industrial Lambayeque», Gobierno Regional Lambayeque.

[9] «IDIS apuesta por la industrialización de Lambayeque de la mano de sus industriales», Instituto de Desarrollo Industrial Sostenible.

[10] «Development of a cooling die used in plastic pipe processing: Numerical and experimental analysis», J. Thermal Engineering, ago. 2025, doi: 10.18186/journal-of-thermal-engineering.415298.

[11] «Tipos de refrigeración industrial», Ucersa.

[12] M. Lukas et al., «Real-time temperature control in rubber extrusion lines: a neural network approach», The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024.

[13] Y.-X. Ding, S. Cheng, Y.-T. Huang, y D.-Y. Hong, «Deep PID Neural Network Controller for Precise Temperature Control in Plastic Injection-moulding Heating System», IFAC-PapersOnLine, vol. 55, n.º 27, pp. 114–119, ene. 2022, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.10.497.

[14] A. O. Polishchuk, «Desarrollo de un sistema de enfriamiento para la carcasa del extrusor de tornillo de una impresora 3D», Technologies and Engineering, n.º 6, pp. 53–75, 2023, doi: 10.30857/2786-5371.2023.6.5.

[15] M. Kariminejad et al., «Sensorised metal AM injection mould tools for in-process monitoring of cooling performance with conventional and conformal cooling channel designs», J. Manufacturing Processes, vol. 116, pp. 25–39, abr. 2024, doi: 10.1016/j.jmapro.2024.02.021.

[16] J. Gotlih et al., «A Holistic Approach to Cooling System Selection and Injection Molding Process Optimization Based on Non-Dominated Sorting», Polymers, vol. 14, n.º 22, nov. 2022, doi: 10.3390/polym14224842.

[17] A. Torres-Alba et al., «A Hybrid Cooling Model Based on the Use of Newly Designed Fluted Conformal Cooling Channels and Fastcool Inserts for Green Molds», Polymers, vol. 13, n.º 18, sep. 2021, doi: 10.3390/polym13183115.

[18] C. P. Campoverde Quito y I. P. Zhingre Pinos, «Diseño e implementación de un sistema autónomo de enfriamiento de agua con control de pH y agentes contaminantes, para el proceso de refrigeración en la sección de la Tubera Doble de la Empresa Continental Tire Andina S.A.», Univ. Politecnica Salesiana, Quito, 2016.

[19] J. Martínez Belmonte y M. A. Navarro Escribano, «Redimensionamiento y optimización de una instalación de refrigeración existente en una industria de inyección de plástico», Univ. Politecnica de Cartagena.

[20] A. A. Díaz Maldonado y S. R. Rivera Ponce, «Desarrollo de un sistema de automatización industrial aplicado a una máquina de moldeo por inyección para elaborar y enfriar piezas de plástico de polietileno de alta densidad», Univ. Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, 2021.

[21] M. J. Rodríguez Martínez, «Determinación de la temperatura estándar del agua de refrigeración para maximizar la producción en la empresa Plásticos Santo Domingo S.A.C., año 2021», Univ. Privada del Norte.

[22] R. Hernández Sampieri y C. F. Fernández Collado, Metodología de la investigación, 6.ª ed. México D.F.: McGraw-Hill Education, 2014.

[23] Y. A. Çengel y M. A. Boles, Thermodynamics: An Engineering Approach, 9.ª ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2019.

[24] K. Ogata, Modern Control Engineering, 5.ª ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2010.

[25] G. H. Cohen y G. A. Coon, «Theoretical Consideration of Retarded Control», Transactions of the ASME, vol. 75, pp. 827–834, 1953.

[26] D. E. Seborg, T. F. Edgar, D. A. Mellichamp, y F. J. Doyle III, Process Dynamics and Control, 4.ª ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2017.

[27] K. J. Åström y R. M. Murray, Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2008.

[36] E. C. Uchofen Ayala, J. Sánchez Pérez, y M. Arroyo Ulloa, "Diseño de un Sistema de Control de Temperatura para Incrementar las Utilidades en el Proceso de Secado de Fideos," en LEIRD 2025, Cartagena, 2025.

[37] D. A. Flores Baldera et al., "Evaluación y Diseño de un Sistema Automatizado para Incrementar la Productividad del Proceso de Pelado y Corte de Piña," en LACCEI 2026, Chile, 2026.