



**Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de  
Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)**

Miguel Ángel Peña López

Angélica Tatiana Rincón Baracaldo

Universidad Ean

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Procesos

Bogotá, Colombia

18/Febrero/2026

**Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de  
Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)**

**Miguel Ángel Peña López**

**Angélica Tatiana Rincón Baracaldo**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

**Magister en Ingeniería de Procesos**

Director (a):

Luisa Fernanda Carvajal Díaz

Modalidad:

**Artículo de Investigación.**

Universidad Ean

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Procesos

Bogotá, Colombia

17/Diciembre/2025

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del director del trabajo de grado

Ciudad, día/mes/año

Dedicamos este trabajo a nuestras familias y amigos, quienes han sido nuestra fuente constante de apoyo, paciencia y motivación. A ellos, por recordarnos que la disciplina, incluso en los momentos más retadores, siempre conduce a resultados significativos.

A nuestros profesores, por inspirar nuestra curiosidad y enseñarnos el valor del pensamiento crítico.

### **Agradecimientos**

Agradecemos a nuestra institución educativa, así como a los docentes que nos acompañaron y guiaron durante el desarrollo de este trabajo, en especial a quienes orientaron la investigación y aportaron su conocimiento para fortalecer el enfoque del proyecto.

A nuestras familias por su apoyo incondicional y comprensión durante cada etapa de este proceso académico.

## Resumen

La presente investigación plantea el diseño de un sistema de control automatizado mediante PLCSIM para un reactor de polimerización en emulsión, enfocado específicamente en aplicaciones del sector de adhesivos a partir del vinil acetato monómero (VAM). La finalidad de este estudio es brindar una herramienta complementaria para el control del proceso, que fortalezca la seguridad operativa, contribuyendo a la estabilidad y desempeño del sistema. A nivel industrial, la polimerización presenta múltiples desafíos, especialmente por los riesgos asociados a la inestabilidad de la reacción, la cual puede originarse por variaciones inesperadas en variables como la temperatura o presión. Actualmente, los avances tecnológicos en sistemas de control (fijos, de lazo abierto, de lazo cerrado, entre otros) ofrecen nuevas posibilidades para mejorar la operación de estos procesos, muchos de los cuales continúan gestionando de forma manual o semiautomática.

Para enfrentar este reto, la investigación se desarrolló a partir de los siguientes objetivos, primero se identificaron y clasificaron las variables del proceso de polimerización, incluyendo los parámetros químicos y la naturaleza de las perturbaciones. Segundo, se seleccionaron los componentes del sistema de control, los cuales forman parte del diagrama funcional del proceso de polimerización. Posteriormente, se diseñó un modelo que permitiera evaluar el impacto de la automatización sobre los parámetros operativos del proceso. Finalmente, se validó el diseño propuesto analizando el desempeño del sistema bajo distintos escenarios, determinando su impacto en la seguridad y la eficiencia productiva; constituyéndose en una herramienta para la toma de decisiones en la industria química.

**Palabras clave:** PLCSIM; polimerización; seguridad industrial; control proceso; HMI; VAM.

### **Abstract**

This research proposes the design of an automated control system using PLCSIM for an emulsion polymerization reactor, specifically focused on applications in the adhesive sector based on vinyl acetate monomer (VAM). The purpose of this study is to provide a complementary tool for process control that enhances operational safety and contributes to system stability and performance. At the industrial level, polymerization processes present multiple challenges, particularly due to the risks associated with reaction instability, which may arise from unexpected variations in variables such as temperature or pressure. Currently, technological advances in control systems (fixed, open-loop, closed-loop, among others) offer new opportunities to improve the operation of these processes, many of which are still managed manually or semi-automatically.

To address this challenge, the research was developed based on the following objectives. First, the critical variables of the polymerization process were identified and classified, including chemical parameters and the nature of potential disturbances. Second, the components of the control system were selected as part of the functional diagram. Subsequently, a model was designed to evaluate the impact of automation on the process operating parameters. Finally, the proposed design was validated by analyzing system performance under different scenarios, determining its impact on safety and productive efficiency, thus constituting a decision-support tool for the chemical industry.

**Keywords:** PLCSIM; polymerization; industrial safety; process control; HMI, VAM.

# Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

## Introducción

La automatización de las operaciones industriales ha sido un factor fundamental para mejorar la seguridad y la eficiencia operacional en diversos procesos productivos, específicamente aquellos que involucran transformaciones químicas. Dentro de este sector se encuentra la polimerización del vinil acetato monómero (VAM), el cual es un proceso fundamental para la producción de diversos materiales adhesivos, que tienen como principio la unión de varios sustratos entre sí (Castro Higuera & Herreño Gallego, 2020). Este tipo de reacción es de naturaleza exotérmica, y puede volverse inestable debido a la interacción entre el monómero (vinil acetato), iniciador y disolvente, lo que puede conllevar diversos riesgos como reacciones incontroladas, fugas térmicas y fallos en el sistema. Además, su sensibilidad a variaciones en condiciones operativas como la temperatura, presión (Zhao et al., 2019) o dosificación irregular de materia prima (Pladis & Kiparissides, 2014), representan un desafío significativo y es una de las causas más relacionadas a incidentes en plantas químicas, debido a reacciones no controladas. (Wang & Mei, 2023).

En este contexto, el monitoreo y control sobre operaciones industriales como la polimerización del VAM es clave para garantizar procesos eficientes, dentro de los parámetros a supervisar se encuentran alimentación del iniciador (Pladis & Kiparissides, 2014), la temperatura de calentamiento y enfriamiento, así como la velocidad de agitación durante el proceso productivo (Bai & Guo, 2020). En este escenario, la automatización industrial desempeña un papel crucial al mejorar los estándares de calidad, optimizar la estabilidad del proceso, reducir labores físicas y repetitivas, facilitar la toma de decisiones oportuna, mantener la continuidad operativa, y el control sobre el proceso (Pérez López, 2015). Así mismo, la incorporación con un sistema de control en procesos como la polimerización actúa como una medida preventiva ante los incidentes químicos relacionados con una inadecuada gestión durante la manipulación de esta reacción; en consecuencia, las compañías recurren al uso de

## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

software como una herramienta clave para analizar el comportamiento de un proceso a nivel industrial y evaluar su respuesta frente a diversas variables (Medina & Guadayol, 2010).

La validación de procesos en un entorno digital a nivel industrial ha tomado gran importancia por medio de la industria 4.0 y la necesidad de procesos productivos eficientes, seguros y de gran calidad. Particularmente, PLCSIM es una herramienta clave para el análisis de procesos de automatización, utilizando controladores lógicos programables (PLC) en entornos industriales para evitar paradas inesperadas, cantidades incorrectas o incidentes de seguridad (Medina & Guadayol, 2010). Esta herramienta, permite realizar depuración de la lógica de automatización, pruebas de funcionamiento y eficiencia en etapas de procesos de automatización, todo ello por medio de diversos lenguajes como Ladder, Grafcet (SFC), texto estructurado (IL) entre otros, favoreciendo la reducción de problemas y riesgos derivados de diferencias entre la programación del PLC y su transmisión en un proceso productivo. Este software se utiliza en gran medida por sectores como manufactura, química, farmacéutica, energética, logística entre otros, en donde es importante garantizar una digitalización robusta del proceso productivo, lo que conlleva a una producción resiliente y eficaz. (López Pérez, 2023).

Este artículo no solo responde a una necesidad del entorno industrial, sino que al mismo tiempo pretende contribuir al desarrollo del conocimiento técnico, a través del diseño de una solución automatizada, el cual pueda adaptarse a diversas realidades del proceso de polimerización.

Bajo esta perspectiva, ¿Es posible identificar estrategias de monitoreo y control, con el propósito de automatizar el proceso de polimerización del VAM, mediante PLCSIM y de esta forma reducir el riesgo operativo y contribuir al desempeño del sistema?

### Marco teórico

La polimerización es un fenómeno químico en la cual moléculas de monómeros se agrupan entre sí, dando lugar a macromoléculas conocidas como polímeros, estos se entrecruzan y el resultado de la reacción es el aumento en el peso molecular del polímero, el cual es el responsable de la formación de materiales sintéticos, como plásticos, fibras y adhesivos (Caldera Villalobos & Herrera González, 2019). En general, las propiedades iniciales de los polímeros dependen de factores como el tiempo de reacción, temperatura de proceso, tipo de monómero y el mecanismo de reacción utilizado. (Castro Higuera & Herreño Gallego, 2020).

En relación con los tipos de polimerización, existen dos mecanismos principales: por adición y por condensación. La polimerización por adición ocurre cuando los monómeros se unen sucesivamente formando polímeros a través de una reacción en cadena, donde el monómero se une entre sí para formar cadenas lineales o ramificadas, donde los monómeros se van añadiendo al núcleo principal mediante dobles enlaces, este proceso se realiza mediante radicales libres o especies iónicas. Este tipo de reacción es clave para la producción de materiales como el etileno, propileno, poliestireno y cloruro de polivinilo (PVC) (Pinto Vizcarra et al., 2024).

Por otro lado, la polimerización por condensación o por crecimiento en etapas implica la reacción entre distintos copolímeros para producir monómeros que luego se unirán entre sí para dar lugar al polímero, durante esta fase de forma simultánea se liberan pequeñas moléculas como agua o ácido clorhídrico como subproducto. Este mecanismo es característico en la síntesis de polímeros como los poliésteres (Cortizo et al., 2023).

Dentro de los procesos de polimerización por adición se encuentra la reacción por emulsión, el cual busca la formación de cadenas con peso molecular alto (Cortizo et al., 2023) y

## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

viscosidad elevada, en este proceso heterogéneo el monómero (vinil acetato o VAM) no es soluble en el medio de reacción, por lo cual, se requiere un emulsificante para dar equilibrio y favorecer la reacción, y un iniciador para dar comienzo al proceso de polimerización. Su eficiencia depende de variables como la concentración de materia prima y la temperatura, las cuales deben ser controladas para asegurar la formación y estabilidad del polímero (Augusto & Morales, 2018).

En consecuencia, investigaciones recientes resaltan la importancia de abordar retos de monitoreo y control sobre operaciones industriales como la polimerización. Esto como resultado a que estudios han evidenciado que las reacciones poliméricas, al involucrar monómeros (generalmente térmicamente inestables y volátiles), presentan un riesgo importante de runaway térmico, descomposiciones secundarias e incrementos de presión (Liao et al., 2023)(Pladis & Kiparissides, 2014), En este sentido, la automatización juega un papel importante al permitir la supervisión de las variables del proceso y garantizar la repetibilidad y seguridad de este.

De acuerdo con lo mencionado por Hudedmani et al. (2017), la automatización permite que las máquinas ejecuten secuencias específicas de tareas previamente programadas por el ser humano, lo cual se traduce en reducción de errores humanos, disminución de costos y aumento de la efectividad operativa. Además, la integración de disciplinas como la electromecánica e informática han permitido el desarrollo de equipos capaces de trabajar con mayor precisión, repetibilidad y autonomía, lo que ha contribuido a su incorporación en procesos industriales (Hudedmani et al., 2017).

Por su parte (Agudelo et al., n.d.), establece que la automatización facilita la operación de procesos sin intervención humana, favoreciendo la homogeneidad y la eficiencia del sistema; puesto que, la implementación de tecnologías permite minimizar tareas repetitivas, mejorar la

## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

calidad del producto y disminuir costos relacionados a fallos humanos. Ambos autores coinciden en que la automatización es un elemento clave para garantizar procesos más confiables y eficientes, especialmente aquellos que requieren una supervisión de variables críticas.

En el sector industrial, la automatización no solo optimiza los procesos industriales, sino que funciona como un núcleo de control para la supervisión y toma de decisiones en tiempo real, permitiendo una gestión independiente y eficiente de los parámetros operativos como temperaturas, presiones, flujos y demás variables clave de los procesos (Córdoba Nieto, 2006). En la tabla 1 de acuerdo con Hudedmani et al. (2017), se establece un comparativo de los sistemas de control utilizados actualmente para diferentes procesos industriales abarcando una amplia variedad, desde los métodos más básicos, hasta los más complejos. Entre los métodos mostrados, se incluyen el control manual, el control lógico fijo (relés), el control lógico secuencial (CLS), el control PID (Proporcional integral y derivativo), los sistemas en lazo abierto, lazo cerrado, así como técnicas avanzadas como el control difuso, el control predictivo (MPC) y los sistemas supervisados SCADA que actúan como una etapa de supervisión y gestión de la operación en general (Kuo, 1997). Por medio de la digitalización robusta de los procesos industriales, se da lugar a sistemas que más allá del control de las variables críticas, realizan el monitoreo en tiempo real de KPI's y métricas clave, que permiten realizar predicciones ante fallos y optimización de procesos, lo que se traduce en la maximización de la eficiencia y la mitigación sistemática de fallos en el proceso productivo.

**Tabla 1**

*Sistemas de control*

<b>Controles actuales</b>				
<b>Método de Control</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Aplicaciones Típicas</b>
<b>Control Manual</b>	Operador que interviene directamente en el proceso.	Simple, bajo costo.	Propenso a errores, no repetible, no eficiente.	Laboratorios, tareas no críticas.
<b>Control Lógico Fijo (Relés)</b>	Lógica cableada con componentes físicos.	Muy estable, sin programación.	Rígido, difícil de modificar.	Sistemas antiguos, maquinaria básica.
<b>Control Lógico Secuencial (CLS)</b>	Control basado en pasos secuenciales usando PLCs o software SCADA.	Modular, flexible, visual, ideal para procesos por etapas.	Más complejo de programar que lógica fija.	Procesos batch, líneas de producción.
<b>Control PID (Proporcional-Integral-Derivativo)</b>	Mantiene variables continuas (temperatura, presión, etc.).	Preciso, autónomo, responde a perturbaciones.	No es adecuado para lógica secuencial.	Temperatura, presión, nivel, flujo continuo.
<b>Control en Lazo Abierto</b>	Ejecuta sin retroalimentación del proceso.	Simple, rápido.	No se adapta a variaciones del proceso.	Sistemas donde las condiciones son estables.

<b>Control en Lazo Cerrado</b>	Usa retroalimentación (sensor-actuator).	Ajusta en tiempo real.	Más costoso, requiere sensores confiables.	Control de velocidad, temperatura, etc.
<b>Control Difuso</b>	Control inteligente basado en lógica borrosa.	Bueno para sistemas imprecisos o inciertos.	Difícil de programar, no siempre justificable.	Procesos no lineales o complejos.
<b>Control Predictivo (MPC)</b>	Predice comportamiento futuro con modelos matemáticos.	Muy preciso, optimización energética.	Computacionalmente costoso, requiere modelado.	Industria química, refinación.
<b>Control Supervisado (SCADA)</b>	Sistema que integra monitoreo y control remoto de procesos.	Interfaz amigable, alarmas, registro de datos.	Necesita hardware/software dedicado, no sustituye al control base.	Grandes plantas, integración de procesos.

*Nota:* La siguiente tabla ilustra los diferentes tipos de sistemas de control utilizados en la industria y las características pertinentes asociadas a cada una de ellas. Información recopilada de (Hudedmani et al., 2017).

## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

Cada método presenta ventajas y limitaciones que dependen de factores como la complejidad del proceso, el presupuesto disponible y la facilidad de mantenimiento. En el caso de la polimerización, la elección del sistema de control está condicionada por las variables críticas definidas, ya que estas determinarán el nivel de flexibilidad o robustez requerido para asegurar un desempeño eficiente.

## **Metodología**

El desarrollo del diseño automatizado para la polimerización del VAM cuenta con una metodología mixta que unifica elementos cuantitativos y cualitativos con el objetivo de abordar el estudio de manera integral y garantizar la solidez del modelo propuesto. Desde la perspectiva cuantitativa, se emplearon herramientas de validación para analizar la respuesta del sistema ante variaciones en variables críticas como temperatura, presión y velocidad de agitación, permitiendo evaluar la estabilidad operacional y el comportamiento dinámico del proceso bajo diferentes condiciones. Al mismo tiempo el enfoque cualitativo se orientó a comprender el funcionamiento global de la polimerización, identificando criterios de diseño y referentes teóricos en la literatura.

### **Enfoque y alcance de la investigación**

De acuerdo con la naturaleza del problema, la investigación se estructuró bajo un enfoque mixto no experimental, teniendo en cuenta que no se operaron directamente las variables del proceso real, sino que se analizó su comportamiento mediante la aplicación de dos softwares (TIA Portal V15.1 y WinCC Runtime advanced 15.1) y la revisión bibliográfica. El alcance del estudio se delimita a un diseño descriptivo correlacional, debido a que se describe el comportamiento de las variables críticas del proceso de polimerización, se analizan las relaciones entre estas y la respuesta del sistema ante perturbaciones.

### **Población y muestra**

Dado que el estudio se desarrolló sobre un proceso químico previamente establecido, la población corresponde a los parámetros operativos y condiciones de operación reportados en la literatura especializada sobre polimerización de VAM, así como a las configuraciones de automatización aplicables en la industria química. La muestra se definió como el conjunto de variables críticas que intervienen en el sistema y afectan la estabilidad de la operación. Estas

## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

variables representan los elementos esenciales que determinan la estabilidad del proceso y constituyen la base para la construcción del modelo de automatización.

### **Instrumentos**

Para la recolección y análisis de la información se emplearon los siguientes instrumentos:

- **Revisión documental:** A través de libros, publicaciones y artículos, para identificar rangos operativos y criterios de automatización reportados en la literatura.
- **Diseño conceptual del sistema:** Microsoft Visio como herramienta para definir la arquitectura del sistema, la relación entre variables y la lógica de control.
- **Plataforma de automatización:** TIA Portal V15.1 y WinCC Runtime advanced 15.1, como herramientas para programar la lógica PLC y representar el comportamiento del sistema en un entorno virtual.

El desarrollo del diseño automatizado para la polimerización del VAM, requiere de la aplicación ordenada de diversas etapas que garantizaran la obtención de resultados confiables y pertinentes para el estudio. Este procedimiento integró actividades de análisis técnico, revisión bibliográfica, diseño conceptual y procesos de validación del diseño. Cada una de estas fases se estructuró para asegurar que el diseño se fundamente en criterios teóricos, el comportamiento propio del proceso y en los requerimientos operativos. A continuación, se describe la metodología empleada (García Dunna & García Reyes Leopoldo Cárdenas Barrón, 2013):

### **Procedimiento**

#### 1 Identificación de variables

Realizar un diagnóstico del proceso de polimerización de VAM con el objetivo de identificar las variables clave que afectan su comportamiento (de control y de proceso). Este análisis

## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

permitió delimitar el alcance operativo del sistema, así como las variables críticas a ser controladas.

### 2 Selección de componentes

En esta etapa se evaluaron los componentes de automatización adecuados para el proceso de polimerización del VAM, tales como sensores, actuadores y sistemas de control, teniendo en cuenta la compatibilidad con las variables identificadas.

### 3 Diseño conceptual del proceso

Se consultó en la literatura como diferentes autores han abordado la automatización en procesos similares. El resultado fue un modelo gráfico del sistema automatizado, utilizando Visio como herramienta para representar de forma clara y funcional la relación entre las variables, los componentes y la lógica del control seleccionada.

### 4. Definición de condiciones base para la operación del modelo

Esta etapa contempló la identificación de la información esencial para representar el comportamiento del proceso de polimerización. Para ello, se recopilan datos relacionados con las variables que intervienen en el proceso, considerando tanto las condiciones de entrada como de salida.

A partir de la revisión bibliográfica, se establecieron rangos de operación para las variables definidas, con el fin de adaptar el modelo a condiciones reales del proceso de polimerización. Además, se determinó la magnitud de las perturbaciones aplicadas a las variables de control, con las cuales se evaluará y validará el diseño propuesto.

# Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

## 5. Construcción y verificación del diseño

Para la construcción del diseño de automatización del proceso de polimerización VAM, se utilizó el software TIA Portal V15.1 de la empresa alemana Siemens. La interfaz de monitoreo y control de proceso se realizó en el software WinCC Runtime advanced 15.1, para la creación de interfaces hombre-máquina (HMI).

## 6. Estudios de caso

En esta etapa se realizaron pruebas sobre el diseño propuesto, bajo una serie de escenarios para analizar el comportamiento y respuesta del sistema ante perturbaciones.

**Tabla 2**

*Escenarios de análisis*

<b>Escenario</b>	<b>Descripción</b>
1	Modelo con perturbaciones en la temperatura y presión
2	Modelo con perturbación en la velocidad de agitación

*Nota:* La siguiente tabla ilustra los escenarios a evaluar sobre el diseño de automatización propuesto. Fuente propia.

### **Técnicas para el análisis de la información**

Para analizar la información se tendrá en cuenta el enfoque cualitativo, orientado a revisar la definición del proceso, la selección de las variables involucradas y los criterios considerados para su control. Esta etapa permite analizar si los rangos de operación del proceso, la elección de los componentes y la coherencia del diseño planteado, se ajustan a los aspectos técnicos que intervienen en la operación del proceso, teniendo en cuenta la información recopilada durante la revisión documental.

## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

Posteriormente, se llevará a cabo el análisis cuantitativo teniendo en cuenta los rangos de operación de las variables críticas (temperatura, presión y velocidad de agitación), junto con la revisión de las gráficas obtenidas en cada escenario. A partir de esto será posible entender el comportamiento del diseño en diferentes escenarios, evaluando su capacidad para mantener la estabilidad del proceso.

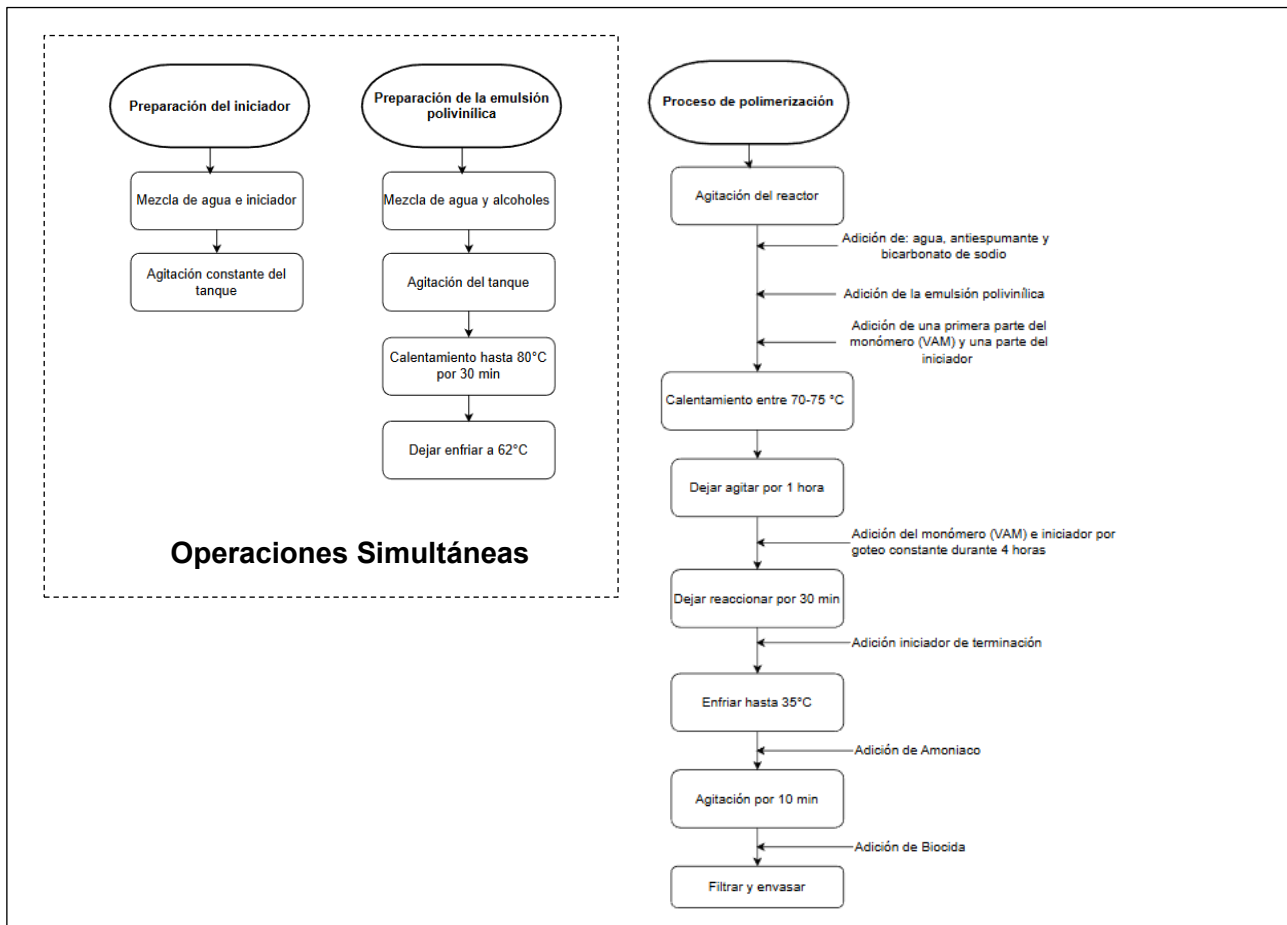
## Resultados

### 1 Identificación de variables

Para definir las variables críticas del sistema de control, resulta esencial comprender el proceso de polimerización del vinil acetato monómero (VAM). La Figura 1 ilustra las etapas involucradas, incluyendo la preparación del iniciador y la emulsión polivinílica. Este esquema resume los pasos clave descritos en la literatura por los autores: (Augusto & Morales, 2018), (Herreño Gallego, 2020), (Merado Ortega, 2015) y (Castro Higuera & Herreño Gallego, 2020), y sirve como base para identificar los puntos de control más relevantes.

**Figura 1**

*Proceso de polimerización del VAM*



## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

*Nota:* La siguiente figura ilustra el Proceso de polimerización del VAM y los pasos intermedios (preparación de la emulsión polivinílica e iniciador). Fuente propia.

A partir del análisis del proceso de polimerización del VAM, se identificaron las variables que intervienen en el proceso, las cuales se clasificaron en variables de proceso y variables de control. Las primeras corresponden a las condiciones propias del sistema, mientras que las variables de control son aquellas que, aunque forman parte del proceso, pueden ser reguladas o ajustadas para mantener la estabilidad de la reacción, garantizando la calidad del producto y asegurando la seguridad operativa. En la Tabla 3 se presentan estas variables junto con su fundamento técnico.

**Tabla 3**

*Variables*

<b>Variable</b>	<b>Tipo</b>	<b>Fundamento</b>
Temperatura	Control	Un aumento descontrolado puede causar un runaway térmico (aumento descontrolado de la temperatura), comprometiendo la seguridad del proceso (Ghadipasha et al., 2016).
Tiempo	Proceso	Establece la extensión de la reacción de polimerización, y actúa como una variable de respuesta.
Velocidad de agitación (reactor)	Control	Asegura la homogeneidad de la mezcla y una eficiente transferencia de calor. Una agitación deficiente genera gradientes de temperatura y disminuye la calidad del producto (Merado Ortega, 2015)(Loor Ch et al., 2022). También puede afectar el tiempo de residencia y la velocidad de conversión (Ogunnaike et al., 2010).

## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

Nivel del tanque	Proceso	Determina el nivel de carga de los reactivos, se considera una variable de seguimiento, pero no se controla.
Flujo de adición (iniciador y VAM)	Proceso	La estabilidad en el flujo de estos compuestos forma parte del proceso de polimerización, aunque en este estudio se utiliza únicamente como variable de seguimiento.
Presión (reactor)	Control	Es clave para garantizar una adecuada velocidad de reacción y la calidad del producto. Variaciones en la presión influyen en la transferencia de calor y en la eficiencia global (Garcia Jaimes et al., 2023).

*Nota:* La siguiente tabla ilustra las variables de control y proceso asociadas a la polimerización del VAM. Elaboración propia a partir de (Ghadipasha et al., 2016) (Merado Ortega, 2015)(Loor Ch et al., 2022) (Ogunnaike et al., 2010) (Garcia Jaimes et al., 2023).

### 2 Selección de componentes

La selección de sensores y actuadores es primordial para el correcto funcionamiento del flujo automatizado del proceso de polimerización de vinil acetato monómero. Los instrumentos están distribuidos a lo largo de todas las etapas del proceso, desde la preparación inicial de los componentes principales, hasta la dosificación y control de las variables del proceso, lo que permite asegurar un resultado óptimo cuando se habla de calidad del producto final.

## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

Para la selección de la sensórica (Anexo A), se realizó una validación exhaustiva del mercado actual y la implementación de estos en proyectos similares de automatización de procesos de polimerización. Luego de realizar una comparativa, se encuentra que el uso de sensores de radar como el propuesto "Micropilot FMR10" se utiliza ampliamente en la industria, ya que ofrecen una medición precisa sin hacer contacto con los fluidos, así como para la temperatura se sugiere una sonda "PT100", junto con un transmisor "ITEMP\_TMT71" para garantizar una señal estable direccionada hacia el PLC y un control adecuado de las válvulas (Endress+Hauser, n.d.-b, n.d.-a) (Wika, 2010)(Endress+Hauser, n.d.-c) (Siemens, 2014b)(Liquid Controls, n.d.).

Respecto a la selección de los actuadores (Anexo A), los cuales son elementos del proceso que ejecutan las acciones definidas por el sistema de control, se realizó una validación en diferentes modelos de automatización, donde se evidencia que los componentes deben ser seleccionados de acuerdo con el tipo de proceso. Para el caso de la automatización en el proceso de polimerización VAM, para las válvulas de paso, se escogió un posicionador digital Fisher DVC6200 por su estándar en la industria, ya que recibe una entrada analógica (4-20mA) y la convierte para la válvula de globo que realiza el control de los flujos en los diferentes tanques, "agua, bicarbonato, antiespumante, biocida, emulsión polivinílica, VAM e iniciador" o válvula de globo para el control de vapor en el intercambiador del reactor. Otro elemento importante que se encuentra en el proceso es el variador "SINAMICS G120" de la marca Siemens, que permite una conexión directa con el PLC y a su vez el envío de la señal necesaria hacia el motorreductor "80M4 – 225MC4" de SEW, para realizar el control de la velocidad de agitación (Siemens, 2014a) (DISAI, n.d.; Emerson, n.d.-a, n.d.-c, n.d.-b) (Siemens, n.d.-b, n.d.-a).

# Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

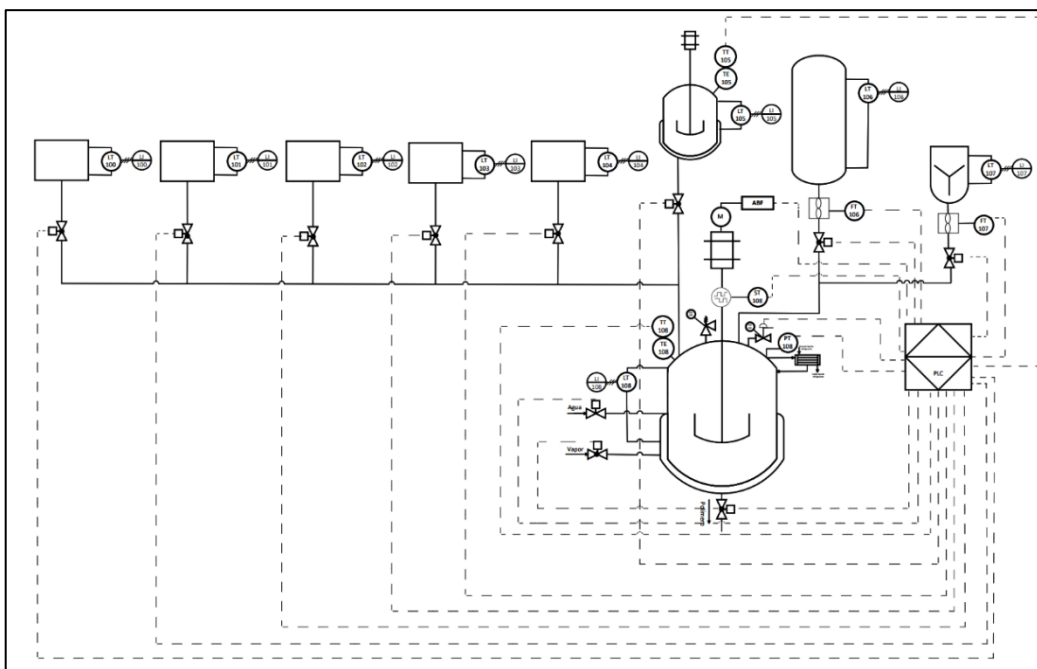
## 3 Diseño conceptual del proceso

Para elaborar el modelo del proceso de polimerización del VAM automatizado, se revisaron diferentes propuestas en la literatura sobre la automatización de reactores en procesos relacionados con la transformación de monómeros. Esta revisión permitió determinar las variables críticas que influyen en el rendimiento del sistema, como el tipo de reactor, el sistema de agitación, y los mecanismos de control de temperatura, presión y flujo de materia prima. Los autores consultados coinciden en que la regulación adecuada de estas variables es fundamental para optimizar la eficiencia operacional y velar por la seguridad del proceso.

En este contexto, y tomando como base las contribuciones de los autores (Augusto & Morales, 2018), (Zander, 2021) y (Loor Ch et al., 2022), se definió la estructura base del modelo integrando las condiciones operativas y los sistemas de control propuestos en el ítem anterior.

### **Figura 2**

#### *Propuesta de diseño*



## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

*Nota:* La siguiente figura ilustra la propuesta de diseño del proceso de automatización para la polimerización del VAM. Fuente propia.

### 4 Definición base para la operación del modelo

En relación con la información recopilada en la literatura, se establecieron los valores y rangos de operación que servirán como referencia para las variables críticas del proceso de polimerización. La temperatura reportada para el sistema se encuentra en un intervalo entre 71 °C y 75 °C (Castro Higuera & Herreño Gallego, 2020), mientras que la presión operativa corresponde a 580 mmHg (Augusto & Morales, 2018). En cuanto a la velocidad de agitación, los valores recomendados se encuentran en un rango de 40 y 50 rpm (Loor Ch et al., 2022). Estos parámetros serán empleados como base para ajustar el modelo a condiciones representativas del proceso real.

Con respecto a la naturaleza de las perturbaciones, diversos autores reportan una relación directa entre la presión y la temperatura, dado que al aumentar una variable la otra también se incrementa. Este comportamiento se explica porque, al aumentar la temperatura, la presión en el reactor también se incrementa, debido a que la mayor temperatura eleva la presión de vapor de los monómeros y componentes volátiles, promoviendo su paso a fase gaseosa. Además, en sistemas cerrados y reacciones exotérmicas, el calor generado aumenta la energía interna y el volumen del gas, lo que justifica el ascenso de presión observado durante la polimerización (Azpeitia et al., 2005; Liu et al., 2018; Vásquez et al., 2021). Con base en la literatura, la magnitud de esta perturbación se estableció que, por cada aumento de 10 °C en la temperatura, la presión se incrementa en 456 mmHg (Azpeitia et al., 2005).

## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

En referencia a la velocidad de agitación, diferentes estudios resaltan que, durante la polimerización, la formación de cadenas poliméricas aumenta la fracción sólida y la viscosidad del medio, volviendo más densa la mezcla; esto reduce la eficiencia de esta y eleva la resistencia al movimiento del fluido. En consecuencia, el agitador requiere mayor torque y su velocidad efectiva disminuye (Guadalupe Torres Aladro et al., 2024; Marinho et al., 2018; Pineda-Torres et al., 2016). Por ello, a medida que avanza la reacción, la agitación se reduce por efectos del mismo proceso. La magnitud de la perturbación asociada a la agitación del reactor corresponde a una disminución del 33 % respecto a la velocidad inicial (Marinho et al., 2018).

### 5 Construcción y verificación del diseño

El PLC siemens S7-1200 es un controlador lógico programable, que permite diseñar automatizaciones industriales a gran escala, es por ello por lo que es el componente principal escogido para el proceso automatizado de polimerización, el cual contiene la lógica de programación, lectura de sensores y control de actuadores. Adicionalmente permite crear las visualizaciones mediante las HMI para la interfaz hombre-máquina en el proceso de polimerización VAM.

Se seleccionaron módulos adicionales, compatibles con el PLC S7-1200 para la expansión de las entradas y salidas Análogas (SM 1231), así como las salidas y entradas Digitales respectivamente (SM1223 y SM1234).

## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

Para validar la lógica de control del proceso de automatización VAM, se construyó un modelo en la HMI que representará el entorno real del proceso de polimerización VAM por medio del entorno de Tia Portal y ejecutado en WinCC. La programación fue realizada en lenguaje Ladder, lo que permitió crear el flujo del proceso controlado mediante diagramas de bloques, en él se utilizaron contactos digitales para leer el estado de cada uno de los sensores, así como el avance, condiciones del proceso y verificar las bobinas para las salidas, tales como bombas y válvulas.

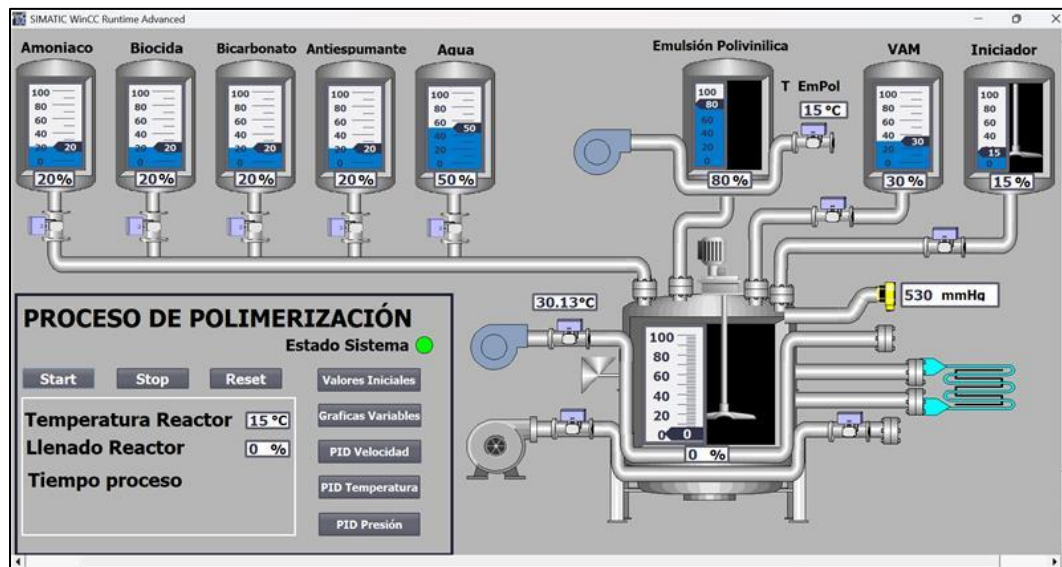
Para el proceso de control de cada una de las variables principales del proceso de polimerización VAM, como Temperatura, presión y velocidad, se agregaron bloques PID (Proporcional, Integral y Derivativo) mediante la interfaz de Tia portal, estos permiten implementar los controles necesarios para garantizar el comportamiento óptimo de cada una de las variables y mantener el valor de la salida en el "Set Point" correspondiente y así garantizar la calidad del producto final.

En esta etapa se procedió a validar el comportamiento del sistema de control implementado para el proceso de polimerización, utilizando la interfaz HMI con WinCC previamente configurada. Inicialmente, se construyó el primer modelo para realizar la representación del modelo físico y la visualización en tiempo real de las variables de polimerización VAM (Figura 3).

# Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

**Figura 3**

HMI



*Nota:* La siguiente figura ilustra el entorno virtual HMI para el proceso de polimerización por emulsión del VAM. Fuente propia.

## 6 Estudios de caso

### 6.1 Escenario 1: Modelo con perturbaciones en la temperatura y presión

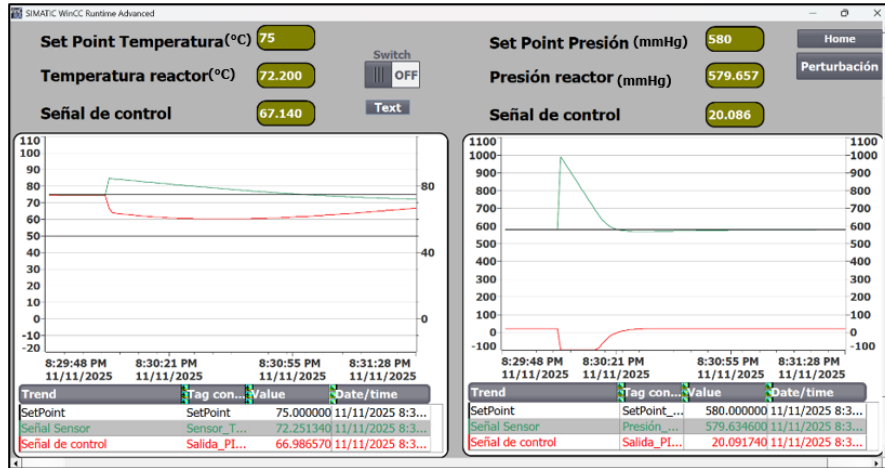
En la Figura 4 se observa el comportamiento del sistema de control ante la introducción de una perturbación simultánea en las variables de temperatura y presión del reactor. Esta prueba permite evaluar la capacidad de respuesta y estabilidad de los elementos de control propuestos.

# Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

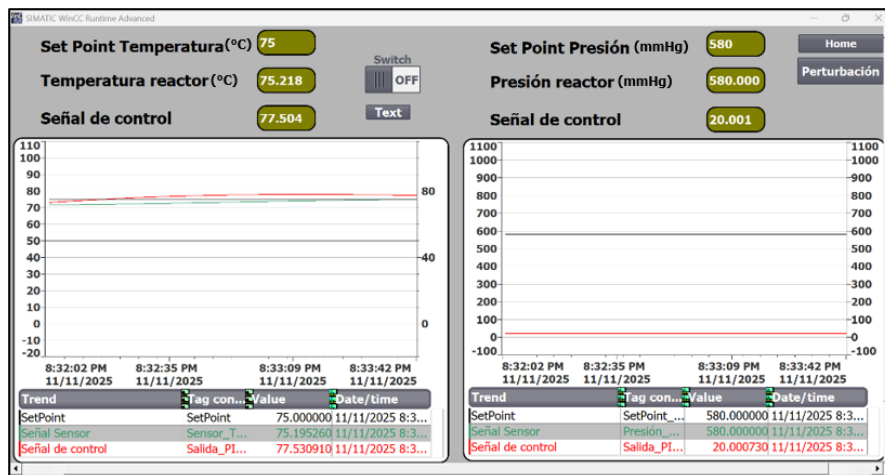
**Figura 4**

*Respuesta del controlador temperatura y presión*

A.



B.



*Nota:* La siguiente figura ilustra la respuesta del sistema ante una perturbación en la temperatura y velocidad del reactor. En la etapa inicial (A) la presión se recupera rápidamente gracias a la acción del lazo de control, mientras que la temperatura presenta un tiempo de estabilización más prolongado. En la etapa final (B) ambas variables alcanzan condiciones estables.

## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

Las perturbaciones introducidas reflejan el comportamiento característico de los sistemas que emplean monómeros, donde el incremento de temperatura asociado a la reacción desplaza parte del monómero hacia la fase gaseosa, elevando así la presión de equilibrio (Vásquez et al., 2021). Así mismo, como lo expresan (Azpeitia et al., 2005) en sistemas con reactores cerrados, el aumento de temperatura o la liberación de calor al interior de la unidad de proceso, genera un incremento en la presión debido a la expansión del gas en el reactor.

El aumento de presión es detectado de forma inmediata por los sensores de presión, cuya señal es procesada por el PLC, que activa la señal de control correspondiente. Este ajusta la válvula asociada para contrarrestar la perturbación y restablecer el valor de la variable. Debido a esta acción automática, el sistema logra controlar esta alteración y retornar de manera controlada al punto de operación, conforme se disipa el exceso de energía térmica, en menos de un minuto (Figura 4A).

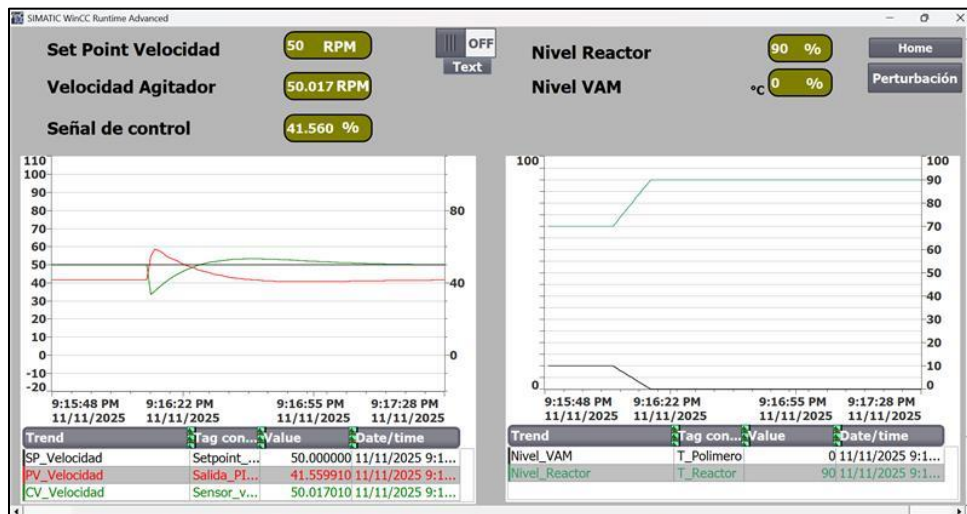
En contraste, la temperatura muestra una respuesta más lenta, debido a la inercia térmica del reactor y del medio polimérico, que retrasa la transferencia de calor y prolonga el tiempo de estabilización (3-4 minutos); en este caso el PLC manda la señal para cerrar la válvula de vapor e iniciar enfriamiento con agua a través del actuador (Figura 4B). Este comportamiento evidencia cómo la intervención de los lazos de control permite estabilizar tanto la presión como la temperatura en un rango de tiempo reducido, lo que demuestra la efectividad del sistema de control propuesto para el proceso de polimerización.

# Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

## 6.2 Escenario 2: Modelo con perturbación en la velocidad de agitación

**Figura 5**

*Respuesta del controlador del agitador*



*Nota:* En el panel izquierdo se observa la respuesta del sistema de control ante una perturbación introducida en la velocidad del agitador del reactor. En el panel derecho se aprecia el comportamiento de llenado del nivel del reactor durante el periodo de goteo del monómero.

Durante la polimerización, la reacción del monómero lleva a la formación progresiva de cadenas poliméricas dentro del sistema, lo cual genera un aumento de la viscosidad del medio. Este cambio reológico modifica el patrón de flujo (Guadalupe Torres Aladro et al., 2024). A medida que aumenta la densidad del sistema, el agitador requiere mayor torque para mantener su velocidad, por lo que también se reduce la velocidad de agitación (Pineda Torres et al., 2016).

En el sistema validado, el lazo de control de velocidad, compuesto por sensor, transmisor, PLC y variador de frecuencia, compensa estas variaciones, ajustando la potencia del motor para conservar la velocidad estable. La Figura 5 muestra una respuesta dinámica con un tiempo de

## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

recuperación corto (20–40 s) y una alteración mínima, lo que evidencia la eficacia del control automático para mantener la homogeneidad del medio ante el aumento de viscosidad propio de la reacción de polimerización.

### **Análisis de resultados**

La respuesta del PLC fue satisfactoria, mostrando un comportamiento estable frente a las perturbaciones aplicadas sobre temperatura, presión y velocidad de agitación. En la perturbación temperatura–presión, el sistema logró estabilizar la presión en menos de un minuto, mientras que la temperatura recuperó su set point en 3–4 minutos. Esta diferencia temporal concuerda con lo descrito por (Pladis & Kiparissides, 2014), donde se explica que los reactores de polimerización presentan alta generación de calor y limitaciones en su disipación durante la conversión. La intervención del PLC y el sistema de control, evitó la acumulación de energía al interior del reactor que podría conducir a escenarios peligrosos, como un runaway (Zhao et al., 2019).

Respecto a la perturbación en la agitación, el PLC compensa de manera efectiva la caída en la velocidad causada por el incremento de viscosidad, fenómeno típico en etapas avanzadas de polimerización (Pladis & Kiparissides, 2014). El sistema recuperó la velocidad de agitación en un periodo de 20–40 s, manteniendo la uniformidad del medio y evitando la formación de zonas calientes, las cuales representan un riesgo relevante de desencadenamiento de calor incontrolado (Zhao et al., 2019), y por ende un posible accidente.

En general, el comportamiento del PLC y del sistema de control permitió mantener la estabilidad del reactor, restaurando las variables críticas en tiempos cortos y minimizando los

## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

riesgos asociados a la acumulación térmica y a la pérdida de mezclado por disminución de la agitación. Este desempeño constituye un indicador favorable para futuros procesos industriales, especialmente en contextos donde la ausencia de control adecuado incrementa significativamente el riesgo operacional.

### **Propuesta de solución a la problemática**

El proceso de polimerización del vinil acetato monómero (VAM) presenta una alta sensibilidad e inestabilidad debido a su naturaleza exotérmica y a la interacción entre monómero, iniciador y disolvente. Estas condiciones pueden generar inconsistencias en las variables del proceso, aumentando el riesgo de reacciones descontroladas y fallas en el sistema. Esta vulnerabilidad operacional demuestra la necesidad de plantear estrategias de control más robustas que garanticen la estabilidad del proceso.

A partir de los resultados obtenidos, se propone el diseño de un sistema de control automatizado basado en PLC (Controlador Lógico Programable) para el proceso de polimerización del VAM, integrando lazos de control para la presión, temperatura y velocidad de agitación. Este diseño permite una compensación inmediata ante perturbaciones, reduciendo el riesgo de runaway térmico, sobrepresiones y fluctuaciones en la mezcla.

Adicionalmente, se recomienda complementar el flujo operacional con sistemas de supervisión continua y alertas tempranas sobre variables críticas, de manera que el personal cuente con una herramienta para actuar de manera anticipada y mantener la operación dentro de condiciones seguras.

## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

Finalmente, se sugiere estandarizar los procedimientos de intervención asociados a las variables críticas en la polimerización del VAM, lo cual facilitará la replicabilidad del proceso, reforzará la seguridad operativa y mejorará la eficiencia, en plantas donde se realicen procesos de transformación a partir de monómeros.

## Discusión y Conclusiones

### Discusión

De acuerdo con los resultados obtenidos, se muestra que el sistema de automatización propuesto responde de manera a las perturbaciones que presenta el proceso de polimerización del VAM, permitiendo no solo analizar el comportamiento dinámico del reactor, sino también validar la metodología planteada. La identificación y análisis de las variables de control y de proceso en la polimerización del vinil acetato monómero, permitió entender cómo estas influyen en la estabilidad del sistema y cuáles deben ser controladas para garantizar una operación segura y estable.

Así mismo, se evidenció que el comportamiento del sistema frente a la perturbación temperatura-presión se fundamentó en una adecuada comprensión de estas variables en la estabilidad del proceso de polimerización. La capacidad del sistema para ajustar rápidamente los incrementos de presión y restablecer la temperatura al punto de operación muestra que las variables críticas fueron correctamente gestionadas a través del PLC. En este sentido, la automatización implementada no solo permitió regular el proceso, sino que también contribuyó a una operación más segura al evitar la presencia de fenómenos como el runaway térmico dentro del reactor y reducir el riesgo de inestabilidad operativa.

Adicionalmente, se observa que el sistema de control propuesto corrige las perturbaciones presentadas en la velocidad del agitador durante el proceso de polimerización en tiempo real, lo que se traduce en un diseño correcto del sistema de control, teniendo en cuenta los cambios que se presentan durante la reacción. Aunque se generó una resistencia durante el mezclado del polímero debido a la formación de cadenas poliméricas, el sistema logró mantener la agitación indicada durante la operación, asegurando que la misma se conservara uniforme a lo

## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

largo del proceso. Esta respuesta contribuye a mitigar condiciones no deseadas en la operación y valida una vez más que el diseño de automatización diseñado es la herramienta apropiada para analizar el comportamiento de las variables y mejorar la estabilidad del proceso.

Por otra parte, la selección de los elementos del sistema de control y del PLC permitió el desarrollo de un diseño de automatización apto para analizar el comportamiento real del proceso y medir su impacto en la alteración de los parámetros críticos de la operación. Al evaluar el sistema bajo diferentes escenarios de operación, se comprobó que el diseño propuesto es capaz de mantener dichas variables dentro de rangos seguros y de responder de manera adecuada ante perturbaciones. En este sentido, el desarrollo planteado se presenta como una solución práctica y adaptable, alineada con los requerimientos operativos y orientada a mejorar tanto la seguridad como la eficiencia del proceso.

### **Conclusiones**

- De acuerdo con los resultados obtenidos se encuentra que, gracias a la correcta identificación de las variables críticas del proceso de polimerización, como lo son la presión y la temperatura, permitieron analizar de manera efectiva el comportamiento del sistema ante perturbaciones térmicas propias de la reacción. Se observó que el incremento de temperatura al interior del reactor genera de manera simultánea un aumento en la presión. Estas alteraciones fueron compensadas por el sistema de control en un tiempo inferior a 1 minuto en el caso de la presión (figura 4-A), mientras que la temperatura alcanzó el punto de operación adecuado en un intervalo aproximado de 3 a 4 minutos (figura 4-B), debido a la inercia térmica del reactor. Estos tiempos de respuesta evidencian que las perturbaciones asociadas al proceso fueron adecuadamente controladas.

## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

- En base a los resultados del comportamiento de la velocidad del agitador, se confirmó que esta variable hace parte de los parámetros críticos a controlar durante del proceso de polimerización. Las perturbaciones encontradas en el agitador fueron ocasionadas por la formación de cadenas poliméricas durante la reacción, esto generó la resistencia del polímero, lo que a su vez causó una disminución en la velocidad del motor. No obstante, el lazo de control respondió correctamente ante la perturbación, ajustando la señal del variador de frecuencia para mantener la homogeneidad de la mezcla y compensar la variación generada, restableciendo el valor de referencia en un tiempo entre 20 y 40 segundos (figura 5).
- El rendimiento del PLC y del sistema de automatización presentado, muestra una respuesta correcta para la seguridad del proceso, al estabilizar la presión, la temperatura y la velocidad de agitación. Esta respuesta disipa el exceso de energía térmica y reduce la probabilidad de un runaway térmico, garantizando que las condiciones operativas sean seguras durante la polimerización, lo que indica que la estrategia de control implementada con PLC y sus componentes son una opción confiable para prevenir condiciones de operación riesgosas.
- La validación del sistema bajo diferentes escenarios de operación permitió confirmar que el diseño de automatización propuesto mantiene la estabilidad de las variables críticas (temperatura, presión y velocidad), como se observan en las figuras 4A, 4B y 5, lo que permitió una operación estable del proceso de polimerización del VAM. Los tiempos de respuesta observados del sistema de control del PLC, junto con la capacidad del sistema para reaccionar frente a las distintas perturbaciones, demuestran que la arquitectura del diseño desarrollado ofrece una solución coherente frente al comportamiento del sistema en escenarios cambiantes.

## Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

- La construcción de una interfaz por medio HMI es un elemento clave para asegurar que el proceso de polimerización VAM se ejecute correctamente a lo largo de la operación. De esta forma, la interfaz permite la visualización en tiempo real de las variables de control y proceso, así como el monitoreo de las variables en tiempo real, minimizar posibles fallos en el proceso, detectar perturbaciones y propicia la interacción del humano - máquina con el proceso productivo.
- La selección adecuada de 19 sensores, 22 actuadores y 4 módulos externos para salidas analógicas y digitales del PLC S7-1200, permitió garantizar la certeza de los datos obtenidos, lo que se traduce en un control estable de las variables analizadas. Adicionalmente, el diseño de control propuesto brinda la posibilidad de escalar el modelo en la industria. Por lo cual, se infiere que la selección de los componentes del sistema de control fue consecuente con los requerimientos del proceso de polimerización del VAM.

### Referencias bibliográficas

- Agudelo, N., Tano, G., & Andrés Vargas, C. (n.d.). *Historia de la automatización*.
- Augusto, A., & Morales, H. (2018). *Análisis del Control y Optimización de un Reactor Piloto para Producir Poliacetato de Vinilo*.
- Azpeitia, M., Leiza, J. R., & Asua, J. M. (2005). Safety in emulsion polymerization reactors: An experimental study. *Macromolecular Materials and Engineering*, 290(4), 242–249.  
<https://doi.org/10.1002/mame.200400311>
- Bai, W., & Guo, J. (2020). Design of Centralized Control System for Polymerization Reactor Based on STM32. In C.-T. Yang, Y. Pei, & J.-W. Chang (Eds.), *Innovative Computing* (Vol. 675, pp. 609–616). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-15-5959-4\\_74](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5959-4_74)
- Caldera Villalobos, M., & Herrera González, A. M. (2019). Polímeros adhesivos y formación de uniones a través de reacciones de polimerización y fuerzas intermoleculares. *Educación Química*, 30(2), 2. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2019.2.68197>
- Castro Higuera, N., & Herreño Gallego, S. A. (2020). *Obtención de la formulación de una emulsión polivinílica para adhesivos de madera y papel en la empresa de pinturas tonner*.
- Córdoba Nieto, E. (2006). Manufactura y automatización. *Ingeniería e Investigación*, 26, 120–128. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64326315>
- Cortizo, S., Oberti, T., & Peruzzo, P. J. (n.d.). *Introducción a la síntesis de polímeros*.
- Cortizo, S., Oberti, T., & Peruzzo, P. J. (2023). *Introducción a la síntesis de polímeros Libros de Cátedra*.
- DISAI. (n.d.). *SRI986 Posicionador electroneumático*.
- Emerson. (n.d.-a). *Controlador digital de válvulas FIELDVUE™ DVC6200 de Fisher*.
- Emerson. (n.d.-b). *Válvula de control bridada Vee-Ball™ V150 de Fisher™*.
- Emerson. (n.d.-c). *Válvula de control Fisher™ easy-e™ ED*.
- Endress+Hauser. (n.d.-a). *Medición de nivel en líquidos*.

Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

Endress+Hauser. (n.d.-b). *Medición por radar Time-of-Flight Micropilot FMR10*.

Endress+Hauser. (n.d.-c). *Transmisor de temperatura iTEMP TMT71*.

García Dunna, E., & García Reyes Leopoldo Cárdenas Barrón, H. E. (2013). *Simulación y análisis de sistemas con ProModel, 2da Edición* (L. M. Cruz Castillo & B. Gutiérrez Hernández, Eds.; 2nd ed.). Pearson.

García Jaimes, L. E., Cruz Cárdenas, S., & Rivera González, Á. B. (2023). Propuesta de automatización para el proceso químico de elaboración de un polímero funcional en un reactor discontinuo. *Revista Mutis*, 13(2), 1–16. <https://doi.org/10.21789/22561498.1936>

Ghadipasha, N., Geraili, A., Romagnoli, J. A., Castor Jr., C., Drenski, M. F., & Reed, W. F. (2016). *Polymer Reactor Modeling, Design and Monitoring* (M. Soroush, Ed.). MDPI AG - Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

Guadalupe Torres Aladro, M., Kamile Gelinski, E., Sheibat-Othman, N., McKenna, T., & L McKenna, T. F. (2024). Mass Transfer in Emulsion Polymerization: high solids content latex and mixing effects. *Universite Claude Bernard Lyon*. <https://doi.org/10.1002/mren.202300064>

Herreño Gallego, S. A. (2020). Evaluación de la polimerización de vinil acetato en emulsión núcleo-coraza con una emulsión polivinílica como semilla. *Questionar: Investigación Específica*, 7(1), 45–55. <https://doi.org/10.29097/23461098.307>

Hudedmani, M. G., Umayal, R. M., Kabberalli, S. K., & Hittalamani, R. (2017). Programmable Logic Controller (PLC) in Automation. *Advanced Journal of Graduate Research*, 2(1), 37–45. <https://doi.org/10.21467/ajgr.2.1.37-45>

Liao, S. W., Cheng, Y. C., Gollakota, A. R. K., Chen, J. Y., & Shu, C. M. (2023). A thermal hazard risk evaluation of emulsion polymerisation and vinyl acetate monomers in the latex manufacturing process. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105085>

Liquid Controls. (n.d.). *LC M-Series & MSAA-Series Meters*.

Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

- Liu, B., Hu, G., Zhang, J., & Fang, C. (2018). Synthesis, characterization and thermal decomposition kinetics of a bio-based transparent nylon 10i/10t. *Designed Monomers and Polymers*, 21(1), 182–192. <https://doi.org/10.1080/15685551.2018.1543633>
- Loor Ch, A., Mejía, Y., Gómez, Y., & Riera, M. (2022). *Diseño de un reactor químico de polimerización para la producción de ácido poliláctico*.
- López Pérez, F. J. (2023). *Diseño de guía introductoria de programación en lenguaje de escalera, para el controlador lógico programable siemens Simatic s7-300, utilizando simulador PLCSIM en entorno de programación Tia portal para el laboratorio de electrónica 6*.
- Marinho, R., Horiuchi, L., & Pires, C. A. (2018). Effect of stirring speed on conversion and time to particle stabilization of poly (vinyl chloride) produced by suspension polymerization process at the beginning of reaction. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 35(2), 631–639. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20180352s20160453>
- Merado Ortega, M. L. (2015). *Obtención y caracterización de una emulsión acrílica para su uso en la fabricación de recubrimientos para madera*.
- Ogunnaike, B., François, G., Soroush, M., & Bonvi, D. (2010). Control System Applications. In *Control System Applications, Second Edition* (pp. 1–25). <https://doi.org/10.1201/b10382-16>
- Pérez López, E. (2015). Los sistemas SCADA en la automatización industrial SCADA systems in the industrial automation. *Tecnología En Marcha*.
- Pineda-Torres, G. M., Durán-Valencia, C., Barragán-Aroche, F., & López-Ramírez, S. (2016). Impact of Fluid Flow on Free Radical Polymerization in a Batch Reactor. In *Modeling and Simulation in Engineering Sciences*. InTech. <https://doi.org/10.5772/64156>
- Pinto Vizcarra, M. A., Pocori Quispe, A. S., Ríos Soncco, F. S., Carpio Chambilla, S. L., Sihua Yupanqui, G., Ramos Colque, J. R. M., Cahuana Canaza, A. C., Sucle Cuti, H., Palomino Cachi, K., Cahuana Gonzales, F. J., & Valeriano Vasquez, Y. J. (2024). *Monografía de los Procesos de Polimerización*. <https://www.researchgate.net/publication/377698176>

Validación del Diseño del Sistema de Automatización para un Reactor de Polimerización de Monómero de Acetato de Vinilo (VAM)

Pladis, P., & Kiparissides, C. (2014). *Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*.

Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409547-2.10908-4>

Siemens. (n.d.-a). *Analog signal modules (SMs)*.

Siemens. (n.d.-b). *Digital signal modules (SMs)*.

Siemens. (2014a). *Controlador programable S7-1200*. <http://www.siemens.com/automation/>

Siemens. (2014b). *SINAMICS G120 Control Units CU250S-2*.

Vásquez, O., Pérez, J., Vázquez Milton, Ortega, P., & Moscoso, F. (2021). Comportamiento de presión en la reacción de polimerización del 1,3-butadieno en microemulsión y emulsión.

*Revista Iberoamericana de Polímeros*.

Wang, Y. W., & Mei, Y. (2023). Thermal runaway evaluation on batch polyvinyl acetate emulsion polymerization from calorimetric measurement. *Journal of Thermal Analysis and*

*Calorimetry*, 148(11), 4801–4810. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-11994-9>

Wika. (2010). *Transmisor de presión Para aplicaciones industriales generales*. [www.wika.com](http://www.wika.com)

Zander, C. N. (2021). *Fouling during solution polymerization in continuously operated reactors*.

Zhao, L., Zhu, W., Papadaki, M. I., Mannan, M. S., & Akbulut, M. (2019). Probing into Styrene

Polymerization Runaway Hazards: Effects of the Monomer Mass Fraction. *ACS Omega*, 4(5), 8136–8145. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00004>

**Anexo A**

**Tabla 4**

*Sensores*

<b>Sensores</b>					
<b>Tanque</b>	<b>Tipo</b>	<b>Sensores</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Señal</b>
Amoniaco	Nivel	Endress+Hauser Micropilot FMR10	1	Sensor por radar para la medición de líquidos, no necesita contacto.	AI (4-20mA)
Biocida	Nivel	Endress+Hauser Micropilot FMR10	1	Sensor por radar para la medición de líquidos, no necesita contacto.	AI (4-20mA)
Bicarbonato	Nivel	Endress+Hauser Micropilot FMR10	1	Sensor por radar para la medición de líquidos, no necesita contacto.	AI (4-20mA)
Antiespumante	Nivel	Endress+Hauser Micropilot FMR10	1	Sensor por radar para la medición de líquidos, no necesita contacto.	AI (4-20mA)
Agua	Nivel	Endress+Hauser Micropilot FMR10	1	Sensor por radar para la medición de líquidos, no necesita contacto.	AI (4-20mA)
Emulsión polivinílica	Nivel	Endress+Hauser Micropilot FMR10	1	Sensor por radar para la medición de líquidos, no necesita contacto.	AI (4-20mA)

VAM	Nivel	Endress+Hauser Micropilot FMR10	1	Sensor por radar para la medición de líquidos, no necesita contacto.	AI (4-20mA)
Iniciador	Nivel	Endress+Hauser Micropilot FMR10	1	Sensor por radar para la medición de líquidos, no necesita contacto.	AI (4-20mA)
Reactor	Nivel	Endress+Hauser Micropilot FMR10	1	Sensor por radar para la medición de líquidos, no necesita contacto.	AI (4-20mA)
Reactor	Temperatura	Endress+Hauser TH15 Sonda de temperatura modular Pt100 TF	1	Sonda para la medición de temperatura con longitud de inmersión regulable	Ohm ('R)
Reactor	Temperatura	Transmisor Endress+Hauser_ITEMP_TMT71	1	Transmisor de temperatura de 4-20 mA como dispositivo de cabezal.	AI (4-20mA)
Emulsión polivinílica	Temperatura	Endress+Hauser TH15 Sonda de temperatura modular Pt100 TF	1	Sonda para la medición de temperatura con longitud de inmersión regulable	Ohm ('R)
Emulsión polivinílica	Temperatura	Transmisor Endress+Hauser_ITEMP_TMT71	1	Transmisor de temperatura de 4-20 mA como dispositivo de cabezal.	AI (4-20mA)

Reactor	Presión	Transmisor de presión WIKA A-10 para aplicaciones industriales generales	1	Sensor transmisor de presión para usos industriales	AI (4-20mA)
Reactor	Velocidad	80M4 – 225MC4	1	Motorreductor 2HP - 120Nm - 100RPM	
Reactor	Velocidad	Sendix 7000	1	Medición de la velocidad de rotación y detección de la posición incremental.	RPM
Reactor	Velocidad	SINAMICS G120 CU250S-2 PN	1	Variador de Unidad de control diseñada para el posicionamiento y velocidad del motor	AI (4-20mA)
Reactor	Flujo	Liquid Controls MA-15 series	1	Sensor de flujo de desplazamiento positivo	Pulsos
Reactor	Flujo	Sensor PNP 24V DC	1	Sensor de proximidad PNP 24V DC	24 VDC

*Nota:* La siguiente tabla ilustra la sensórica elegida para el proceso de polimerización del VAM. Elaboración propia a partir de (Endress+Hauser, n.d.-b, n.d.-a) (Wika, 2010)(Endress+Hauser, n.d.-c) (Siemens, 2014b)(Liquid Controls, n.d.).

**Tabla 5**

*Actuadores*

<b>Actuadores</b>					
<b>Tanque</b>	<b>Tipo</b>	<b>Actuadores</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Señal</b>
Amoniaco	Nivel	Posicionador Fisher DVC6200	1	Controlador digital de válvulas que convierte señal de control digital en una salida neumática para el control de la posición de la válvula	10 bar Max
Amoniaco	Nivel	Válvula de control de bola V150 Fisher	1	Válvula de control de bola para regulación del flujo de un fluido	AI (4-20mA)
Biocida	Nivel	Posicionador Fisher DVC6200	1	Controlador digital de válvulas que convierte señal de control digital en una salida neumática para el control de la posición de la válvula	10 bar Max
Biocida	Nivel	Válvula de control de bola V150 Fisher	1	Válvula de control de bola para regulación del flujo de un fluido	AI (4-20mA)

Bicarbonato	Nivel	Posicionador Fisher DVC6200	1	Controlador digital de válvulas que convierte señal de control digital en una salida neumática para el control de la posición de la válvula	10 bar Max
Bicarbonato	Nivel	Válvula de control de bola V150 Fisher	1	Válvula de control de bola para regulación del flujo de un fluido	AI (4-20mA)
Antiespumante	Nivel	Posicionador Fisher DVC6200	1	Controlador digital de válvulas que convierte señal de control digital en una salida neumática para el control de la posición de la válvula	10 bar Max
Antiespumante	Nivel	Válvula de control de bola V150 Fisher	1	Válvula de control de bola para regulación del flujo de un fluido	AI (4-20mA)
Agua	Nivel	Posicionador Fisher DVC6200	1	Controlador digital de válvulas que convierte señal de control digital en una salida neumática para el control de la posición de la válvula	10 bar Max

Agua	Nivel	Válvula de control de bola V150 Fisher	1	Válvula de control de bola para regulación del flujo de un fluido	AI (4-20mA)
Emulsión Polivinílica	Nivel	Posicionador Fisher DVC6200	1	Controlador digital de válvulas que convierte señal de control digital en una salida neumática para el control de la posición de la válvula	10 bar Max
Emulsión Polivinílica	Nivel	Válvula de control de bola V150 Fisher	1	Válvula de control de bola para regulación del flujo de un fluido	AI (4-20mA)
VAM	Nivel	Posicionador Fisher DVC6200	1	Controlador digital de válvulas que convierte señal de control digital en una salida neumática para el control de la posición de la válvula	10 bar Max
VAM	Nivel	Válvula de control de bola V150 Fisher	1	Válvula de control de bola para regulación del flujo de un fluido	AI (4-20mA)
Iniciador	Nivel	Posicionador Fisher DVC6200	1	Controlador digital de válvulas que convierte señal de control digital en una	10 bar Max

				salida neumática para el control de la posición de la válvula	
Iniciador	Nivel	Válvula de control de bola V150 Fisher	1	Válvula de control de bola para regulación del flujo de un fluido	AI (4-20mA)
Reactor	Nivel	Posicionador Fisher DVC6200	1	Controlador digital de válvulas que convierte señal de control digital en una salida neumática para el control de la posición de la válvula	10 bar Max
Reactor	Nivel	Válvula de control de bola V150 Fisher	1	Válvula de control de bola para regulación del flujo de un fluido	AI (4-20mA)
Reactor	Entrada de Vapor	Posicionador Fisher DVC6200	1	Controlador digital de válvulas que convierte señal de control digital en una salida neumática para el control de la posición de la válvula	10 bar Max
Reactor	Entrada Agua	Válvula de control de globo ED Fisher	1	Válvula de control de bola para regulación del flujo de un fluido	AI (4-20mA)

Emulsión Polivinílica	Entrada de agua	Posicionador Fisher DVC6200	1	Controlador digital de válvulas que convierte señal de control digital en una salida neumática para el control de la posición de la válvula	10 bar Max
Emulsión Polivinílica	Entrada de agua	Válvula de control V150 Fisher	1	Válvula de control de bola para regulación del flujo de un fluido	AI (4-20mA)

*Nota:* La siguiente tabla ilustra los actuadores elegidos para el proceso de polimerización del VAM. Elaboración propia a partir de (DISAI, n.d.; Emerson, n.d.-a, n.d.-c, n.d.-b)

**Tabla 6**

*Instrumentos*

<b>Instrumentos</b>				
<b>Ítem</b>	<b>Tipo</b>	<b>Dispositivo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>
Módulo	Análogo	SM 1231	1	Módulo para entradas análogas. (8)
Módulo	Análogo/Digital	SM 1234	2	Módulo para entradas y salidas análogas (4,4)
Módulo	Digital	SM 1223	1	Módulo para entradas y salidas digitales (16,16)
PLC	S7	Controlador programable S7-1200	1	Controlador lógico programable para automatizar procesos

*Nota:* La siguiente tabla ilustra los instrumentos elegidos para el proceso de polimerización del VAM. Elaboración propia a partir de  
Haga clic o pulse aquí para escribir texto.Haga clic o pulse aquí para escribir texto.