



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE MECATRÓNICA

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA SCADA PARA EL
MONITOREO Y CONTROL AUTOMATIZADO DE CALIDAD DEL
AGUA EN CULTIVOS DE CAMARÓN MEDIANTE TIA PORTAL**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: Jorge Luis Maridueña Mendoza
TUTOR: Gabriel Santiago García Vásquez

Guayaquil - Ecuador
2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Jorge Luis Maridueña Mendoza** con documento de identificación N° **0955979687**; manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

Guayaquil, 18 de febrero del año 2026

Atentamente,



Jorge Luis Maridueña Mendoza
0955979687

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, **Jorge Luis Maridueña Mendoza** con documento de identificación N° **0955979687**, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy el autor del **Dispositivo Tecnológico: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA SCADA PARA EL MONITOREO Y CONTROL AUTOMATIZADO DE CALIDAD DEL AGUA EN CULTIVOS DE CAMARÓN MEDIANTE TIA PORTAL**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 18 de febrero del año 2026

Atentamente,



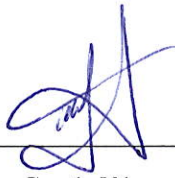
Jorge Luis Maridueña Mendoza
0955979687

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Gabriel Santiago García Vásquez**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA SCADA PARA EL MONITOREO Y CONTROL AUTOMATIZADO DE CALIDAD DEL AGUA EN CULTIVOS DE CAMARÓN MEDIANTE TIA PORTAL**, realizado por **Jorge Luis Maridueña Mendoza** con documento de identificación N° **0955979687**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 18 de febrero del año 2026

Atentamente,



Ing. Gabriel Santiago García Vásquez
0920256500

DEDICATORIA

Dedico este logro a mis padres, cuyo cariño sin límites y entrega continua han sido mi sustento durante toda esta travesía universitaria. Les agradezco por transmitirme principios esenciales de constancia, compromiso y tenacidad, valores que se han convertido en la base de mi crecimiento personal y que hoy me permiten alcanzar esta importante meta académica.

A los docentes que, mediante su trayectoria, dedicación y sabiduría, han contribuido significativamente en mi preparación profesional. Su guía y enseñanzas han resultado esenciales en la construcción de este proyecto y en mi evolución como profesional. Agradezco especialmente a mis colegas universitarios por crear un ambiente deCompañía, intercambio de ideas y experiencias gratificantes que han enriquecido esta etapa de aprendizaje.

A las amistades y compañeros que han formado parte de mi vida universitaria, transformando este recorrido en una vivencia memorable y edificante. Hemos evolucionado juntos en lo académico y en lo personal. Cada una de estas personas ha contribuido de manera única y valiosa, ofreciendo respaldo y motivación durante los periodos más retadores. A cada uno de ustedes, mi reconocimiento más sincero.

Jorge Luis Maridueña Mendoza

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi reconocimiento inicial a mi núcleo familiar, cuyo respaldo incondicional ha sido esencial para el cumplimiento de cada objetivo planteado durante mi formación académica. El soporte constante que me han proporcionado ha representado un pilar fundamental en este proceso. Expreso mi gratitud especial hacia mis progenitores, cuyas renuncias y dedicación han constituido los cimientos sobre los cuales he construido mis logros. La confianza depositada en mí y sus permanentes palabras de aliento han representado el principal impulso que me ha conducido hasta este momento, siendo su apoyo el motor que me ha mantenido firme en la consecución de este objetivo académico.

Reconozco la labor de los docentes, quienes, mediante su experiencia profesional y vocación pedagógica, me han transmitido no solamente conocimientos técnicos, sino también valores y métodos de trabajo que han moldeado mi desarrollo profesional. La sabiduría compartida durante mi trayectoria universitaria ha sido determinante en la elaboración de esta investigación y en mi crecimiento como individuo, dejando una marca perdurable en mi preparación académica. Manifiesto mi especial gratitud hacia mi tutor de tesis, cuya dirección experta y asesoramiento continuo durante la ejecución de esta investigación han sido invaluable. Su amplio bagaje profesional y dominio del área me han facilitado enfrentar exitosamente los retos presentados y materializar las metas establecidas para este proyecto.

Valoro enormemente a mis colegas y compañeros de estudios universitarios, quienes han contribuido a hacer de esta experiencia formativa un periodo verdaderamente significativo y enriquecedor. Su compañía ha representado un soporte tanto en el ámbito académico como personal, especialmente durante las circunstancias más demandantes, convirtiendo esta fase en una de las más valiosas de mi trayectoria. Mi gratitud por las vivencias compartidas, los intercambios de ideas y el aprendizaje conjunto. Finalmente, extendiendo mi reconocimiento a todas aquellas personas que, de diversas formas, han participado en mi recorrido académico, brindándome nuevas relaciones, vivencias formativas y la motivación necesaria para perseguir y alcanzar mis aspiraciones profesionales.

Jorge Luis Maridueña Mendoza

RESUMEN

El presente proyecto se centra en desarrollar e implementar un sistema de automatización destinado al seguimiento y regulación de variables fisicoquímicas del agua en instalaciones camaroneras. La finalidad principal es mejorar las condiciones del entorno acuático que favorecen el crecimiento saludable de los camarones. El sistema integra el monitoreo de múltiples parámetros esenciales como temperatura del agua, salinidad, nivel de pH, oxígeno presente en el medio y niveles de amoníaco, factores fundamentales que impactan directamente en la productividad y en la tasa de supervivencia de los organismos cultivados.

Los métodos convencionales para gestionar estas variables suelen depender de intervención humana directa o de sistemas de supervisión básicos, lo cual frecuentemente ocasiona demoras significativas en la identificación de situaciones críticas y en la implementación de medidas correctivas que afectan negativamente los rendimientos de producción. Como respuesta a esta problemática, se ha creado un sistema automatizado de regulación fundamentado en controladores de tipo PID, los cuales se han programado mediante la plataforma TIA Portal. La metodología permite establecer dinámicamente los parámetros de control basándose en valores de referencia previamente configurados.

La arquitectura del sistema incorpora una interfaz HMI estructurada en múltiples secciones operativas, facilitando la introducción de parámetros, la alternancia entre operación manual y automatizada, la representación gráfica en tiempo real de las variables monitoreadas y la generación de consultas históricas. Adicionalmente, se han programado simulaciones que evalúan el desempeño dinámico de los controladores PID y permiten comparar la respuesta del sistema tanto en configuración de bucle abierto como en bucle cerrado.

Los análisis demuestran que la adopción del control PID produce mejoras significativas en la estabilidad operativa del sistema, minimiza las fluctuaciones de error en condiciones estacionarias y garantiza condiciones óptimas para las operaciones acuícolas. Por consiguiente, la solución tecnológica propuesta constituye una alternativa efectiva para automatizar y gestionar de forma eficiente los procesos productivos en este sector.

Palabras clave:

Control PID, Oxígeno disuelto, Automatización acuícola, PLC, HMI, Calidad del agua.

ABSTRACT

This project focuses on developing and implementing an automation system designed for monitoring and regulating physicochemical water variables in shrimp farming facilities. The primary purpose is to improve aquatic environmental conditions that promote healthy shrimp growth. The system integrates monitoring of multiple essential parameters such as water temperature, salinity, pH level, dissolved oxygen, and ammonia concentrations—fundamental factors that directly impact productivity and survival rates of cultivated organisms.

Conventional methods for managing these variables typically rely on direct human intervention or basic supervision systems, which frequently cause significant delays in identifying critical situations and implementing corrective measures that negatively affect production yields. In response to this challenge, an automated regulation system has been created based on PID-type controllers, which have been programmed using the TIA Portal platform. This methodology enables dynamic establishment of control parameters based on previously configured reference values.

The system architecture incorporates an HMI interface structured into multiple operational sections, facilitating parameter input, alternation between manual and automated operation, real-time graphical representation of monitored variables, and generation of historical queries. Additionally, simulations have been programmed to evaluate the dynamic performance of PID controllers and enable comparison of system response in both open-loop and closed-loop configurations.

The analyses demonstrate that adopting PID control produces significant improvements in operational system stability, minimizes error fluctuations under steady-state conditions, and ensures optimal conditions for aquaculture operations. Consequently, the proposed technological solution constitutes an effective alternative for automating and efficiently managing production processes in this sector.

Keywords:

PID control, Dissolved oxygen, Aquaculture automation, PLC, HMI, Water quality.

ÍNDICE

I. Problema	1
II. Justificación	3
III. Objetivos	5
III-A. Objetivo General	5
III-B. Objetivos Específicos	5
IV. Marco teórico	6
IV-A. Piscina de Crianza (Larvas y Postlarvas)	6
IV-B. Piscinas en Fase de Crecimiento (Juveniles)	7
IV-C. Factores que Afectan al Camarón Adulto	8
IV-D. PLC Siemens S7-1500	9
IV-E. Panel HMI Siemens KTP 700 Basic	10
IV-F. Sensores	11
IV-G. Sensores de pH para Aplicaciones Acuícolas	11
IV-H. Sensores de Oxígeno Disuelto	12
IV-I. Sensores de Temperatura	13
IV-J. TIA Portal V17 como Plataforma de Desarrollo	14
IV-K. Protocolo de Comunicación Profinet	15
IV-L. Sistemas SCADA en Entornos Acuícolas	16
IV-M. Controladores PID para Regulación de Parámetros	16
IV-N. Diseño e implementación de tableros de control	18
IV-Ñ. Componentes del tablero de control	18
IV-O. Diseño del esquema eléctrico	20
IV-P. Montaje físico y cableado	21
IV-Q. Configuración de la comunicación Profinet	22
IV-R. Desarrollo de la interfaz HMI en TIA Portal	25
IV-S. Validación mediante simulación en PLCSIM	29
V. Resultado de la simulación en el TIA Portal V18	34
VI. Metodología	42
VI-A. Diseño del sistema de control automatizado	42
VI-B. Diseño e implementación de controladores PID	43
VI-C. Programación y configuración en TIA Portal	44
VI-D. Desarrollo de la interfaz HMI	45
VI-E. Lógica de control y secuencia operativa	46
VI-F. Métricas de desempeño y criterios de aceptación	49
VI-G. Criterios de control de parámetros del agua	50
VI-H. Tiempos de respuesta del sistema	50
VII. Cronograma	51
VIII. CONCLUSIONES	52
IX. RECOMENDACIONES	53
Referencias	54

X.	Anexo	57
X-A.	Funcionamiento y uso correcto de la simulación por pantallas (F1–F7)	57
X-B.	Funcionamiento de los controladores PID en el sistema SCADA	62
X-C.	Modelo matemático del oxígeno disuelto en Matlab	66

I. PROBLEMA

La presente investigación se enfoca en el diseño e implementación de un sistema automatizado para el monitoreo de calidad en estanques camaroneros, empleando TIA Portal como herramienta fundamental para la programación, integración y supervisión virtual del sistema [1, 2]. La producción camaronera en Ecuador representa uno de los sectores más relevantes de la economía nacional, siendo altamente dependiente del establecimiento y mantenimiento de parámetros ambientales óptimos. Las fluctuaciones en las condiciones del cultivo pueden impactar significativamente el desarrollo, la condición sanitaria y la viabilidad del camarón en cultivo [3]. No obstante, dada su relevancia económica, una proporción considerable de las operaciones productivas continúa ejecutándose mediante procedimientos manuales, lo cual representa un obstáculo para garantizar un monitoreo riguroso y sostenido de las variables ambientales [4, 5].

En la mayoría de las camaroneras ecuatorianas persiste un modelo de monitoreo limitado y discontinuo que dificulta mantener un control adecuado sobre los parámetros críticos del agua [4, 5]. La dependencia de mediciones manuales provoca que la información llegue con retraso y que muchas variaciones importantes pasen desapercibidas hasta que ya han afectado el comportamiento o la salud del camarón [6]. Esta falta de supervisión constante impide detectar a tiempo fluctuaciones en la temperatura, el oxígeno disuelto, el pH o la salinidad, lo que reduce la capacidad de respuesta ante situaciones que pueden escalar rápidamente y comprometer el desarrollo del cultivo [3].

La industria camaronera ecuatoriana continúa enfrentando un desafío importante por la limitada automatización en los procesos de monitoreo y control de las condiciones ambientales dentro de las piscinas de cultivo [5]. En la mayoría de granjas, estas actividades aún se realizan de manera manual, lo que obliga al personal técnico a efectuar mediciones periódicas y depender de su disponibilidad para supervisar parámetros críticos como el pH, la temperatura, el oxígeno disuelto y la salinidad [4, 6]. Esta forma de trabajo genera varias dificultades: no se puede garantizar una vigilancia continua durante todo el día, especialmente en las noches cuando las condiciones del agua pueden cambiar con mayor rapidez [7]; además, la intervención humana introduce variaciones en la precisión de los datos debido a errores en los métodos de medición o posibles errores durante la toma de muestras [8]. A esto se suma que, entre una medición y otra, pueden darse cambios bruscos que pasan desapercibidos y terminan afectando el bienestar de los camarones, aumentando el riesgo de estrés y mortalidad en el cultivo [3].

El control de la temperatura en las piscinas de cultivo continúa siendo una de las debilidades más marcadas dentro de la producción camaronera [9]. La temperatura del agua es un parámetro decisivo para el bienestar del camarón, ya que influye en su metabolismo, crecimiento, alimentación y resistencia a enfermedades [6]. Al tratarse de un organismo ectotérmico, cualquier variación significativa en la temperatura del agua afecta de forma inmediata su funcionamiento fisiológico [3]. Sin embargo, muchas granjas aún operan sin sistemas automatizados que regulen este parámetro, lo que las deja expuestas a los cambios térmicos naturales provocados por el clima, la radiación solar o las variaciones entre el día y la noche [9, 10]. Durante las horas de mayor calor es común que la temperatura supere los valores óptimos, generando estrés y reducción en el apetito, mientras que en las noches o épocas frías se observa una disminución del metabolismo que repercute directamente en el crecimiento [11]. La falta de un sistema de regulación automática impide reaccionar a tiempo frente a estas fluctuaciones, aumentando el riesgo de

afectar el rendimiento y la salud del cultivo [9].

El monitoreo del oxígeno disuelto en las piscinas de cultivo sigue siendo una de las principales debilidades en la producción camaronera, pese a que este parámetro es el más determinante para la supervivencia del camarón [12, 13]. A diferencia de otros factores que pueden variar sin efectos inmediatos, una disminución del oxígeno puede volverse crítica en cuestión de minutos, especialmente durante la madrugada cuando cesa la fotosíntesis y aumenta la demanda de oxígeno por parte del fitoplancton y los organismos presentes en el agua [14]. Sin embargo, en muchas granjas camaroneras aún se depende de mediciones manuales realizadas pocas veces al día con equipos portátiles, lo que deja amplios periodos sin supervisión [4]. Esta falta de monitoreo continuo impide detectar a tiempo descensos abruptos causados por el aumento de biomasa, la descomposición de materia orgánica, los cambios climáticos o las variaciones térmicas propias del día y la noche [7, 15]. Como resultado, los niveles más bajos de oxígeno suelen presentarse entre las tres y seis de la mañana, justo cuando no hay personal monitoreando, lo que incrementa el riesgo de hipoxia y de eventos de mortalidad repentina en el cultivo [12, 13].

La producción camaronera ecuatoriana enfrenta importantes limitaciones debido a la falta de automatización en el monitoreo y control de los parámetros ambientales dentro de las piscinas de cultivo [5]. Actualmente, gran parte de las operaciones se basa en procedimientos manuales que dificultan mantener una supervisión continua y precisa de variables críticas como la temperatura, el oxígeno disuelto y otros factores esenciales para el bienestar del camarón [4, 6]. Esta dependencia del trabajo humano genera períodos prolongados sin vigilancia, especialmente durante la noche, cuando suelen ocurrir las variaciones más drásticas en las condiciones del agua [7]. La ausencia de sistemas automatizados para regular la temperatura provoca que las piscinas sean altamente vulnerables a los cambios térmicos diarios y estacionales [9]. Estas fluctuaciones afectan directamente el metabolismo, el crecimiento y la resistencia de los camarones, ya que cualquier variación significativa puede causar estrés, pérdida de apetito o mayor predisposición a enfermedades [3, 11]. A ello se suma la deficiencia en el monitoreo del oxígeno disuelto, un parámetro vital cuya reducción puede convertirse en un riesgo de mortalidad en cuestión de horas o incluso minutos [12, 13]. La falta de mediciones continuas impide detectar oportunamente episodios de hipoxia, los cuales suelen ocurrir en la madrugada, cuando no hay personal supervisando [14]. La incorporación de sistemas automatizados, especialmente aquellos basados en sensores en línea y controladores capaces de activar equipos de aireación o mecanismos correctivos al superar umbrales críticos, permitiría responder de manera inmediata a cambios peligrosos en el ambiente del cultivo [16, 17]. Además de mejorar la supervivencia y el bienestar de los camarones, la automatización facilitaría una operación más eficiente de los equipos de aireación, reduciendo costos energéticos y optimizando la gestión del sistema productivo [18, 19].

II. JUSTIFICACIÓN

La industria camaronera ecuatoriana constituye uno de los pilares económicos más relevantes del país, tanto por su aporte a las exportaciones como por la generación de empleo en las zonas costeras [5]. Sin embargo, a pesar de su importancia estratégica, gran parte de las operaciones productivas aún dependen de procedimientos manuales para el monitoreo y control de los parámetros ambientales en las piscinas de cultivo [4, 20]. Este modelo tradicional limita la capacidad de respuesta frente a variaciones rápidas en el entorno acuático, lo cual resulta especialmente crítico en sistemas intensivos donde la estabilidad de las condiciones del agua es determinante para el rendimiento y la supervivencia de los camarones [3, 11]. La falta de automatización y monitoreo continuo produce lapsos prolongados sin supervisión, en los que pueden ocurrir cambios que afecten seriamente el bienestar de los organismos y, en consecuencia, la productividad del sistema [6, 21].

El control de parámetros como la temperatura, el oxígeno disuelto, el pH y la salinidad es fundamental para garantizar un ambiente óptimo de cultivo [10, 15]. No obstante, las mediciones manuales realizadas en horarios específicos no son suficientes para registrar las fluctuaciones que pueden surgir en minutos, especialmente durante la noche o en condiciones climáticas adversas [7, 8]. En la práctica, esto implica un riesgo constante de eventos de estrés térmico, hipoxia o desequilibrios químicos que pueden desencadenar enfermedades, disminuir el crecimiento o incluso ocasionar mortalidades masivas [3, 12]. Estas problemáticas no solo reducen la eficiencia del cultivo, sino que incrementan significativamente los costos operativos al requerir más mano de obra, más energía para aireación continua y mayores esfuerzos para recuperar la estabilidad del sistema luego de un evento crítico [14, 22].

Frente a este panorama, la implementación de un sistema automatizado de monitoreo y control se presenta como una necesidad urgente y estratégica [16, 17]. El uso de sensores en tiempo real, combinado con plataformas de supervisión y controladores programables, permite obtener información continua y precisa del estado del agua, detectando a tiempo cualquier variación que pueda comprometer el rendimiento del cultivo [23, 24]. Además, la automatización ofrece la posibilidad de ejecutar respuestas correctivas de forma inmediata, como activar aireadores cuando el oxígeno desciende o ajustar mecanismos térmicos ante cambios bruscos de temperatura, sin depender de la presencia constante del personal técnico [9, 13]. Esto reduce los márgenes de error humano, optimiza el uso de recursos y garantiza que los parámetros críticos se mantengan dentro de rangos seguros las 24 horas del día [25, 26].

Otro aspecto relevante es el potencial de la automatización para mejorar la gestión energética y económica del sistema productivo [12, 27]. Al operar equipos como aireadores únicamente cuando los valores lo requieren, se evita el consumo innecesario de energía, reduciendo costos operativos y aumentando la eficiencia general del proceso [14, 22]. Asimismo, el registro histórico de los datos en tiempo real facilita el análisis de patrones ambientales, permitiendo tomar decisiones basadas en información confiable y predecir comportamientos del sistema ante distintos escenarios [18, 28]. Esto abre la puerta a una gestión más inteligente, sostenible y alineada con las exigencias actuales de la industria acuícola moderna [19, 29].

Finalmente, el desarrollo y simulación de este sistema utilizando herramientas como TIA Portal permitirá validar su funcionamiento de forma virtual antes de su implementación real, asegurando su viabilidad y adaptabilidad a las condiciones específicas del sector camaronero ecuatoriano [1, 2, 30]. Esta propuesta no solo contribuye al avance tecnológico de la industria, sino que también fortalece la competitividad del país en el mercado internacional al promover prácticas productivas eficientes, seguras y sostenibles [5]. Por estas razones, el presente trabajo se justifica plenamente, ya que responde a una necesidad real del sector, plantea una solución técnicamente sólida y aporta mejoras tangibles en términos de productividad, estabilidad ambiental y reducción de riesgos [16, 24].

III. OBJETIVOS

III-A. Objetivo General

Diseñar y simular un sistema scada para el monitoreo y control automatizado de calidad del agua en cultivos de camarón mediante TIA Portal

III-B. Objetivos Específicos

- Diseñar en TIA Portal un sistema de control automatizado que simule el monitoreo y regulación de temperatura, pH y oxígeno disuelto mediante control PID.
- Implementar una interfaz HMI en TIA Portal para la visualización en tiempo real de los parámetros críticos de la simulación del proceso.
- Validar el funcionamiento del sistema automatizado mediante pruebas controladas, asegurando que la eficiencia del control de pH y temperatura sea superior al 95 %.

IV. MARCO TEÓRICO

La camaronicultura intensiva representa uno de los sectores acuícolas de mayor crecimiento económico a nivel mundial, particularmente en regiones tropicales y subtropicales donde las condiciones ambientales favorecen el desarrollo de especies comerciales como *Litopenaeus vannamei* [8, 15]. Sin embargo, el éxito productivo de esta actividad depende críticamente del mantenimiento de condiciones ambientales óptimas a lo largo de todo el ciclo de cultivo [21]. Cada fase del desarrollo del camarón presenta requerimientos específicos y niveles diferenciados de vulnerabilidad ante fluctuaciones en parámetros fisicoquímicos del agua [3]. Comprender estas exigencias biológicas y traducirlas en protocolos de manejo efectivos constituye la base fundamental para diseñar sistemas de monitoreo y control automatizados que maximicen la productividad mientras minimizan los riesgos operativos inherentes a la actividad acuícola [22, 23].

IV-A. Piscina de Crianza (Larvas y Postlarvas)

La etapa de crianza representa el periodo más crítico y delicado en todo el ciclo productivo de la camaronicultura [21]. Durante esta fase temprana del desarrollo, las larvas y postlarvas presentan una extrema vulnerabilidad a las fluctuaciones ambientales debido a su sistema inmunológico inmaduro, su limitada capacidad de osmorregulación y su alta dependencia de condiciones estables para completar exitosamente sus procesos de metamorfosis y muda [3, 15]. Factores como la temperatura, el oxígeno disuelto, el pH y la salinidad no solo influyen directamente en las tasas de supervivencia, sino que también determinan la calidad y vigor de los organismos que pasarán a las siguientes fases productivas [8].

Diversos estudios científicos han documentado que variaciones bruscas en estos parámetros pueden elevar dramáticamente la mortalidad hasta en un 40 % o más, especialmente durante las primeras 72 horas posteriores a la siembra [3, 21]. Además, las alteraciones subletales pueden generar efectos a largo plazo como deformidades, reducción en las tasas de crecimiento, mayor susceptibilidad a enfermedades y un desarrollo heterogéneo de la población [6, 7]. Por estas razones, el monitoreo continuo y la automatización de los sistemas de control en esta etapa se consideran inversiones fundamentales para garantizar el éxito productivo y minimizar las pérdidas económicas asociadas a la mortalidad temprana [23, 24].

Parámetros críticos en la fase de crianza: Los rangos óptimos establecidos para esta etapa inicial reflejan años de investigación aplicada y experiencia práctica en hatcheries comerciales [8, 15]. La siguiente tabla resume los valores recomendados junto con su justificación biológica y las consecuencias observadas cuando estos parámetros se desvían de sus rangos aceptables [3, 21]:

Tabla 1 Piscina de crianza (Larvas y Postlarvas) [3, 21]

Parámetro	Rango ideal	Importancia biológica	Consecuencias si se altera
Temperatura	28–32 °C	Regula metabolismo y desarrollo inicial.	Estrés térmico y mortalidad.
Oxígeno disuelto	5–7 mg/L	Necesario para respiración y supervivencia.	Asfixia y letargo.
pH	7.5–8.5	Mantiene equilibrio fisiológico.	Acidosis y estrés severo.
Salinidad	10–20 ppt	Permite osmorregulación adecuada.	Shock osmótico.
Amonio (NH ₃ /NH ₄)	0.1 mg/L	Evita toxicidad en fase inicial.	Daño branquial y muerte.
Alimentación inicial	Microalgas, nauplios	Favorece crecimiento y muda.	Deformidades y retraso del crecimiento.

IV-B. Piscinas en Fase de Crecimiento (Juveniles)

Durante la fase de crecimiento, que típicamente abarca desde las postlarvas hasta organismos de peso intermedio, los juveniles comienzan a exhibir una mayor resistencia fisiológica y capacidad de adaptación a su entorno [8, 11]. Sin embargo, a pesar de esta aparente robustez, continúan siendo altamente susceptibles a cambios bruscos en la calidad del agua, variaciones en la disponibilidad de alimento y condiciones de estrés generadas por altas densidades de cultivo [6]. Esta etapa es crucial porque define el rendimiento final del ciclo productivo: un crecimiento deficiente o heterogéneo en esta fase resulta prácticamente imposible de compensar en etapas posteriores [23].

El adecuado manejo de la densidad poblacional, la implementación de estrategias de alimentación eficientes y el monitoreo sistemático de parámetros fisicoquímicos y biológicos permite no solo alcanzar tasas de crecimiento óptimas, sino también mantener un factor de conversión alimenticia (FCR) favorable, reducir la incidencia de enfermedades y minimizar el impacto ambiental del cultivo [11, 22]. Investigaciones recientes han demostrado que sistemas automatizados de alimentación, basados en algoritmos que consideran la biomasa, temperatura del agua y patrones de consumo, mejoran significativamente el rendimiento productivo y reducen la variabilidad entre individuos, generando lotes más homogéneos y comercialmente valiosos [11]. Además, la automatización permite reducir el desperdicio de alimento, que representa uno de los principales costos operativos y fuentes de contaminación en sistemas acuícolas intensivos [14, 24].

Aspectos fundamentales del manejo en fase juvenil: La gestión efectiva de esta etapa requiere balancear múltiples variables operativas que interactúan entre sí de manera compleja [7, 8]. Los productores experimentados reconocen que el éxito no depende de optimizar un solo factor, sino de mantener un equilibrio dinámico entre todos los aspectos del sistema [6]. La tabla presentada a continuación sintetiza los principales elementos de manejo y sus implicaciones productivas [11, 23]:

Tabla 2 Factores que afectan al camarón adulto [6, 8]

Aspecto de manejo	Descripción	Objetivo productivo	Riesgos
Densidad de siembra	10–20 camarones/m ²	Crecimiento homogéneo.	Competencia por alimento.
Calidad del agua	Control constante de parámetros.	Estabilidad productiva.	Proliferación bacteriana.
Alimentación	Manual o automática.	Mejorar FCR y crecimiento.	Sobre o subalimentación.
Renovación de agua	5–10 % semanal.	Reducir carga orgánica.	Acumulación de tóxicos.
Monitoreo	Sensores o métodos manuales.	Detección temprana de fallas.	Decisiones tardías.

IV-C. Factores que Afectan al Camarón Adulto

En la fase adulta o de engorde final, los camarones han alcanzado su máxima capacidad de adaptación fisiológica y muestran una mayor tolerancia a variaciones ambientales moderadas [8, 23]. No obstante, continúan siendo vulnerables a problemas crónicos o agudos relacionados con la calidad del agua, particularmente la hipoxia (deficiencia de oxígeno disuelto), la acumulación progresiva de compuestos nitrogenados tóxicos como el amonio y la sedimentación excesiva de materia orgánica en el fondo de los estanques [12, 14]. Estos factores no solo comprometen la salud y el bienestar de los organismos, sino que pueden afectar negativamente la calidad organoléptica y la presentación del producto final, reduciendo su valor comercial [6].

Además, durante esta etapa crítica previa a la cosecha, cualquier evento de mortalidad masiva representa pérdidas económicas significativas, dado que se ha invertido tiempo, recursos alimenticios y energía durante varios meses de cultivo [22]. Por esta razón, el mantenimiento de condiciones ambientales estables es fundamental para proteger la inversión y maximizar el retorno económico [13]. Investigaciones internacionales demuestran que la implementación de sistemas de control automático basados en controladores lógicos programables (PLC) mejora sustancialmente la estabilidad de los parámetros ambientales críticos, reduce la incidencia de eventos de mortalidad masiva y permite una respuesta inmediata ante situaciones de emergencia, operando incluso durante la noche o en ausencia de personal [16, 17]. La integración de sensores en tiempo real, sistemas de alarma y actuadores automatizados representa la tendencia actual en acuicultura intensiva moderna [22, 24].

Principales factores de riesgo en la fase de engorde: Los camarones adultos enfrentan una serie de amenazas ambientales que pueden comprometer la calidad del producto final y generar pérdidas económicas sustanciales cuando no se gestionan adecuadamente [12, 13]. La experiencia de campo ha identificado cinco factores críticos que requieren vigilancia constante y capacidad de respuesta rápida [14, 16]. En la siguiente tabla se detallan estos factores junto con sus mecanismos de acción y las estrategias correctivas más efectivas [17, 22]:

Tabla 3 Factores que afectan al camarón adulto [12, 14]

Factor	Cómo afecta	Impacto productivo	Medidas correctivas
Oxígeno bajo	Reduce respiración y movimiento.	Mortalidad súbita.	Aireación continua.
Temperatura alta	Aumenta estrés metabólico.	Menor crecimiento.	Sombreamiento y recirculación.
Amonio elevado	Daño branquial.	Baja calidad y peso.	Biofiltros y recambio.
Sobrepoblación	Competencia y estrés.	Desigualdad en tallas.	Reducir densidad.
Sedimentos	Aumentan bacterias.	Afecta muda y salud.	Sifoneo del fondo.

IV-D. PLC Siemens S7-1500

El controlador lógico programable seleccionado para este proyecto es el Siemens S7-1500, un dispositivo diseñado específicamente para aplicaciones de automatización industrial que requieren alta confiabilidad y capacidad de procesamiento [16, 17]. Este modelo se caracteriza por su arquitectura modular, lo que permite adaptar el sistema a las necesidades específicas del proyecto mediante la adición de módulos de entrada/salida según los requerimientos del proceso [25]. El S7-1500 incorpora un procesador de alto rendimiento capaz de ejecutar operaciones lógicas complejas y algoritmos de control avanzados con tiempos de ciclo extremadamente reducidos, lo cual resulta fundamental cuando se trabaja con múltiples variables que deben monitorearse de forma simultánea [30]. Una de las características más relevantes del S7-1500 para este proyecto es su capacidad de comunicación mediante el protocolo Profinet, que facilita la integración con sensores inteligentes, paneles HMI y otros dispositivos de campo [26].



Figura 1. PLC Siemens S7-1500 [1]

Este protocolo industrial permite el intercambio de datos en tiempo real con una latencia mínima, asegurando que las lecturas de los sensores y las acciones de control se ejecuten de manera coordinada y eficiente [25]. Además, el S7-1500 cuenta con funciones integradas para el manejo de contadores de alta velocidad, bloques de control PID preconfigurados y capacidades de diagnóstico avanzadas que simplifican tanto la programación como el mantenimiento del sistema [1, 2].

La robustez física del S7-1500 es otro aspecto determinante para su selección, ya que está diseñado para operar en ambientes industriales con condiciones adversas, incluyendo variaciones de temperatura, humedad elevada y presencia de vibraciones [13]. Su diseño constructivo incluye protecciones contra interferencias electromagnéticas y un sistema de montaje en riel DIN que facilita la instalación en gabinetes de control [16]. En el contexto de un sistema SCADA para cultivos acuícolas, donde el controlador puede estar expuesto a ambientes con alta humedad relativa, estas características constructivas garantizan un funcionamiento continuo y confiable durante largos períodos sin intervención [22].

IV-E. Panel HMI Siemens KTP 700 Basic

El panel de interfaz hombre-máquina seleccionado es el Siemens KTP 700 Basic, un dispositivo que integra una pantalla táctil de 7 pulgadas con resolución suficiente para visualizar múltiples variables de proceso de forma clara y organizada [18, 19]. Este modelo forma parte de la familia de paneles Basic de Siemens, diseñados específicamente para aplicaciones donde se requiere una interfaz funcional y accesible sin necesidad de características avanzadas de visualización [29].

La pantalla táctil resistiva del KTP 700 permite la operación directa por parte del usuario mediante toques y gestos simples, eliminando la necesidad de dispositivos de entrada adicionales como teclados o ratones [28]. La comunicación entre el panel HMI y el PLC S7-1500 se establece de manera nativa mediante el protocolo Profinet, lo que simplifica considerablemente la configuración del sistema y asegura un intercambio de datos robusto y en tiempo real [24]. A través de esta conexión, el panel puede recibir constantemente los valores actualizados de temperatura, oxígeno disuelto, pH y otros parámetros monitoreados por los sensores, presentándolos de forma numérica o gráfica según el diseño de la interfaz [23].

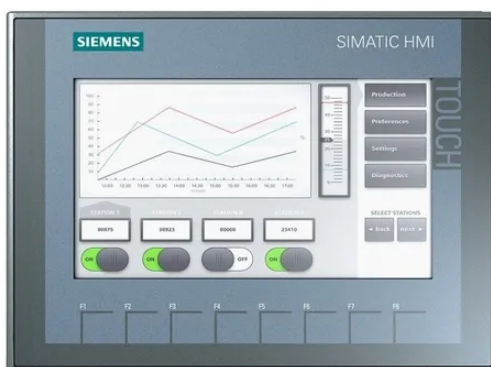


Figura 2. HMI Siemens KTP 700 Basic [2].

Además, el KTP 700 permite la implementación de pantallas múltiples, botones virtuales para activación manual de equipos, campos de ingreso de valores de consigna y sistemas de alarmas visuales que alertan al operador cuando algún parámetro excede los límites establecidos [29]. El software de configuración TIA Portal incluye herramientas específicas para el diseño de interfaces en paneles KTP, con bibliotecas de objetos gráficos predefinidos que aceleran el proceso de desarrollo [2].

Esto permite crear pantallas intuitivas donde se representen esquemáticamente las piscinas de cultivo, los sensores instalados y el estado de los actuadores, facilitando al personal técnico la comprensión inmediata del estado del sistema [1]. La capacidad de registro de eventos del panel también resulta útil para documentar las acciones realizadas por los operadores y los cambios en los parámetros del proceso a lo largo del tiempo [30].

IV-F. Sensores

Los dispositivos de medición constituyen elementos diseñados para identificar alteraciones en el ambiente y transformarlas en indicadores procesables e interpretables mediante sistemas electrónicos o computacionales [7, 8]. Estos instrumentos posibilitan la cuantificación de múltiples variables físicas y se utilizan en un amplio rango de áreas, abarcando la automatización de procesos industriales [15].

Se dispone de diversos tipos de dispositivos de medición, clasificados según el fenómeno que registran, tales como los de temperatura, cercanía, desplazamiento o gases [21]. La elección del dispositivo apropiado está condicionada por los requerimientos específicos del proceso o la aplicación particular. Los progresos tecnológicos han mejorado la exactitud, las dimensiones y la eficacia de estos instrumentos, propiciando el avance de sistemas más sofisticados e inteligentes [23].

IV-G. Sensores de pH para Aplicaciones Acuícolas

Los sensores de pH empleados en sistemas de monitoreo acuícola funcionan mediante el principio electroquímico, donde un electrodo de vidrio sensible a los iones de hidrógeno genera una diferencia de potencial proporcional a la concentración de estos iones en la solución [10]. Este potencial eléctrico es comparado con un electrodo de referencia estable, y la diferencia resultante se convierte en una señal que puede ser procesada por el sistema de control [15]. Para aplicaciones en cultivos de camarón, es fundamental seleccionar sensores diseñados específicamente para inmersión continua en agua, con cuerpos resistentes a la corrosión y membranas de vidrio reforzadas que soporten el contacto prolongado con materia orgánica y sales disueltas [6].

Los sensores modernos incluyen sistemas de compensación automática de temperatura, dado que las lecturas de pH son sensibles a las variaciones térmicas del medio [10]. Esta compensación puede realizarse mediante un sensor de temperatura integrado en el mismo cuerpo del electrodo o a través de una entrada adicional donde se conecta un sensor térmico independiente [15]. La salida del sensor de pH puede ser analógica, típicamente en el rango de 4-20 mA o 0-10 V, lo que facilita su conexión directa a las entradas analógicas del PLC sin necesidad de acondicionadores de señal adicionales [23].

El mantenimiento de estos sensores requiere calibraciones periódicas utilizando soluciones buffer de pH conocido, así como limpieza regular de la membrana para evitar la acumulación de biofilm que puede afectar la precisión de las

mediciones [6]. En el contexto de un sistema automatizado, es recomendable implementar rutinas de verificación que comparen las lecturas del sensor con valores históricos esperados, generando alertas cuando se detecten desviaciones que puedan indicar la necesidad de mantenimiento [28]. La correcta instalación del sensor también es determinante; debe ubicarse en una zona donde el agua tenga circulación suficiente para asegurar que la medición sea representativa del estado general de la piscina [3].



Figura 3. Sensor de pH [15]

IV-H. Sensores de Oxígeno Disuelto

Los sensores de oxígeno disuelto utilizados en acuicultura pueden clasificarse en dos tecnologías principales: galvánicos y ópticos [8, 23]. Los sensores galvánicos operan mediante una reacción electroquímica en la que el oxígeno disuelto se reduce en un cátodo, generando una corriente eléctrica proporcional a su concentración [12]. Estos sensores requieren una membrana permeable al oxígeno que separa el electrolito interno del agua de la piscina, y su respuesta es relativamente rápida, aunque necesitan un tiempo de estabilización inicial al encenderse [13]. Por otro lado, los sensores ópticos funcionan mediante la luminiscencia de un material sensible al oxígeno; cuando la luz incide sobre este material, su respuesta lumínica varía según la concentración de oxígeno presente, lo que se traduce en una señal medible [14].

Para el monitoreo continuo en piscinas camaroneras, los sensores ópticos presentan ventajas significativas sobre los galvánicos, principalmente en términos de estabilidad a largo plazo y menor necesidad de mantenimiento [12]. No consumen oxígeno durante la medición, lo que elimina errores en condiciones de flujo bajo, y no requieren membranas que deban reemplazarse periódicamente [14]. Ambos tipos de sensores pueden entregar señales analógicas estándar o comunicarse digitalmente mediante protocolos como Modbus o Profibus, facilitando su integración con el sistema de control [23].

La instalación correcta del sensor de oxígeno es fundamental para obtener mediciones representativas; debe colocarse a una profundidad intermedia donde se capture el comportamiento típico de la columna de agua, evitando zonas con acumulación de sedimentos o circulación insuficiente [8]. Adicionalmente, estos sensores suelen incorporar compensación automática de temperatura y presión, ya que ambos factores afectan la solubilidad del oxígeno en el agua [13]. En sistemas automatizados, la información del sensor se utiliza no solo para monitoreo, sino también para controlar directamente los equipos de aireación, activándolos cuando el nivel de oxígeno desciende por debajo del umbral establecido y desactivándolos cuando se recupera el valor adecuado [14, 22].



Figura 4. Sensor de Oxígeno Disuelto [28]

IV-I. Sensores de Temperatura

Los sensores de temperatura empleados en aplicaciones acuícolas deben cumplir con requisitos específicos de resistencia al agua, precisión y tiempo de respuesta adecuado para detectar variaciones térmicas en el medio [9, 10]. Los sensores tipo PT100 son ampliamente utilizados en la industria por su linealidad, estabilidad a largo plazo y rango de operación extendido [6]. Estos dispositivos funcionan mediante el principio de variación de resistencia eléctrica con la temperatura; un elemento de platino presenta una resistencia nominal de 100 ohmios a 0°C, y esta resistencia aumenta de forma predecible conforme se incrementa la temperatura [7].

Para su conexión al sistema de control, los PT100 pueden configurarse en montajes de dos, tres o cuatro hilos, siendo el de tres hilos el más común en aplicaciones industriales por su balance entre precisión y simplicidad de cableado [9]. La señal del sensor debe acondicionarse mediante transmisores que conviertan la variación de resistencia en una señal de corriente o voltaje estándar, típicamente 4-20 mA, compatible con las entradas analógicas del PLC [10]. Esta estandarización permite que los cables de señal recorran distancias considerables sin pérdida significativa de precisión ni susceptibilidad al ruido eléctrico [23].

Los sensores de temperatura para inmersión en agua deben estar encapsulados en materiales resistentes a la corrosión, comúnmente acero inoxidable, con grado de protección IP68 que garantice hermeticidad completa incluso

bajo inmersión continua [7]. El tiempo de respuesta del sensor, definido como el tiempo necesario para alcanzar el 63 % del cambio total de temperatura, debe ser lo suficientemente rápido para detectar variaciones relevantes en el cultivo, aunque no tan sensible como para generar falsas alarmas por fluctuaciones momentáneas [9]. En el diseño del sistema de control, la información de temperatura no solo se utiliza para monitoreo directo, sino también como entrada para la compensación automática de las mediciones de pH y oxígeno disuelto, mejorando la precisión global del sistema [15, 21].

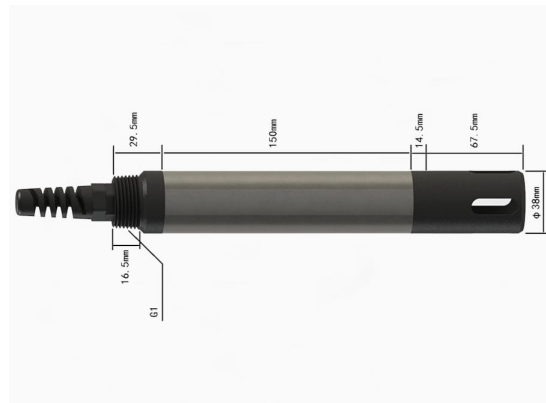


Figura 5. Sensor IOT-RS485-DO [7]

IV-J. TIA Portal V17 como Plataforma de Desarrollo

TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) es el entorno de ingeniería unificado desarrollado por Siemens para la programación, configuración y puesta en marcha de sistemas de automatización [1, 2]. La versión 17 integra en una única plataforma todas las herramientas necesarias para trabajar con controladores SIMATIC, paneles HMI, variadores de frecuencia y sistemas de comunicación industrial [30]. Esta integración elimina la necesidad de utilizar múltiples softwares independientes, simplificando el flujo de trabajo y reduciendo el tiempo de desarrollo de proyectos [26].

Para el desarrollo del sistema SCADA propuesto, TIA Portal proporciona funcionalidades específicas que resultan determinantes: el editor de programación permite trabajar con múltiples lenguajes como LAD (diagrama de contactos), FBD (diagrama de bloques funcionales) y SCL (lenguaje de control estructurado), adaptándose al estilo de programación preferido por el desarrollador [1]. Las bibliotecas de bloques funcionales incluyen controladores PID preconfigurados, temporizadores, contadores y funciones matemáticas avanzadas que aceleran la implementación de lógicas de control complejas [2]. Adicionalmente, el entorno incluye simuladores integrados como PLCSIM y PLCSIM Advanced, que permiten ejecutar y probar el programa del PLC en un entorno virtual sin necesidad de hardware físico [30].

El módulo WinCC de TIA Portal está dedicado específicamente al diseño de interfaces HMI, ofreciendo herramientas gráficas para crear pantallas, configurar alarmas, definir tendencias históricas y establecer niveles de acceso por usuario [29]. La programación de la lógica del PLC y el diseño de la interfaz HMI comparten la misma base de datos de variables, lo que garantiza consistencia y facilita la sincronización entre ambos componentes [18]. Las

variables declaradas en el programa del controlador pueden arrastrarse directamente a los objetos gráficos del HMI, reduciendo errores de configuración y simplificando las modificaciones posteriores [19].

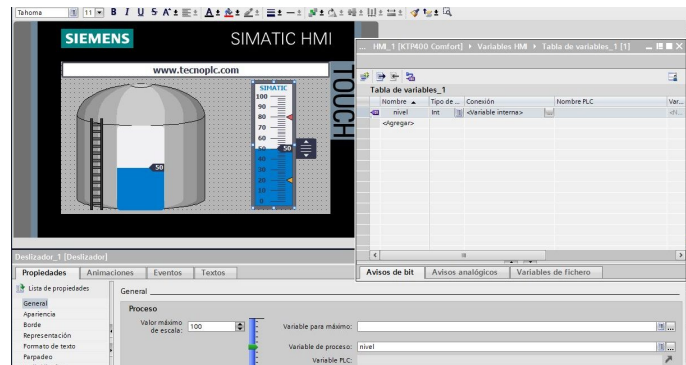


Figura 6. Software de simulación TIA Portal [2]

IV-K. Protocolo de Comunicación Profinet

Profinet es el estándar de comunicación industrial basado en Ethernet desarrollado por Siemens y adoptado como norma IEC 61158 [25]. Este protocolo permite la interconexión de dispositivos de campo, controladores y sistemas de supervisión mediante redes Ethernet estándar, aprovechando la infraestructura de comunicación ampliamente disponible y reduciendo costos de cableado [26]. A diferencia de protocolos industriales anteriores basados en buses de campo propietarios, Profinet utiliza cables Ethernet convencionales y switches industriales, facilitando la expansión del sistema y la integración con redes de información corporativas [23].

Una de las características más relevantes de Profinet para aplicaciones de control en tiempo real es su capacidad de comunicación determinista, donde los tiempos de ciclo pueden predecirse y garantizarse incluso bajo condiciones de alta carga de red [25]. Esto se logra mediante la reserva de ancho de banda para comunicaciones críticas y el uso de mecanismos de sincronización temporal entre dispositivos [24]. En el contexto del sistema SCADA propuesto, Profinet permite que el PLC reciba las lecturas de los sensores y actualice los actuadores en intervalos de milisegundos, asegurando que las respuestas del sistema de control sean suficientemente rápidas para mantener los parámetros del agua dentro de los rangos establecidos [22].

La configuración de una red Profinet en TIA Portal es relativamente directa; el software detecta automáticamente los dispositivos conectados a la red mediante funciones de escaneo, y el usuario puede asignar direcciones IP, configurar parámetros de comunicación y organizar la topología de red mediante interfaces gráficas intuitivas [26]. Cada dispositivo en la red, ya sea un sensor inteligente, un módulo de entradas/salidas o un panel HMI, recibe una dirección única y puede intercambiar datos con el PLC de forma transparente para el programador [29]. Además, Profinet incluye funcionalidades de diagnóstico integradas que permiten monitorear el estado de la comunicación, detectar cables desconectados o dispositivos con fallas, y generar alarmas automáticas cuando se presentan problemas de red [19].

IV-L. Sistemas SCADA en Entornos Acuícolas

Los sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) representan la capa superior de la pirámide de automatización industrial, encargándose de la supervisión centralizada, el registro histórico de variables y la generación de reportes para análisis y toma de decisiones [18, 19]. En el contexto de cultivos acuícolas, un sistema SCADA integra la información proveniente de múltiples sensores distribuidos en una o varias piscinas, presenta esta información de forma gráfica e intuitiva al personal técnico, y almacena los datos históricos para análisis posteriores [29]. La arquitectura típica de un SCADA incluye una estación de supervisión con software especializado, una red de comunicación industrial, controladores programables que ejecutan las lógicas de control automático, y los dispositivos de campo como sensores y actuadores [23, 28].

La implementación de SCADA en acuicultura permite superar las limitaciones de los sistemas de monitoreo manual, proporcionando visibilidad continua del estado de los parámetros críticos las 24 horas del día [22, 24]. Los operadores pueden acceder remotamente al sistema desde computadoras o dispositivos móviles, recibiendo notificaciones automáticas cuando alguna variable excede los límites configurados [18]. Esta capacidad de monitoreo remoto resulta especialmente valiosa durante las horas nocturnas, cuando tradicionalmente no hay personal en las instalaciones pero los riesgos de hipoxia o variaciones de temperatura son más elevados [12].

El registro histórico de datos que proporciona un sistema SCADA constituye una herramienta fundamental para la optimización continua del proceso productivo [28]. Al almacenar sistemáticamente las lecturas de temperatura, oxígeno, pH y otros parámetros, junto con información sobre las acciones de control ejecutadas y los eventos del sistema, se genera una base de datos que puede analizarse para identificar patrones, correlaciones entre variables y oportunidades de mejora [23]. Por ejemplo, el análisis de tendencias puede revelar que ciertas combinaciones de temperatura y densidad de población generan consumos elevados de oxígeno en horarios específicos, permitiendo ajustar proactivamente las estrategias de aireación antes de que se presenten problemas [14, 22].

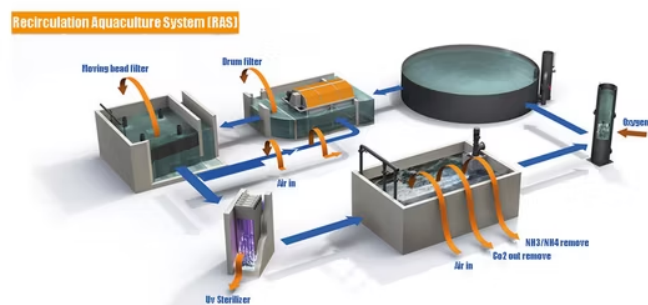


Figura 7. Sistema de Acuicultura Ras para Cultivo de Camarones [18]

IV-M. Controladores PID para Regulación de Parámetros

Los controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) constituyen el algoritmo de control más utilizado en la industria para la regulación automática de variables de proceso [16, 30]. Este tipo de controlador calcula una señal de salida basándose en tres componentes: la acción proporcional, que responde directamente al error actual entre

el valor medido y el valor deseado; la acción integral, que acumula los errores pasados para eliminar desviaciones permanentes; y la acción derivativa, que anticipa cambios futuros basándose en la velocidad de variación del error [9, 13]. La combinación de estas tres acciones permite lograr un control preciso, estable y con respuesta adecuada ante perturbaciones externas [12, 17].

En el contexto del control de parámetros acuícolas, los controladores PID pueden aplicarse para regular variables como la temperatura mediante el control de intercambiadores de calor, o el oxígeno disuelto mediante el ajuste de la velocidad de los aireadores [12, 14]. La implementación de estos controladores en el PLC S7-1500 se realiza mediante bloques funcionales preconfigurados incluidos en TIA Portal, que simplifican la programación y garantizan un comportamiento confiable [30]. Estos bloques permiten configurar parámetros como las constantes proporcional (K_p), integral (K_i) y derivativa (K_d), así como límites de saturación, tiempos de muestreo y modos de operación manual o automático [16].

El ajuste o sintonización de los parámetros del controlador PID es fundamental para lograr un desempeño óptimo del sistema [9]. Valores inadecuados pueden resultar en respuestas oscilatorias, tiempos de estabilización excesivamente largos o incapacidad para mantener el valor deseado ante cambios en la carga [13]. Existen diversos métodos de sintonización, desde técnicas experimentales como el método de Ziegler-Nichols hasta enfoques basados en modelos matemáticos del proceso [30]. En aplicaciones acuícolas, donde las dinámicas del sistema son relativamente lentas y las perturbaciones tienden a ser graduales, suele preferirse un ajuste conservador que priorice la estabilidad sobre la velocidad de respuesta, evitando cambios bruscos que puedan estresar a los organismos cultivados [12, 22].

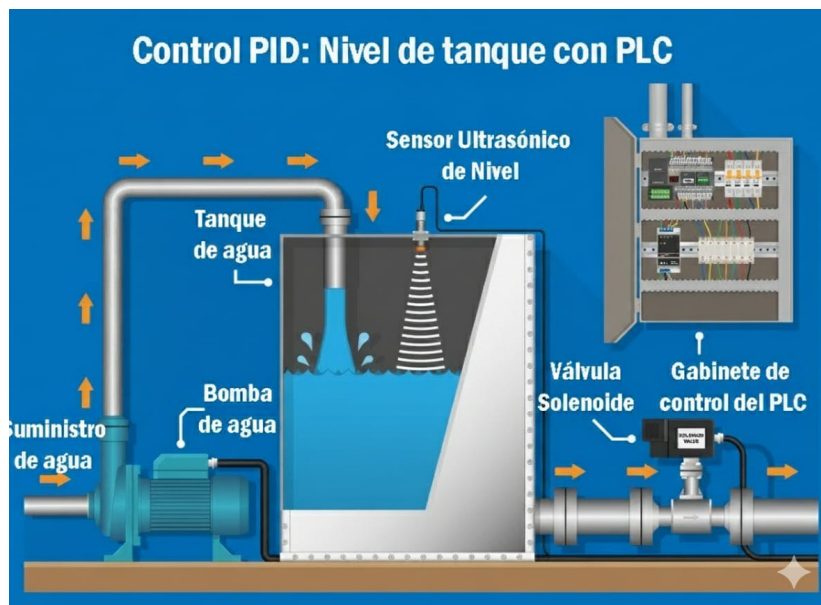


Figura 8. Controladores PID para Regulación de Parámetros [16]

IV-N. Diseño e implementación de tableros de control

Una vez definida la lógica de control y los diagramas de flujo operativos, se procede con el diseño físico de los tableros que alojarán todos los componentes electrónicos del sistema. Estos tableros constituyen el corazón físico de la instalación y deben diseñarse considerando no solo la funcionalidad técnica, sino también aspectos prácticos como la accesibilidad para mantenimiento, la protección contra condiciones ambientales adversas propias de las instalaciones camaroneras y la seguridad del personal que operará el sistema [40].

El diseño de los tableros se realizará siguiendo normativas internacionales de instalaciones eléctricas industriales, prestando especial atención a la separación entre circuitos de potencia y control, el uso de protecciones adecuadas contra sobre corrientes y la implementación de sistemas de aterramiento que garanticen la seguridad operativa. Dado que estos tableros estarán ubicados en ambientes con alta humedad relativa, característica inevitable en instalaciones cercanas a piscinas de cultivo, se seleccionarán gabinetes con grado de protección IP65 como mínimo, lo que garantizará hermeticidad contra polvo y resistencia a chorros de agua desde cualquier dirección [31].

IV-Ñ. Componentes del tablero de control

Cada tablero integrará los siguientes componentes principales, seleccionados específicamente para trabajar en conjunto y proporcionar un sistema robusto y confiable. La fuente de alimentación conmutada será el primer elemento crítico del sistema. Se utilizará una fuente capaz de convertir 110-220 VAC a 24 VDC con una capacidad mínima de 5 A, suficiente para alimentar simultáneamente el PLC S7-1500 [32], todos los sensores conectados, los módulos de entrada/salida adicionales que pudieran requerirse y los actuadores de baja potencia como electroválvulas o indicadores luminosos. La selección de una fuente conmutada en lugar de una fuente lineal tradicional responde a criterios de eficiencia energética y generación de calor. Las fuentes conmutadas modernas alcanzan eficiencias superiores al 85 %, lo que significa que generan significativamente menos calor durante su operación, aspecto fundamental cuando se trabaja en gabinetes cerrados ubicados en ambientes cálidos.



Figura 9. La fuente de alimentación que alimenta el PLC S7-1500, por J.Maridueña

Además, estas fuentes incorporan protecciones contra cortocircuitos, sobrecargas y sobretensiones que añaden una capa adicional de seguridad al sistema. El PLC Siemens S7-1500 ocupará la posición central dentro del tablero, montado sobre riel DIN estándar de 35 mm. A su alrededor se distribuirán los módulos de expansión necesarios según la cantidad de variables a monitorear [54]. Para un sistema que controle una piscina individual con tres parámetros críticos (temperatura, pH y oxígeno disuelto), la CPU básica del S7-1500 con sus entradas/salidas integradas podría ser suficiente. Sin embargo, si el proyecto escalara para controlar múltiples piscinas simultáneamente, se añadirían módulos de entrada analógica adicionales y módulos de salida tanto analógicos como digitales.



Figura 10. El PLC Siemens S7-1500l, por J. Maridueña

Los relés electromagnéticos desempeñarán un papel fundamental en la conmutación de cargas de potencia. Aunque el PLC puede controlar directamente ciertos actuadores de baja corriente mediante sus salidas digitales, equipos como bombas de aireación, calentadores eléctricos o sistemas de dosificación química requieren corrientes que exceden la capacidad de las salidas del controlador [45]. Para estos casos, se instalarán relés de potencia con bobinas de 24 VDC y contactos dimensionados para las corrientes específicas de cada actuador, típicamente entre 5 y 16 A dependiendo de la aplicación. Cada relé se montará en una base que permitirá su extracción sin necesidad de desconectar cables, facilitando enormemente las tareas de mantenimiento preventivo o reemplazo en caso de falla.

Además, se instalarán supresores de pico en paralelo con las bobinas de los relés para proteger las salidas del PLC contra las sobretensiones que se generan cuando una bobina inductiva se desenergiza bruscamente. El sistema de protección eléctrica incluirá varios niveles de seguridad. En la entrada de alimentación principal se instalará un interruptor termomagnético bipolar de 10 A que protegerá todo el tablero contra sobrecargas y cortocircuitos. Posteriormente, cada circuito derivado contará con su propia protección individual dimensionada según la carga que alimenta [49]. Los circuitos de instrumentación y control operarán con fusibles de 2 A, mientras que los circuitos que alimentan actuadores de potencia utilizarán protecciones de 6 a 10 A según corresponda.

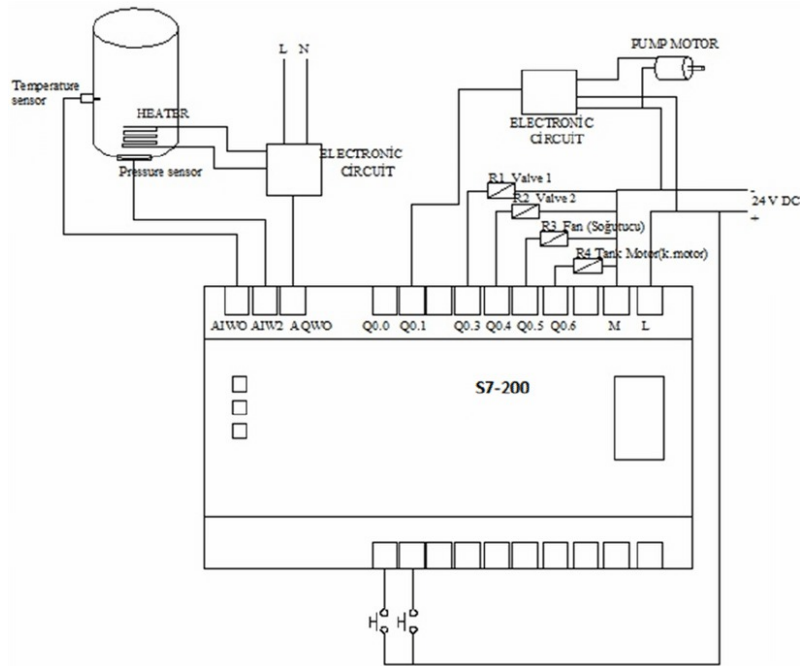


Figura 12. Diagrama del cableado de control [10]

IV-P. Montaje físico y cableado

El proceso de montaje seguirá una secuencia lógica que minimice el riesgo de errores y facilite la verificación progresiva del trabajo realizado. Inicialmente se fijará el riel DIN sobre la placa de montaje del gabinete, asegurándose de que quede perfectamente nivelado y firmemente sujeto. Sobre este riel se montarán ordenadamente todos los componentes, comenzando desde la izquierda con la fuente de alimentación, seguida del PLC con sus módulos de expansión, continuando con los relés y finalizando con las borneras de distribución [45, 53].

La distribución física de los componentes no será aleatoria, sino que responderá a criterios de flujo de señales y optimización del cableado. Los componentes que intercambian más señales entre sí se ubicarán próximos para minimizar la longitud de los cables y reducir la susceptibilidad al ruido electromagnético. Por ejemplo, los módulos de entrada analógica del PLC se colocarán cerca de las borneras donde llegarán los cables de los sensores, mientras que los relés de salida se ubicarán cerca de las borneras de potencia que alimentarán los actuadores.

El cableado se realizará utilizando conductor de cobre multifilar de calibres apropiados para cada aplicación. Los circuitos de control y señales analógicas emplearán cable calibre 22 AWG, mientras que los circuitos de potencia para actuadores utilizarán calibres entre 16 y 14 AWG según la corriente que deban conducir. Todo el cableado se enrutará a través de canaletas plásticas que mantendrán los cables organizados y protegidos, separando físicamente los cables de potencia de los cables de señal para evitar interferencias.

Cada conductor se marcará en ambos extremos con marbetes termo contraíbles o etiquetas autoadhesivas que indiquen claramente su función y destino. Esta identificación es absolutamente crítica para facilitar el mantenimiento futuro y evitar confusiones que podrían resultar en conexiones erróneas durante reparaciones o modificaciones [45].

Las conexiones en las borneras se realizarán utilizando terminales tipo pin prensados correctamente con herramienta especializada. Se evitará el uso de conductores pelados directamente introducidos en las borneras, ya que esta práctica, aunque común en instalaciones de baja calidad, genera conexiones poco confiables susceptibles a aflojarse con el tiempo debido a las vibraciones o los ciclos térmicos.

IV-Q. Configuración de la comunicación Profinet

La configuración de la red de comunicación industrial representa uno de los aspectos más críticos del proyecto, ya que de ella depende el intercambio de información entre todos los dispositivos del sistema [41, 42]. Profinet, como protocolo basado en Ethernet, ofrece velocidades de comunicación significativamente superiores a los buses de campo tradicionales, permitiendo tiempos de actualización de datos en el rango de milisegundos, fundamental para un sistema de control en tiempo real.

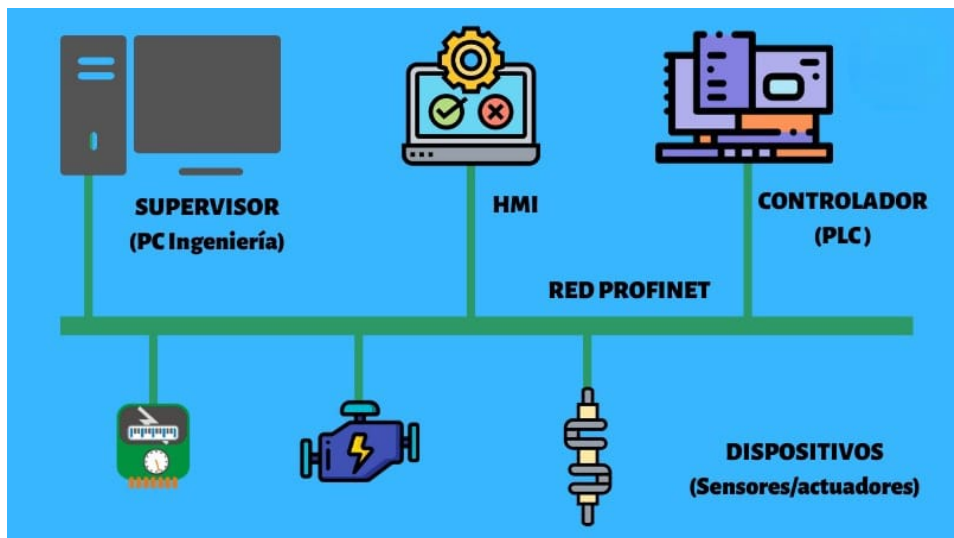


Figura 13. Esquema de la configuración de la comunicación profinet [26]

■ Topología de red

La topología que se implementará será de tipo estrella, donde el PLC S7-1500 actuará como dispositivo central al cual se conectarán todos los demás elementos del sistema: sensores inteligentes con interfaz Profinet, el panel HMI KTP 700 y potencialmente otros PLCs si el sistema se expande para controlar múltiples piscinas desde una estación de supervisión centralizada. Esta topología se materializará mediante un switch industrial Profinet, dispositivo especialmente diseñado para ambientes hostiles que ofrece múltiples ventajas sobre switches comerciales convencionales.

Los switches industriales operan en rangos de temperatura extendidos (típicamente de -40°C a 75°C) [17, 55], soportan montaje en riel DIN, incorporan protección contra interferencias electromagnéticas y ofrecen funcionalidades específicas para redes industriales como la detección de bucles y la priorización de tráfico en tiempo real. El switch se ubicará dentro del mismo gabinete que aloja el PLC, minimizando las longitudes de cable necesarias y facilitando el mantenimiento. Desde este punto central se distribuirán cables Ethernet hacia cada dispositivo de campo. Para las conexiones se utilizará cable Ethernet industrial categoría 6A, que

ofrece mejor protección contra interferencias que el cable comercial estándar y está específicamente diseñado para instalaciones industriales con mayor resistencia mecánica y a agentes químicos.

■ Configuración en TIA Portal

La configuración de la red Profinet se realizará casi en su totalidad desde el entorno TIA Portal, que proporciona herramientas gráficas intuitivas para este propósito.

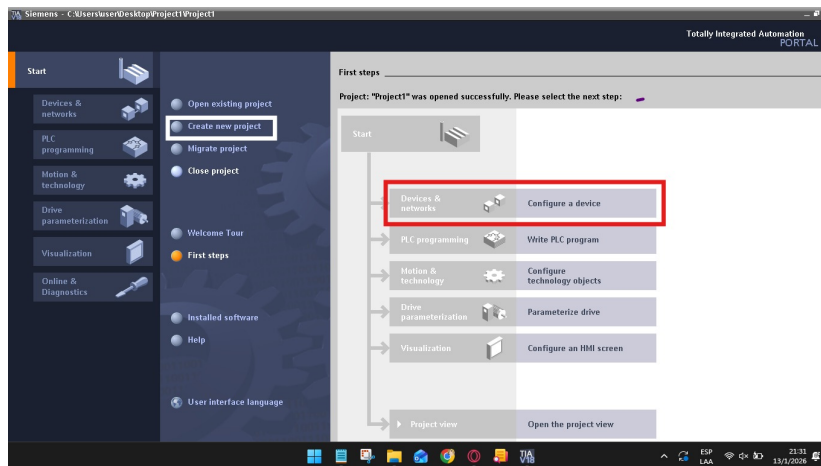


Figura 14. Configuración del TIA Portal, por J. Maridueña

Al crear un nuevo proyecto en TIA Portal, se comenzará agregando el PLC S7-1500 a la configuración de hardware. El software detectará automáticamente el modelo exacto del procesador y mostrará sus características técnicas.

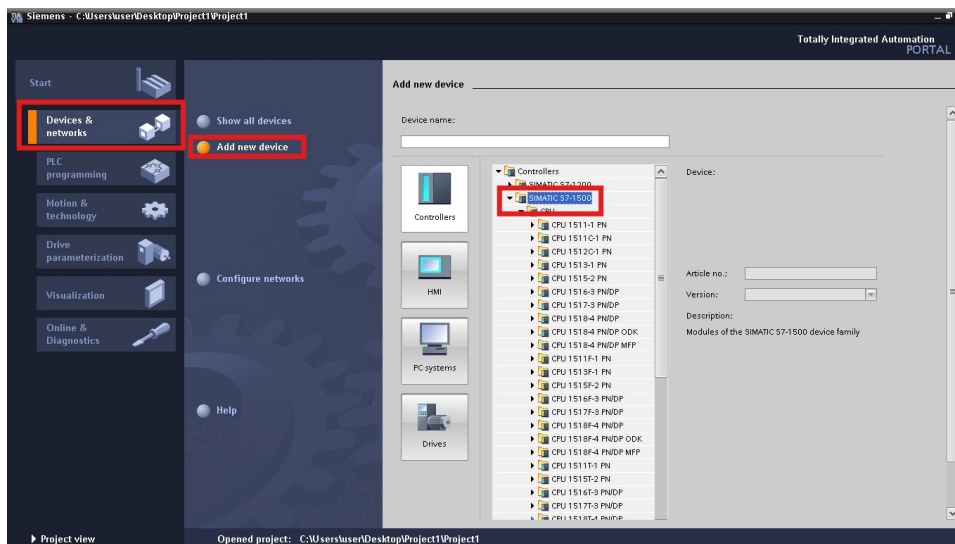


Figura 15. Configuración del PLC S7-1500 a utilizar, por J. Maridueña

En la vista de configuración de hardware, se accederá a las propiedades del puerto Ethernet del PLC y se establecerá su dirección IP como 192.168.0.1, con máscara de subred 255.255.255.0. No será necesario configurar gateway ni servidor DNS en este sistema aislado [54, 57]. Sin embargo, se habilitará la opción "Permitir acceso vía PUT/GET" que permite la comunicación con otros PLCs Siemens, y crucialmente, se activará la interfaz Profinet configurando el parámetro TSAP (Transport Service Access Point).

El TSAP es un identificador que permite que múltiples aplicaciones en un mismo dispositivo puedan comunicarse simultáneamente a través de la red. Para un S7-1500 funcionando como servidor Profinet, el TSAP local típicamente se configura como 03.00 en hexadecimal. Este valor debe anotarse cuidadosamente ya que será necesario al configurar clientes que deseen conectarse al PLC.

A continuación se agregará el panel HMI a la configuración del proyecto. TIA Portal permite arrastrar directamente el modelo KTP 700 Basic desde el catálogo de dispositivos. Una vez agregado, se configurará su dirección IP como 192.168.0.1. La ventaja de configurar tanto el PLC como el HMI dentro del mismo proyecto TIA Portal es que el software establecerá automáticamente la conexión de comunicación entre ambos, creando las variables necesarias y configurando los parámetros de conexión sin intervención manual del programador.

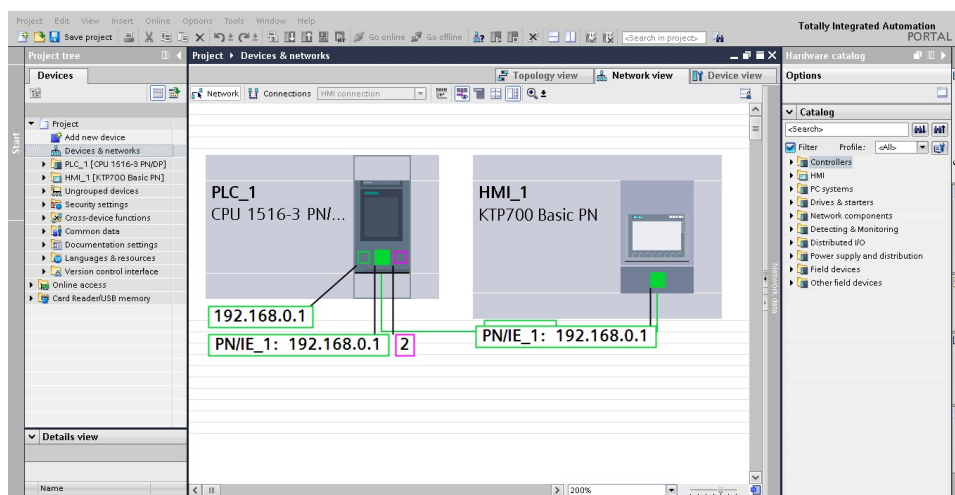


Figura 16. TIA Portal es donde se configura la IP del PLC y HMI, por J. Maridueña

Para los sensores con interfaz Profinet, si estos son de fabricantes que proporcionan archivos GSD (General Station Description), estos archivos deberán importarse primero a TIA Portal. Un archivo GSD es básicamente un descriptor que le indica a TIA Portal cómo comunicarse con un dispositivo específico, qué datos puede intercambiar y cómo deben interpretarse. Una vez importado el GSD del sensor, este aparecerá en el catálogo de dispositivos y podrá agregarse a la configuración de red arrastrándolo a la vista de topología de red.

IV-R. Desarrollo de la interfaz HMI en TIA Portal

El diseño de la interfaz de usuario mediante la cual los operadores interactuarán con el sistema requiere un balance cuidadoso entre funcionalidad, claridad visual y simplicidad de operación. Una interfaz sobrecargada de información puede resultar tan problemática como una excesivamente simple que no proporcione los datos necesarios para tomar decisiones informadas.

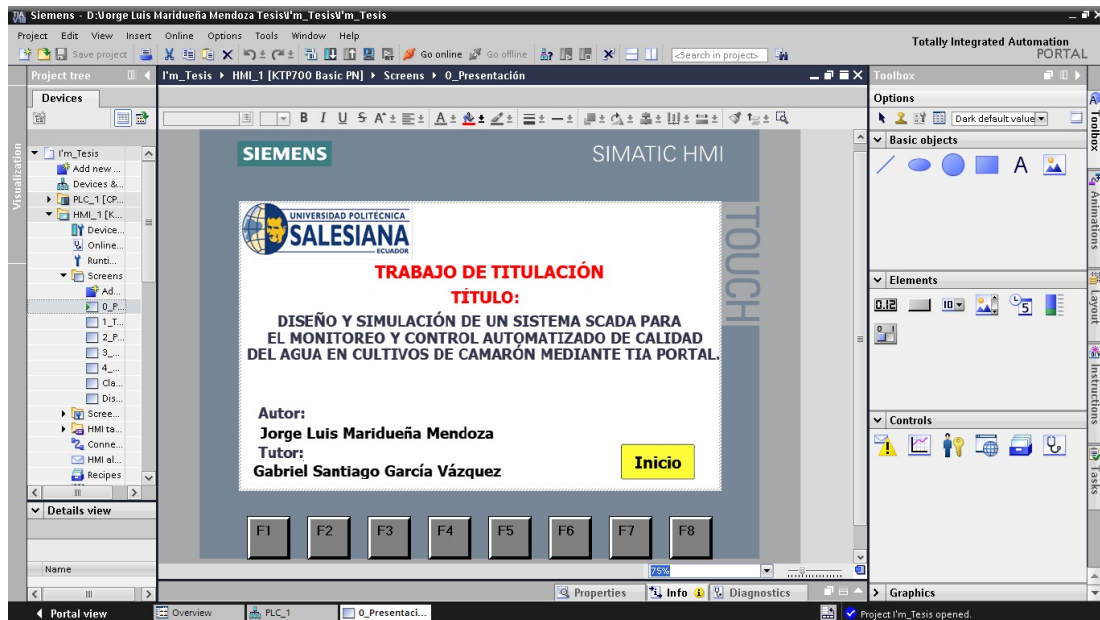


Figura 17. Diseño de la interfaz HMI en TIA Portal, por J. Maridueña

■ Estructura de pantallas

La interfaz se organizará en múltiples pantallas jerárquicas, cada una con un propósito específico y un nivel de detalle apropiado. Esta organización permitirá al operador navegar intuitivamente desde vistas generales hacia información cada vez más específica según lo requiera.

- Pantalla principal: Esta será la pantalla que se mostrará por defecto al encender el sistema o después de un período de inactividad. Representará gráficamente la piscina de cultivo mediante un diagrama esquemático donde se ubicarán los tres parámetros principales en posiciones visualmente prominentes. Cada parámetro se presentará mediante un indicador numérico de gran tamaño que mostrará el valor actual con su unidad correspondiente ($^{\circ}\text{C}$ para temperatura, unidades para pH, mg/L para oxígeno disuelto) [18, 19]. Junto a cada valor numérico se incluirá una barra gráfica horizontal coloreada que proporcionará una indicación visual rápida del estado del parámetro.

La barra se dividirá en tres zonas: verde para el rango normal, amarillo para zonas de advertencia cercanas a los límites, y rojo para condiciones de alarma. Esta codificación por colores permitirá que el operador identifique problemas de un vistazo incluso a distancia, sin necesidad de acercarse a leer los valores numéricos específicos. En la parte inferior de la pantalla se reservará espacio para un área de mensajes de estado donde se mostrarán las últimas tres alarmas o eventos del sistema, con marcas de tiempo. Esto proporcionará contexto inmediato

sobre lo que ha estado ocurriendo en el sistema sin necesidad de navegar a pantallas de historial [31, 56].

- Pantallas de detalle por parámetro: Al tocar sobre cualquiera de los tres parámetros en la pantalla principal, el sistema navegará automáticamente a una pantalla de detalle específica para ese parámetro. Estas pantallas mostrarán información extendida incluyendo: El valor actual con mayor precisión decimal que en la vista principal. Un gráfico de tendencia que muestre la evolución del parámetro durante las últimas 24 horas, permitiendo identificar patrones diurnos, tendencias ascendentes o descendentes y la efectividad de acciones correctivas previas. El valor de setpoint actualmente configurado, con la opción de modificarlo tocando sobre él, ingresando el nuevo valor mediante un teclado numérico virtual y confirmando el cambio.

Los límites superior e inferior de alarma, configurables desde esta misma pantalla por usuarios con privilegios suficientes. El estado del controlador PID asociado, indicando si está en modo automático o manual, y si está activo o en standby. Los parámetros de sintonización del PID (K_p , K_i , K_d) visibles para usuarios técnicos, aunque bloqueados para modificación excepto mediante contraseña de nivel de ingeniería. El estado del actuador correspondiente, mostrando por ejemplo el porcentaje de potencia aplicado al sistema de calefacción/enfriamiento, el caudal de dosificación química para control de pH, o la velocidad del aireador para oxígeno disuelto.

- Pantalla de configuración del sistema: Accesible únicamente mediante contraseña, esta pantalla permitirá modificar parámetros sensibles del sistema que no deberían alterarse durante la operación normal. Aquí se podrán ajustar los intervalos de muestreo de cada sensor, calibrar las entradas analógicas, modificar los parámetros de los controladores PID, configurar los destinatarios de alarmas (si el sistema incluye notificaciones por email o SMS) y establecer los horarios de alimentación automática.

Esta pantalla también incluirá funciones de diagnóstico como la visualización del estado de comunicación con cada dispositivo de campo, permitiendo identificar rápidamente sensores desconectados o con problemas de comunicación. Un indicador mostrará la carga del procesador del PLC en porcentaje, útil para detectar si el sistema está alcanzando los límites de su capacidad de procesamiento.

- Pantalla de históricos y reportes: Esta pantalla proporcionará acceso a los datos almacenados en el PLC. Se implementará mediante una tabla configurable donde el operador podrá seleccionar el rango de fechas de interés y los parámetros que desea visualizar. Los datos se presentarán tanto en formato tabular como en gráficos superpuestos que permitan comparar la evolución de múltiples variables simultáneamente. Desde esta pantalla también será posible exportar los datos a memoria USB conectada al panel HMI, generando archivos CSV que posteriormente puedan analizarse en software de oficina como Excel. Esta capacidad resultará valiosa para generar reportes de calidad del agua que documenten el cumplimiento de protocolos de producción.

■ Elementos gráficos y objetos

TIA Portal proporciona una biblioteca extensa de objetos gráficos prediseñados que aceleran el desarrollo de interfaces. Para este proyecto se utilizarán principalmente los siguientes tipos de objetos:

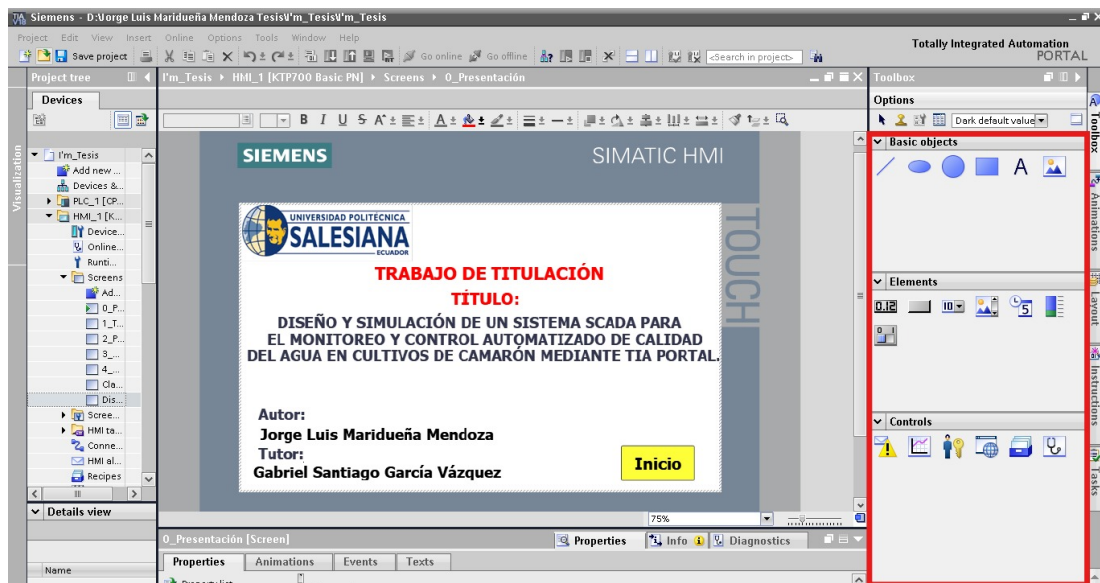


Figura 18. Herramientas que proporciona TIA Portal, por J. Maridueña

- Campos de E/S (I/O Fields): Estos objetos bidireccionales permiten tanto visualizar como modificar valores de variables del PLC. Se emplearán para mostrar los valores actuales de temperatura, pH y oxígeno, así como para permitir el ingreso de nuevos setpoints. Al configurar cada campo de E/S se especificará la variable del PLC asociada, el formato de visualización (número de decimales, unidad a mostrar) y opcionalmente límites que validen que los valores ingresados por el usuario estén dentro de rangos aceptables.

- Barras gráficas (Bar Charts): Estos elementos proporcionan representación visual del valor de una variable dentro de un rango definido. Se configurarán barras horizontales para cada parámetro, estableciendo los límites mínimo y máximo del rango completo del sensor, y definiendo los puntos donde cambia el color de verde a amarillo y de amarillo a rojo.

- Vistas de tendencia (Trend Views): Estos objetos gráficos sofisticados pueden trazar la evolución temporal de hasta ocho variables simultáneamente. Se configurará una vista de tendencia en cada pantalla de detalle, especificando el buffer de datos a utilizar (arrays en el PLC donde se almacenan los valores históricos), la ventana temporal a visualizar y los colores de cada traza.

- Botones (Buttons): Se utilizarán para navegación entre pantallas, activación manual de actuadores cuando el sistema esté en modo manual, reconocimiento de alarmas y otras acciones discretas. Cada botón se configurará para ejecutar un evento específico al ser presionado, que puede ser tan simple como cambiar de pantalla o tan complejo como ejecutar un script que modifique múltiples variables del PLC.

- Indicadores de estado (Status Indicators): Iconos o símbolos gráficos que cambian su apariencia basándose en el valor de una variable booleana del PLC. Se emplearán para mostrar el estado de bombas, válvulas, alarmas y modos de operación. Por ejemplo, un ícono de bomba podría mostrarse en verde animado cuando está en marcha, gris cuando está detenida y rojo parpadeante si hay una alarma asociada.

■ Sistema de alarmas

El sistema de alarmas se implementará en múltiples capas tanto en el PLC como en el HMI. En el programa del PLC existirá una sección dedicada a la lógica de detección de alarmas que evaluará continuamente si los parámetros monitoreados exceden sus límites establecidos o si existen condiciones de fallo en el hardware. Cuando se detecte una condición de alarma, el PLC activará variables booleanas específicas que el HMI monitoreará constantemente.

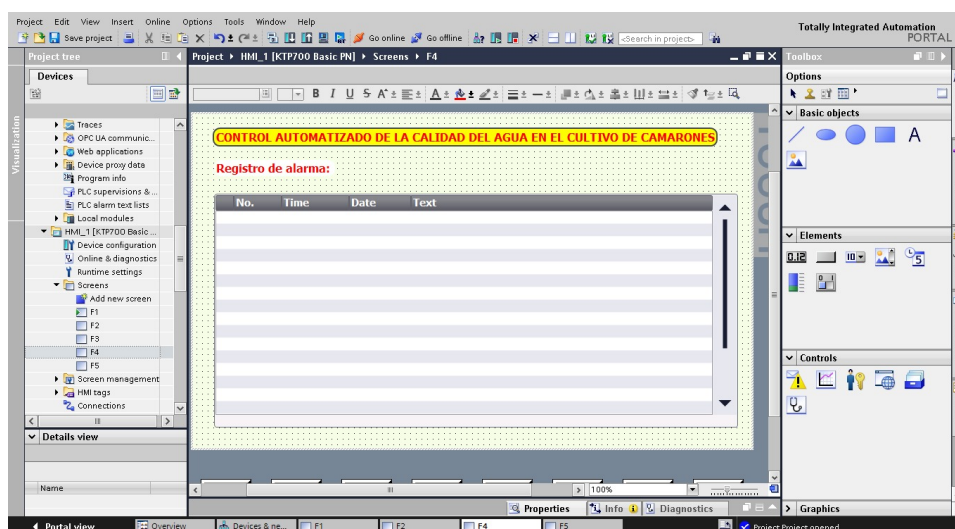


Figura 19. Se registra un historial de la alarma con fecha y hora exactas, por J. Maridueña

Al detectar una alarma activa, el HMI ejecutará varias acciones simultáneas: mostrará un mensaje emergente (popup) en el centro de la pantalla describiendo la alarma y su severidad, activará una indicación visual parpadeante en todas las pantallas, registrará el evento en el buffer de alarmas con fecha y hora exactas, y opcionalmente activará una señal sonora mediante el buzzer integrado del panel.

Las alarmas se clasificarán en tres niveles de severidad que determinarán su tratamiento:

- Alarmas críticas: Condiciones que representan riesgo inmediato para los organismos cultivados, como oxígeno disuelto por debajo de 4 mg/L o temperatura fuera del rango de 26-34°C.
- Estas alarmas requerirán reconocimiento explícito del operador y no se podrán silenciar hasta que la condición se haya corregido.
- Alarmas de advertencia: Condiciones fuera de rango óptimo pero no inmediatamente peligrosas, como pH de

7.3 (por debajo del ideal de 7.5 pero aún tolerable). Estas alarmas se mostrarán pero permitirán ser silenciadas por el operador, aunque continuarán registrándose en el historial.

- Alarmas informativas: Eventos que requieren atención pero no representan problemas de proceso, como sensores próximos a requerir calibración o niveles bajos en tanques de químicos de dosificación. Estas se mostrarán con menor prioridad visual.

El panel HMI incluirá una pantalla dedicada a alarmas que mostrará una tabla con todas las alarmas activas y un historial de las últimas 100 alarmas ocurridas, incluyendo cuándo se activaron, cuándo fueron reconocidas y cuándo se resolvieron. Esta información será invaluable para análisis post-evento y mejora continua del proceso.

IV-S. Validación mediante simulación en PLCSIM

Antes de implementar el sistema en hardware real, se realizará una validación exhaustiva mediante simulación utilizando las herramientas integradas en TIA Portal [42, 54]. Esta etapa de validación virtual permitirá detectar y corregir errores de programación, ajustar parámetros de control y verificar el comportamiento del sistema ante diversas situaciones operativas sin riesgo de dañar equipos o afectar la producción.

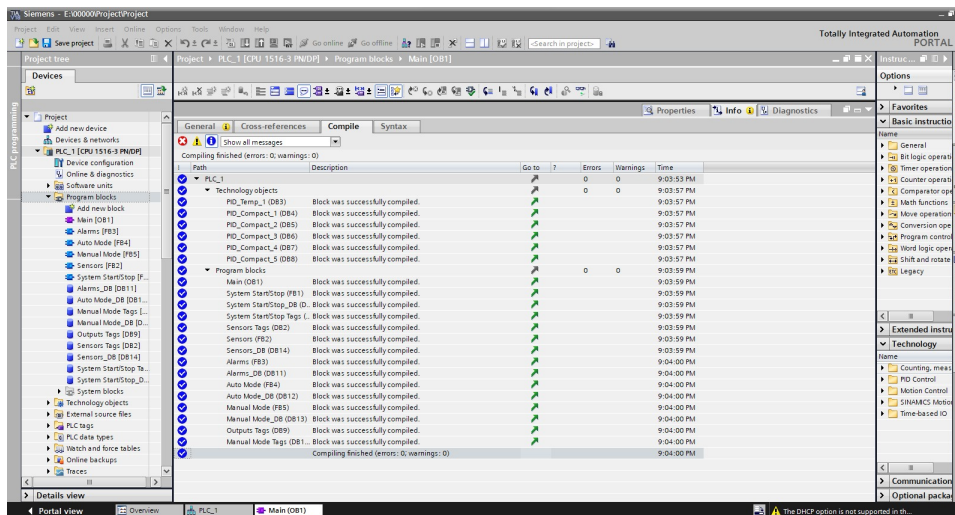


Figura 20. Se realizará una validación exhaustiva mediante simulación utilizando las herramientas integradas en TIA Portal, por J. Maridueña

■ Configuración del entorno de simulación

TIA Portal incluye PLCSIM, un simulador software que emula el funcionamiento del hardware del PLC en una computadora. Este simulador ejecuta el mismo código que correría en el PLC real, permitiendo probar la lógica de control de forma realista. Para configurar la simulación, una vez completada la programación del PLC en TIA Portal, se procederá a cargar el programa no al PLC físico sino a una instancia de PLCSIM. El simulador creará una representación virtual del S7-1500 con todas sus entradas y salidas.

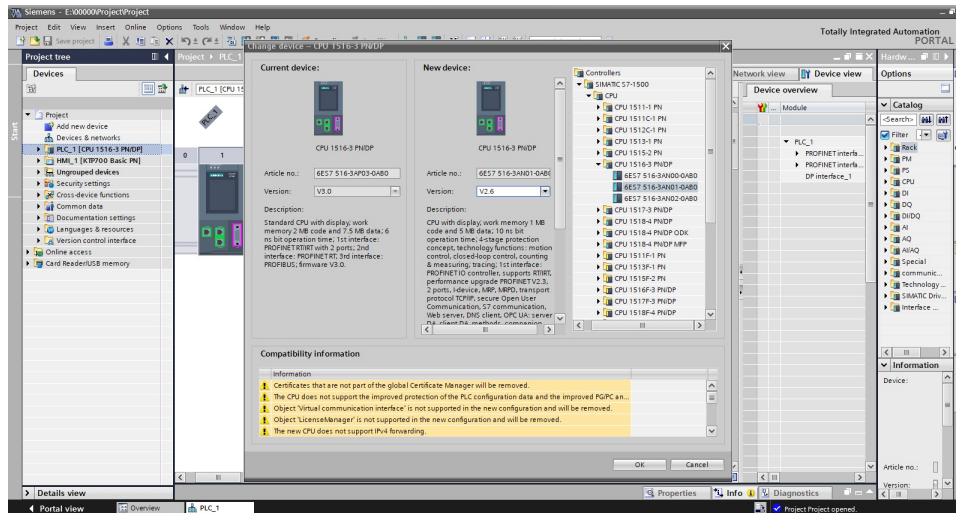


Figura 21. TIA Portal cuando se carga al PLC físico se verifica que la IP sean iguales para la configuración del simulador, por J. Maridueña

Durante la simulación será posible forzar valores en las entradas analógicas para simular las lecturas de los sensores, y observar cómo responden las salidas del controlador. También se podrá conectar el panel HMI real o simulado a esta instancia virtual del PLC, permitiendo probar completamente la interfaz de usuario y su interacción con la lógica de control. Para simular el comportamiento de los sensores de forma más realista, se desarrollarán pequeños programas en SCL (lenguaje de texto estructurado de TIA Portal) que generarán valores variables que emulen lecturas reales.

Por ejemplo, para simular la temperatura se puede crear una variable que oscile lentamente alrededor de 30°C con pequeñas perturbaciones aleatorias, representando las fluctuaciones naturales que ocurrirían en una piscina real. Cuando el controlador PID active el sistema de calentamiento (salida digital ON), la temperatura simulada puede programarse para incrementar gradualmente, y viceversa.

■ Escenarios de prueba

La validación se estructurará mediante una serie de escenarios de prueba progresivos que evaluarán diferentes aspectos del sistema:

- Prueba 1 - Lectura y escalado de sensores:

Se verificará que los valores simulados de los sensores se lean correctamente, se escalen apropiadamente a las unidades de ingeniería y se visualicen en el HMI. Se probará el rango completo de cada sensor, desde su límite mínimo hasta el máximo, confirmando que no existan problemas de saturación o errores de conversión.

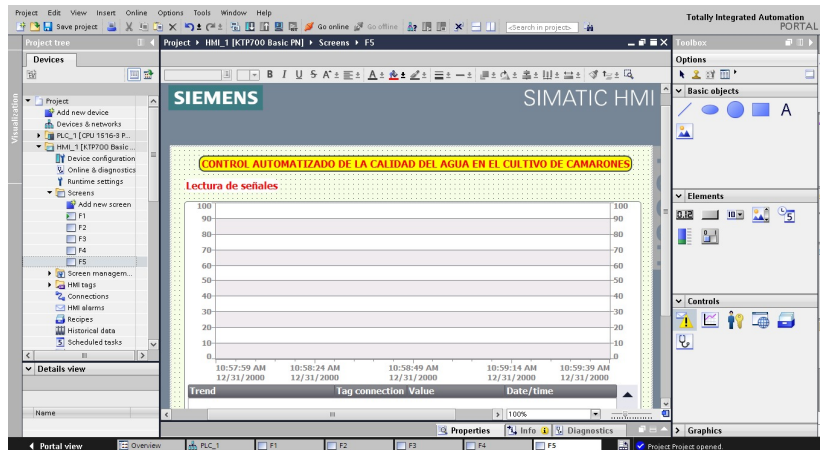


Figura 22. Se visualiza una lectura en el HMI, por J. Maridueña

- Prueba 2 - Detección de alarmas:

Se forzarán los valores de los sensores fuera de sus rangos normales y se verificará que el sistema detecte correctamente las condiciones de alarma, active las indicaciones visuales y sonoras en el HMI, y registre los eventos en el historial con marcas de tiempo correctas.

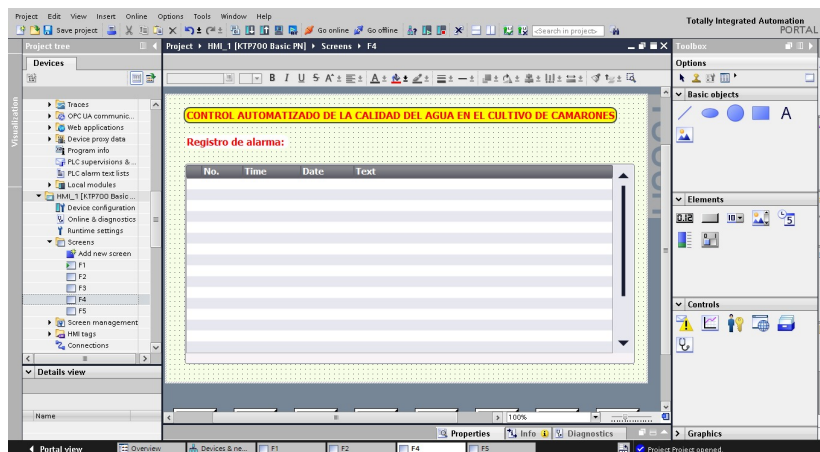


Figura 23. Registro de eventos en el historia de alarma en HMI, por J. Maridueña

- Prueba 3 - Control manual:

Se operará el sistema en modo manual, activando y desactivando actuadores mediante la interfaz HMI y verificando que las salidas del PLC respondan correctamente. Esta prueba confirmará que es posible operar el sistema manualmente en caso de que el modo automático requiera deshabilitarse temporalmente.

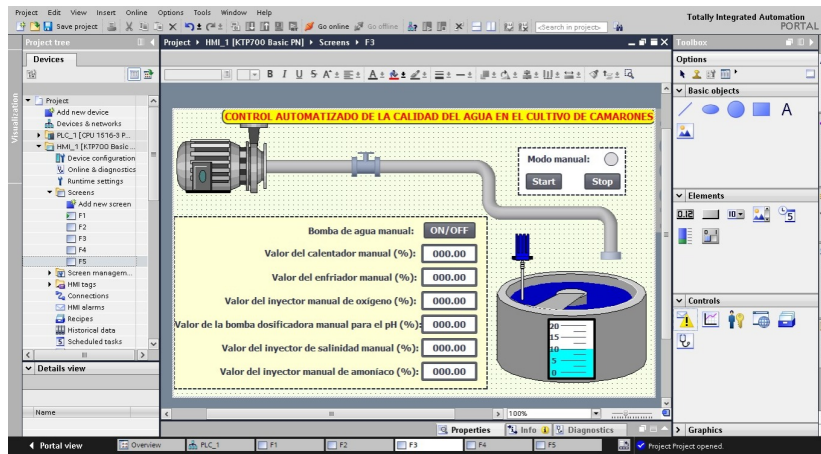


Figura 24. Sistema de modo manual mediante HMI, por J. Maridueña

- Prueba 4 - Control automático PID:

Se habilitará el modo automático y se observará cómo los controladores PID responden ante desviaciones del setpoint. Se registrarán las curvas de respuesta del sistema, evaluando parámetros como el tiempo de establecimiento, el sobrepaso máximo y la estabilidad en estado estacionario. Basándose en estos resultados se ajustarán los parámetros K_p , K_i y K_d hasta lograr un desempeño satisfactorio.

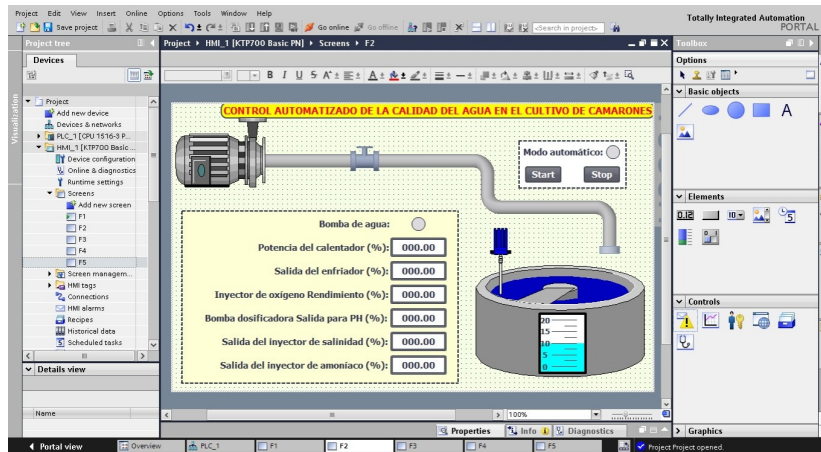


Figura 25. Sistema de modo automatico mediante HMI, por J. Maridueña

- Prueba 5 - Respuesta ante fallas:

Se simularán condiciones de fallo como pérdida de comunicación con un sensor (forzando su valor a 0 o al máximo), desconexión del panel HMI, o fallos en actuadores. Se verificará que el sistema detecte estas condiciones anómalas, active alarmas apropiadas y entre en modo seguro si corresponde, evitando acciones de control basadas en información errónea.

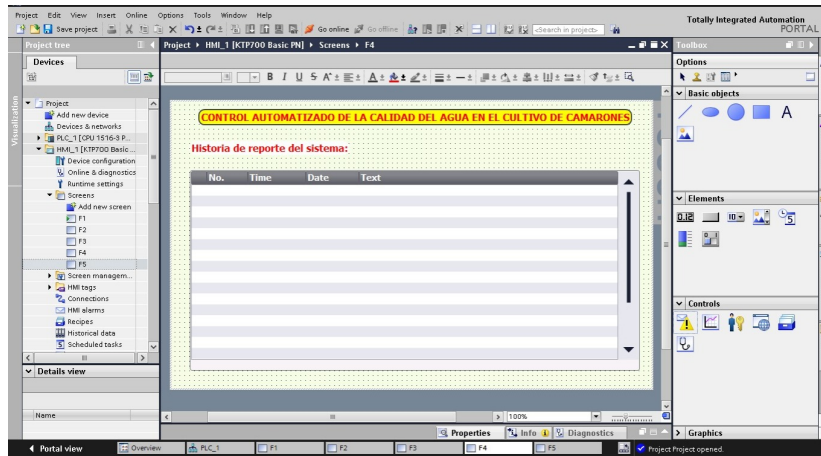


Figura 26. Se visualiza fallo y se registra en un historial en el HMI, por J. Maridueña

- Prueba 6 - Operación continua extendida:

Se dejará el sistema operando en modo simulación durante 24-48 horas continuas, monitoreando su estabilidad a largo plazo, verificando que no existan fugas de memoria, errores acumulativos o comportamientos inesperados que solo se manifiesten después de períodos prolongados de operación.

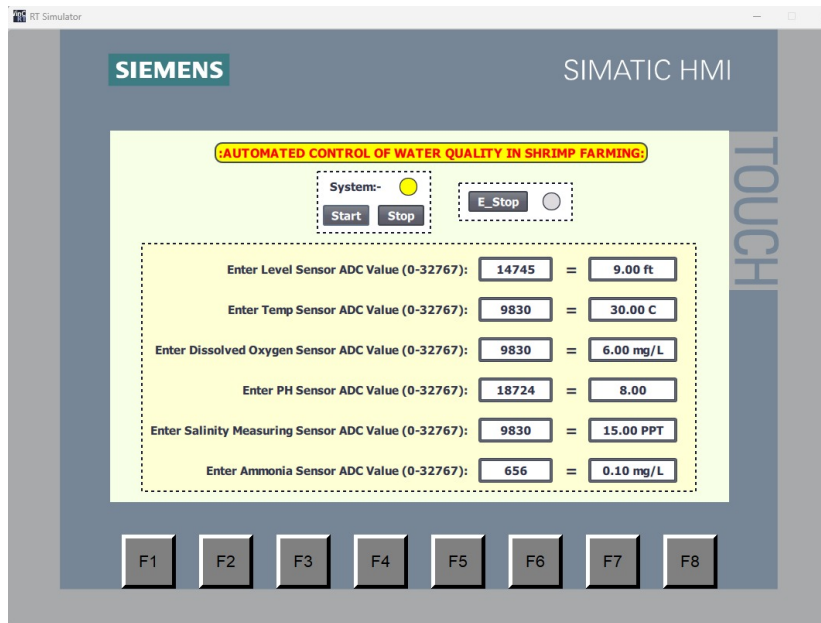


Figura 27. Se visualiza operación continua extendida en el HMI, por J. Maridueña

V. RESULTADO DE LA SIMULACIÓN EN EL TIA PORTAL V18

■ RONDA 1 – Operación NORMAL (estable, sin anomalías)

1. Condición inicial del sistema

Los parámetros del agua se mantienen dentro de los rangos óptimos para el cultivo de camarón, sin desviaciones significativas respecto a los valores de referencia configurados en el PLC.

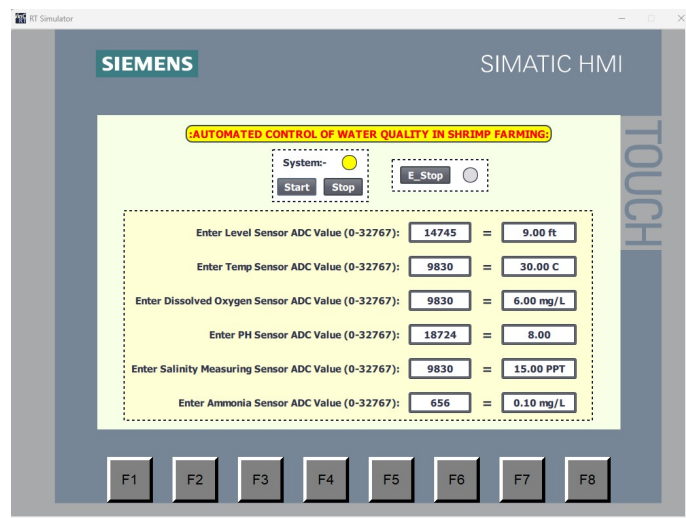


Figura 28. Los parámetros asignados para el funcionamiento del HMI (Ronda 1), por J. Maridueña

2. Comportamiento del sistema SCADA

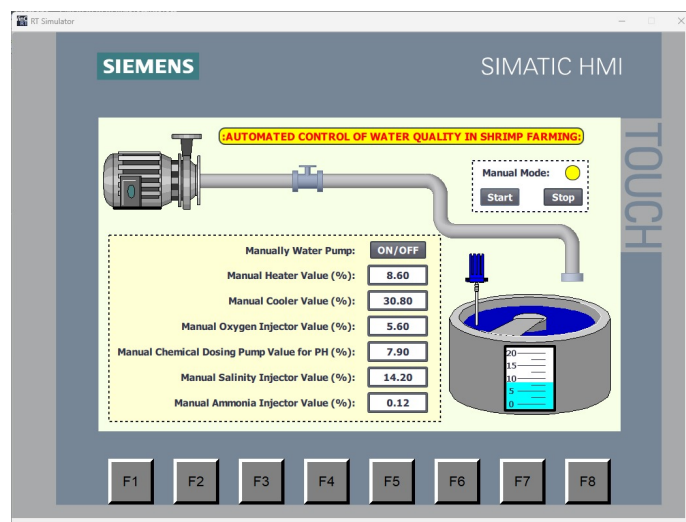


Figura 29. Comportamiento del sistema SCADA luego de asigna le los valores (Ronda 1), por J. Maridueña

- El PLC compara las variables con sus setpoints.
- No se detectan errores significativos.
- Los actuadores permanecen prácticamente inactivos.
- El sistema solo mantiene la circulación básica del agua.

3. Pantalla de tendencias (Lectura de señales)

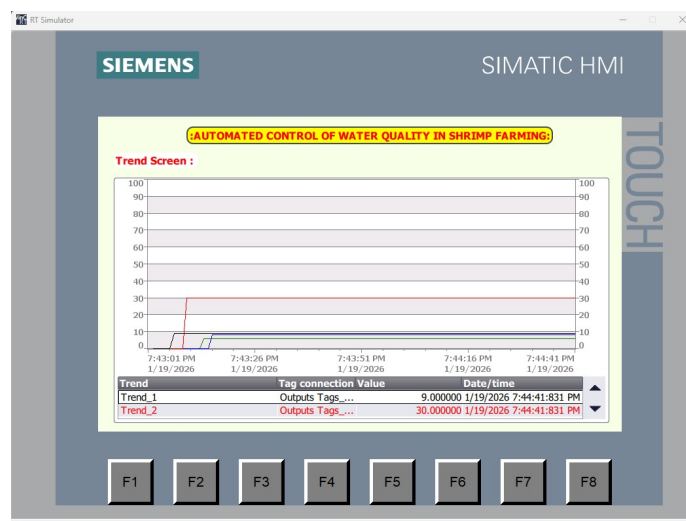


Figura 30. Se puede visualizar el comportamiento a través de la lectura de señales (Ronda 1), por J. Maridueña

- Las curvas se observan planas y estables.
- No existen picos ni fluctuaciones bruscas.
- Confirmación visual de estado estacionario.

4. Registro de alarmas (Historial de reporte)

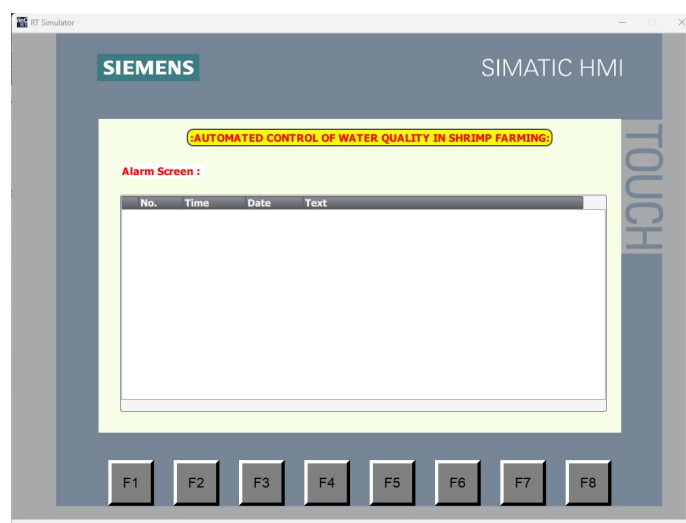


Figura 31. Se puede visualizar el historial de reporte (Ronda 1), por J. Maridueña

- No se registra ninguna alarma.
- El historial permanece vacío.

5. Reporte técnico (para el informe)

Durante la primera ronda de simulación, el sistema SCADA operó en condiciones normales y estables. Todas las variables monitoreadas se mantuvieron dentro de los rangos establecidos, por lo que no fue necesaria la activación de mecanismos correctivos ni la generación de alarmas. El comportamiento observado confirma el correcto funcionamiento del sistema en estado estacionario.

■ RONDA 2 – Operación normal con corrección automática (estable, con anomalías leves)

1. Condición inicial del sistema

Se introducen pequeñas desviaciones, aún dentro de límites seguros, simulando variaciones naturales del entorno.

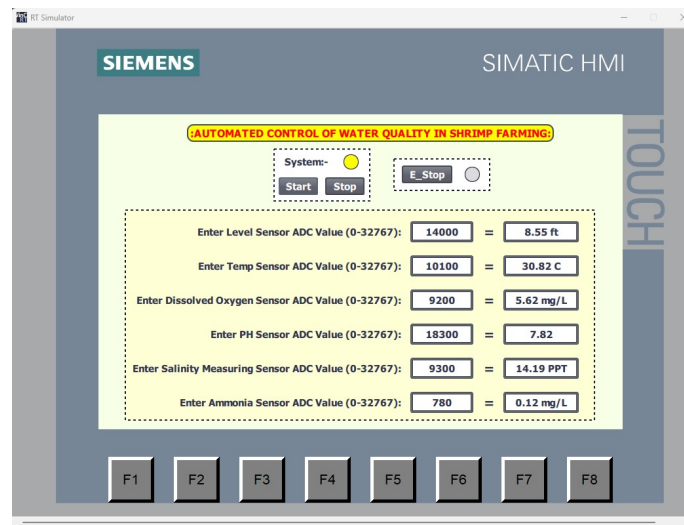


Figura 32. Los parámetros asignados para el funcionamiento del HMI (Ronda 2), por J.Maridueña

2. Comportamiento del sistema SCADA

- El PLC detecta desviaciones leves.
- Se activan actuadores en porcentajes bajos.
- No se alcanza condición de alarma.
- El sistema corrige de forma preventiva.

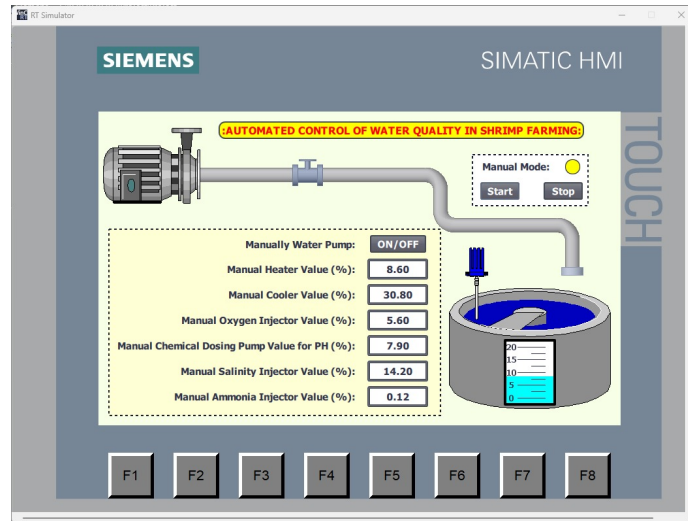


Figura 33. Comportamiento del sistema SCADA luego de asigna le los valores (Ronda 2), por J. Maridueña

3. Pantalla de tendencias (Lectura de señales)

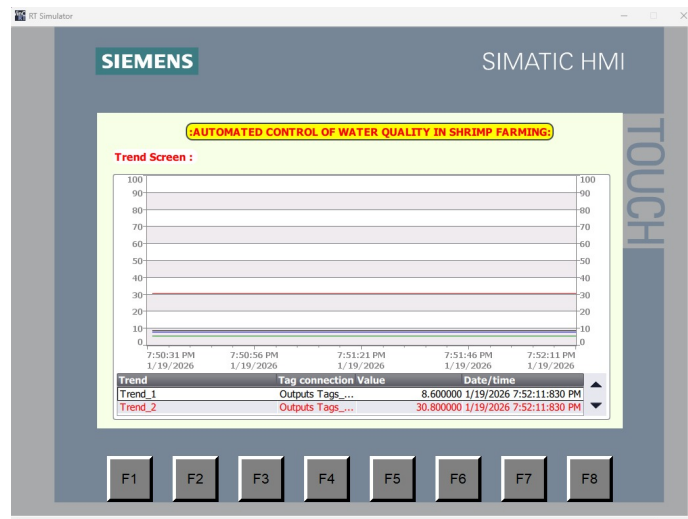


Figura 34. Se puede visualizar el comportamiento a través de la lectura de señales (Ronda 2), por J. Maridueña

- Se observan pequeñas pendientes en las curvas.
- Las variables regresan progresivamente a su valor nominal.
- Evidencia clara de control automático activo.

4. Registro de alarmas (Historial de reporte)

- No se generan alarmas críticas.
- En algunos casos puede aparecer advertencia leve (si está configurada).

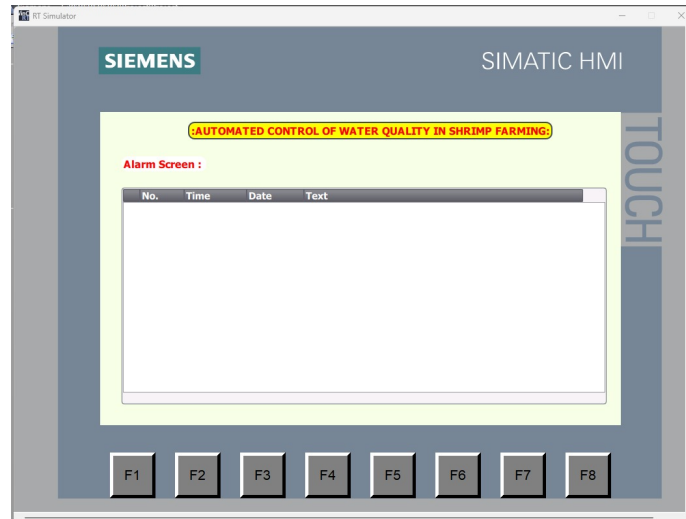


Figura 35. Se puede visualizar el historial de reporte (Ronda 2), por J. Maridueña

5. Reporte técnico

En la segunda ronda se simularon variaciones normales propias del entorno acuícola. El sistema SCADA respondió mediante ajustes automáticos de baja magnitud, manteniendo las variables dentro de rangos aceptables. Este comportamiento demuestra la capacidad del sistema para realizar correcciones preventivas sin comprometer la estabilidad del cultivo.

■ RONDA 3 – Operación NO APTA (condición crítica)

1. Condición inicial del sistema

Se simula una condición adversa severa que pone en riesgo la supervivencia del camarón.

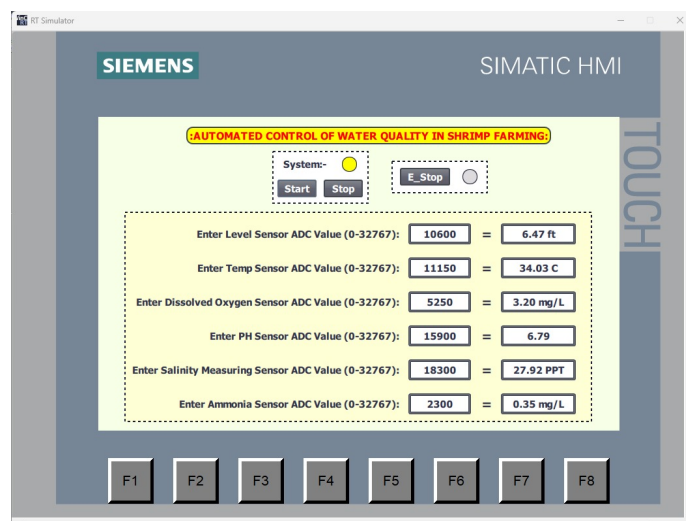


Figura 36. Los parámetros asignados para el funcionamiento del HMI (Ronda 3), por J. Maridueña

2. Comportamiento del sistema SCADA

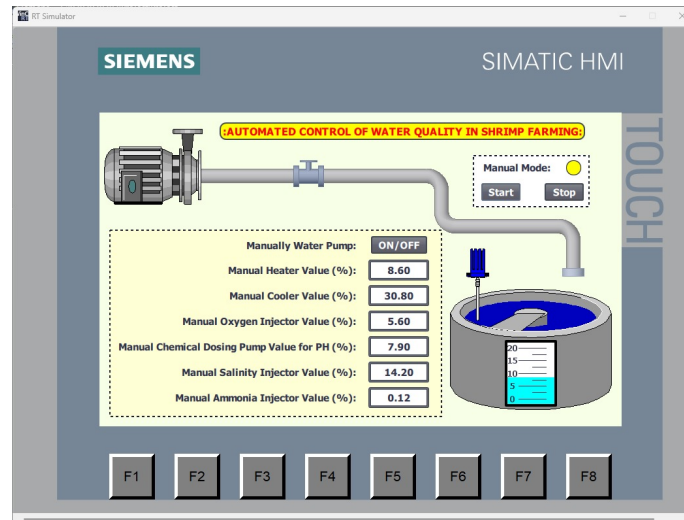


Figura 37. Comportamiento del sistema SCADA luego de asigna le los valores (Ronda 3), por J. Maridueña

- El PLC identifica múltiples variables fuera de rango.
- Se activan actuadores en altos porcentajes.
- El sistema entra en estado de control correctivo agresivo.
- Se prioriza oxigenación y corrección química.

3. Pantalla de tendencias

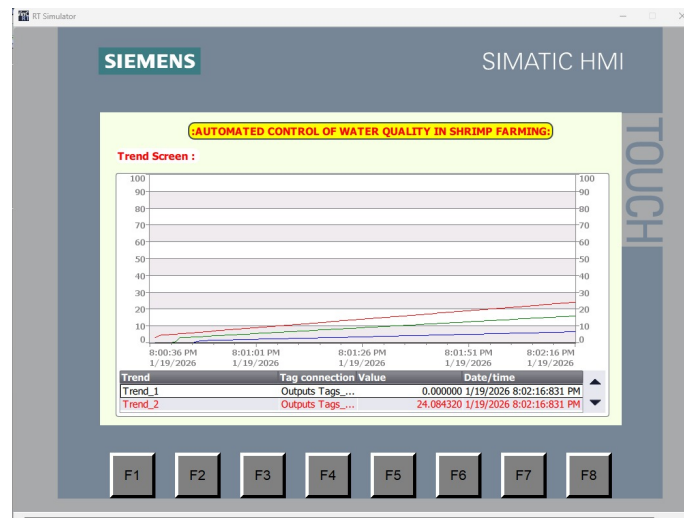


Figura 38. Se puede visualizar el comportamiento a través de la lectura de señales (Ronda 3), por J. Maridueña

- Curvas con cambios abruptos.
- Tendencias descendentes/ascendentes marcadas.
- Evidencia de condición inestable.

4. Registro de alarmas

Se generan múltiples alarmas, por ejemplo:

- Oxígeno disuelto crítico
- Amoníaco en nivel tóxico
- Temperatura fuera de rango
- Calidad de agua no apta para cultivo

Las alarmas quedan registradas con fecha y hora.

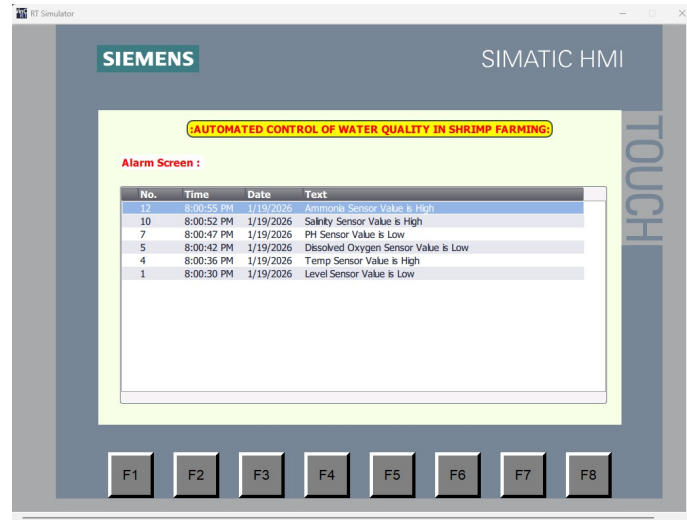


Figura 39. Se puede visualizar el historial de reporte con fecha y hora (Ronda 3), por J. Maridueña

5. Reporte técnico

En la tercera ronda de simulación se reprodujo una condición no apta para el cultivo de camarón. El sistema SCADA detectó valores críticos y activó automáticamente los mecanismos de corrección, además de generar alarmas visuales para alertar al operador. Esta ronda evidencia la importancia del monitoreo continuo y la respuesta automática para prevenir pérdidas productivas.

- Paro de Emergencia (Emergency Stop – E-STOP)

El paro de emergencia es un dispositivo de seguridad de acción inmediata cuya función principal es detener de forma rápida y segura la operación de un sistema o proceso industrial ante una situación de riesgo, con el fin de proteger la integridad del personal, los equipos y el entorno.

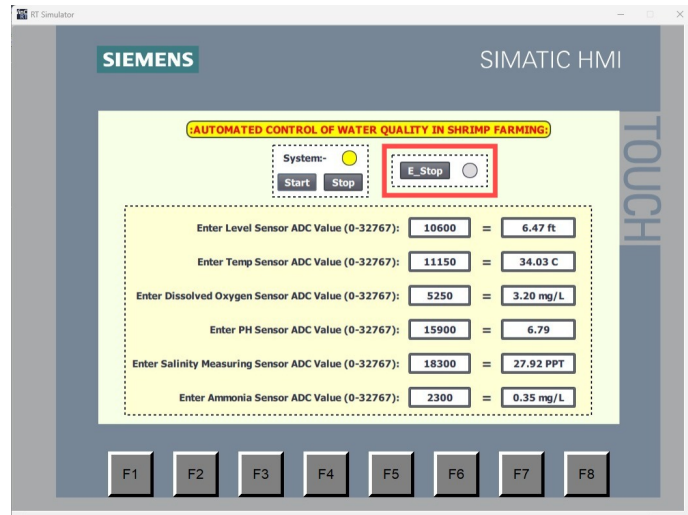


Figura 40. El Paro de Emergencia anulando cualquier orden de operación del sistema, por J. Maridueña

Este mecanismo actúa independientemente del control automático o manual, anulando cualquier orden de operación del sistema y llevando al proceso a un estado seguro predefinido. Generalmente se implementa mediante un pulsador tipo hongo de color rojo, con retención mecánica, que requiere una acción manual para su rearme, evitando reinicios accidentales.

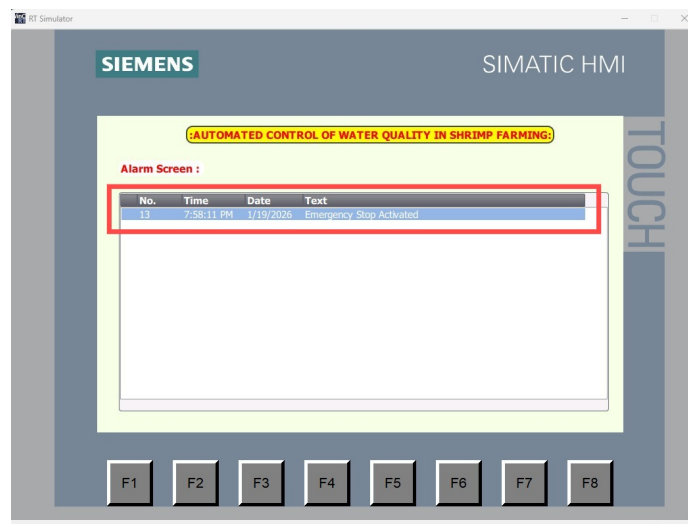


Figura 41. Se puede visualizar el historial de reporte con fecha y hora del paro de emergencia (Ronda 3), por J. Maridueña

VI. METODOLOGÍA

El desarrollo de este sistema automatizado de monitoreo y control para camaroneras se llevará a cabo siguiendo una metodología estructurada que combinará aspectos de ingeniería de control, programación de PLC y diseño de interfaces industriales. La elección de TIA Portal como plataforma principal responde a su amplia aceptación en la industria y a las capacidades robustas que ofrece para la simulación de procesos antes de su implementación física. Este enfoque permitirá reducir significativamente los riesgos técnicos y económicos que implicaría desarrollar el sistema directamente en campo, donde cualquier error podría ocasionar pérdidas considerables en la producción.

La metodología se organizará en etapas secuenciales que irán desde la conceptualización del problema hasta la validación final del sistema mediante pruebas exhaustivas. Cada etapa será diseñada para garantizar que el sistema cumpla con los requerimientos técnicos establecidos y que pueda responder adecuadamente ante las condiciones variables que caracterizan el cultivo intensivo de camarón.

Este trabajo se enmarca dentro de la investigación aplicada con un fuerte componente experimental. A diferencia de la investigación básica que busca generar conocimiento teórico, aquí el objetivo será resolver un problema concreto que enfrenta la industria camaronera ecuatoriana: la falta de sistemas automatizados que permitan mantener condiciones óptimas de cultivo de manera continua y sin intervención humana constante. El enfoque adoptado será predominantemente cuantitativo, ya que se centrará en la medición precisa de variables físicas y químicas del agua, el análisis de su comportamiento temporal y la evaluación numérica del desempeño de los algoritmos de control implementados. Sin embargo, también incorporará elementos cualitativos al momento de evaluar la usabilidad de la interfaz HMI y la pertinencia de las decisiones de diseño tomadas durante el desarrollo.

La decisión de trabajar mediante simulación virtual antes de implementar el sistema en campo responde a una estrategia de desarrollo incremental que permitirá detectar y corregir errores en etapas tempranas del proyecto. TIA Portal ofrece un entorno de simulación suficientemente realista como para evaluar el comportamiento del sistema de control bajo diversas condiciones operativas, lo cual resultará fundamental para garantizar su confiabilidad una vez que sea implementado en una camaronera real.

VI-A. *Diseño del sistema de control automatizado*

El sistema propuesto se fundamentará en una arquitectura de control distribuido que separará claramente las funciones de adquisición de datos, procesamiento y control, supervisión e interacción con el operador. Esta separación no solo facilitará el desarrollo y mantenimiento del sistema, sino que también mejorará su confiabilidad al evitar que fallos en un subsistema comprometan la operación de los demás. En el núcleo del sistema se encontrará el PLC, que actuará como cerebro de todo el proceso. Este controlador se encargará de leer continuamente los valores de temperatura, pH y oxígeno disuelto desde los sensores, procesarlos mediante algoritmos de control PID y enviar las señales de comando correspondientes a los actuadores que regularán cada parámetro. La selección del modelo específico de PLC (S7-1200 o S7-1500) dependerá de la escala del sistema y de los requerimientos de velocidad de procesamiento, aunque para efectos de esta simulación ambos modelos ofrecen capacidades más que suficientes.

Los sensores virtuales configurados en TIA Portal emularán el comportamiento de instrumentos industriales reales. Para la temperatura se considerará el uso de termopares tipo K o RTD PT100, que son estándares en aplicaciones

acuícolas por su buena relación costo-beneficio y confiabilidad. El sensor de pH se representará mediante un electrodo de vidrio con compensación automática de temperatura, característica indispensable ya que las mediciones de pH son altamente sensibles a cambios térmicos. Para el oxígeno disuelto se optará por simular sensores ópticos en lugar de los tradicionales polarográficos, debido a que los primeros requieren menor mantenimiento y ofrecen mayor estabilidad a largo plazo. La frecuencia con la que el sistema leerá los sensores no será arbitraria, sino que estará determinada por la dinámica de cada variable y su criticidad para la supervivencia del camarón. El oxígeno disuelto se muestreará cada 30 segundos porque es el parámetro que puede cambiar más rápidamente y con consecuencias más graves si desciende por debajo de niveles críticos. La temperatura se leerá cada minuto, ya que sus cambios son más lentos debido a la alta inercia térmica del agua. El pH se monitoreará cada 2 minutos, considerando que sus variaciones en sistemas acuícolas bien manejados tienden a ser graduales, a menos que ocurran eventos extraordinarios como floraciones algales masivas o aportes químicos accidentales.

VI-B. Diseño e implementación de controladores PID

El corazón del sistema de control automático estará constituido por tres lazos PID independientes, cada uno dedicado a mantener un parámetro específico dentro de su rango óptimo. La elección de controladores PID responde a que este tipo de control es ampliamente utilizado en la industria por su efectividad, robustez y relativa simplicidad de implementación. Aunque existen estrategias de control más sofisticadas, como el control predictivo o el control difuso, el PID ofrece un equilibrio ideal entre desempeño y complejidad para esta aplicación. El controlador de temperatura regulará dispositivos de calefacción o enfriamiento según sea necesario para mantener el agua entre 28 y 32°C, que es el rango donde la mayoría de las especies de camarón comerciales presentan tasas de crecimiento óptimas y mejor conversión alimenticia. Durante la simulación, estos dispositivos se representarán mediante actuadores virtuales cuya potencia será modulada por la salida del PID.

En una implementación real, esto podría traducirse en resistencias eléctricas sumergidas para calentamiento o sistemas de recirculación con intercambiadores de calor para enfriamiento. El controlador de pH tendrá la tarea de mantener el agua dentro del rango de 7.5 a 8.5, considerado ideal para el cultivo de camarón. Para lograr esto, el sistema podrá dosificar sustancias alcalinizantes como bicarbonato de sodio cuando el pH tienda a descender, o ácidos débiles cuando el pH se eleve excesivamente. La dosificación se realizará de forma progresiva y controlada para evitar cambios bruscos que podrían estresar a los organismos. El algoritmo PID calculará la cantidad exacta de químico a añadir basándose no solo en qué tan lejos está el pH del valor deseado, sino también en qué tan rápido está cambiando.

El controlador de oxígeno disuelto será quizás el más crítico de los tres, ya que niveles inadecuados de oxígeno pueden causar mortalidades masivas en cuestión de horas. Este controlador regulará el sistema de aireación mecánica, típicamente compuesto por aireadores de paleta o sopladores que inyectan aire al agua. El objetivo será mantener la concentración de oxígeno por encima de 5 mg/L en todo momento, aunque idealmente debería estar entre 5 y 7 mg/L para maximizar el bienestar de los camarones sin incurrir en gastos energéticos innecesarios.

La sintonización de los parámetros del PID (las constantes proporcional K_p , integral K_i y derivativa K_d) se realizará mediante el método de Ziegler-Nichols con modificaciones basadas en pruebas empíricas dentro del

entorno de simulación. Este método partirá de aumentar gradualmente la ganancia proporcional hasta que el sistema comience a oscilar de manera sostenida, punto a partir del cual se calcularán las tres constantes siguiendo reglas establecidas. Sin embargo, estos valores iniciales requerirán ajustes finos para optimizar el desempeño del sistema y minimizar el sobrepaso, el tiempo de establecimiento y las oscilaciones residuales.

VI-C. Programación y configuración en TIA Portal

La implementación del sistema de control se llevará a cabo utilizando TIA Portal como entorno integrado de desarrollo. Este software permitirá programar la lógica del PLC, configurar las interfaces de comunicación, diseñar la interfaz HMI y realizar simulaciones completas del sistema antes de su despliegue en campo. La programación del PLC se realizará principalmente en lenguaje Ladder (LAD), aunque para ciertas funciones matemáticas complejas se utilizará también lenguaje de bloques de funciones (FBD) o texto estructurado (SCL). Esta combinación de lenguajes permitirá aprovechar las fortalezas de cada uno: Ladder para la lógica de control secuencial y el manejo de alarmas, FBD para los algoritmos PID, y SCL para cálculos matemáticos avanzados.

Se crearán bloques de función independientes para cada controlador PID, lo que facilitará su reutilización y mantenimiento. Cada bloque incluirá la lógica de control, los límites de seguridad, el manejo de errores y las interfaces de comunicación con la HMI. La modularización del código permitirá también realizar pruebas unitarias de cada componente antes de integrarlos en el sistema completo. La configuración de los sensores virtuales se realizará definiendo sus rangos de operación, resolución y características dinámicas. Se simularán también las no linealidades y retardos típicos de los sensores reales para que la simulación sea lo más representativa posible de las condiciones de campo.

A continuación se presentarán el diagrama de flujo que representarán la lógica operativa completa del sistema. El primer diagrama ilustrará el ciclo principal de monitoreo y control de los tres parámetros críticos: temperatura, pH y oxígeno disuelto. Aquí se observará cómo el sistema evaluará continuamente cada variable y ejecutará las acciones correctivas necesarias cuando detecte desviaciones respecto a los rangos establecidos. Las alarmas se activarán inmediatamente ante cualquier anomalía, y los controladores PID calcularán las señales de comando apropiadas para los actuadores que regularán cada parámetro.

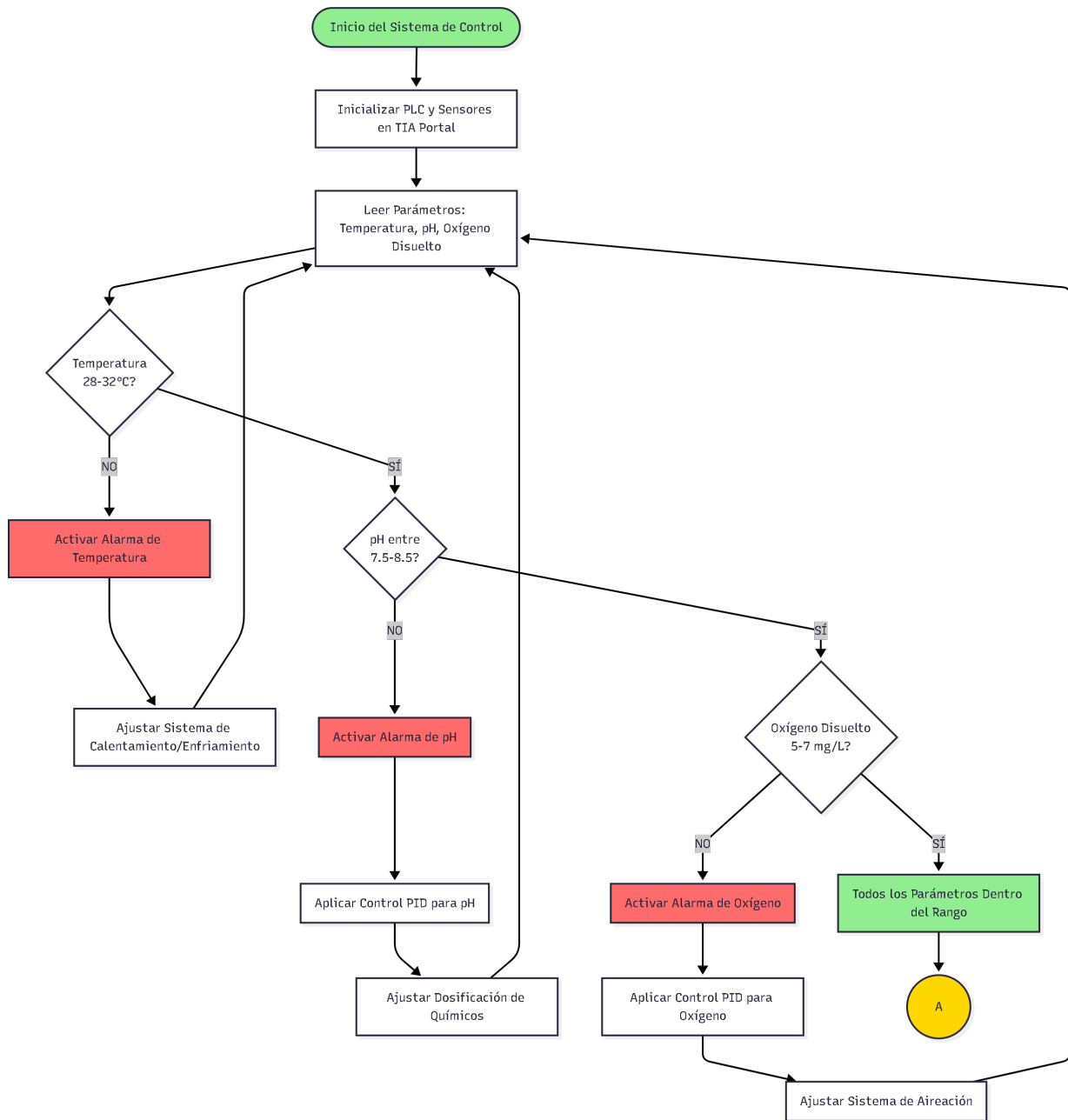


Figura 42. Diagrama de flujo del proceso principal de monitoreo y control de parámetros críticos, por J. Maridueña

VI-D. Desarrollo de la interfaz HMI

La interfaz se diseñará pensando en que será utilizada por operadores con diversos niveles de experiencia técnica, desde personal altamente capacitado hasta trabajadores con conocimientos básicos de computación. Por esta razón, se priorizará la claridad visual, la organización lógica de la información y el uso de elementos gráficos intuitivos que faciliten la interpretación rápida del estado del sistema.

La pantalla principal presentará un sinóptico de la piscina de cultivo donde se visualizarán simultáneamente los tres parámetros críticos mediante indicadores numéricos de gran tamaño acompañados de barras de color que

indicarán visualmente si el valor está dentro del rango normal (verde), en zona de advertencia (amarillo) o en condición de alarma (rojo). Esta codificación por colores seguirá estándares industriales ampliamente reconocidos y permitirá que el operador identifique problemas de un vistazo sin necesidad de leer valores numéricos específicos.

Debajo de los indicadores principales se incluirán gráficos de tendencia que mostrarán la evolución de cada parámetro durante las últimas 24 horas.

Estos gráficos serán fundamentales para que el operador pueda identificar patrones de comportamiento, anticipar problemas potenciales y evaluar la efectividad de las acciones correctivas implementadas. Por ejemplo, si el oxígeno disuelto muestra una tendencia decreciente sostenida a lo largo de varios días, esto podría indicar un aumento en la biomasa de camarones o un incremento en la carga orgánica del agua que requiere atención.

Las pantallas de detalle para cada parámetro ofrecerán información más completa: valor actual con precisión decimal, setpoint configurado, límites superior e inferior de alarma, estado del controlador PID (manual o automático), valores de las constantes PID activas y un gráfico de tendencia extendido que podrá mostrar datos de varios días o semanas. Desde estas pantallas el operador podrá modificar el setpoint si lo considera necesario, aunque el sistema solicitará confirmación antes de aplicar cambios que podrían afectar significativamente las condiciones de cultivo.

La pantalla de configuración y diagnóstico estará protegida con contraseña para evitar modificaciones accidentales por personal no autorizado. Aquí se podrán ajustar parámetros más sensibles como las constantes del PID, los límites de activación de alarmas y los intervalos de muestreo de los sensores. También se incluirá un visor de historial de eventos que registrará todas las alarmas activadas, los cambios de setpoint realizados y las intervenciones manuales del operador, creando así una trazabilidad completa de la operación del sistema.

VI-E. Lógica de control y secuencia operativa

La lógica de control implementada en el PLC seguirá una estructura cíclica que garantizará la supervisión continua de todos los parámetros y la respuesta inmediata ante cualquier desviación detectada. Esta lógica estará representada en los diagramas de flujo que se presentarán más adelante y que constituirán el mapa operativo completo del sistema.

El ciclo comenzará con la inicialización del sistema, donde se verificará la comunicación con todos los sensores y actuadores, se cargarán los parámetros de configuración desde la memoria del PLC y se establecerá la conexión con la interfaz HMI. Esta fase de arranque será crítica porque cualquier componente que no responda correctamente será identificado y reportado al operador antes de iniciar el control automático, evitando así que el sistema opere con información incompleta o errónea.

Una vez inicializado, el sistema entrará en el ciclo principal de lectura de parámetros. Los valores de temperatura, pH y oxígeno disuelto se capturarán casi simultáneamente desde los sensores, se filtrarán para eliminar ruido eléctrico o lecturas espurias y se escalarán a las unidades de ingeniería correspondientes (°C, unidades de pH y mg/L respectivamente). Este procesamiento previo de las señales será fundamental para garantizar que los controladores PID trabajen con información confiable.

Para cada parámetro, el sistema ejecutará una evaluación condicional que comparará el valor medido contra los límites establecidos. Si la temperatura está fuera del rango de 28-32°C, se activará inmediatamente la alarma visual

y sonora correspondiente en el HMI, y el controlador PID calculará la acción correctiva necesaria. El sistema de calentamiento o enfriamiento se ajustará proporcionalmente al error detectado: pequeñas desviaciones producirán correcciones suaves, mientras que desviaciones grandes generarán acciones más enérgicas pero siempre controladas para evitar sobrepasarse y generar oscilaciones.

El control de pH seguirá una lógica similar pero con consideraciones especiales debido a la naturaleza logarítmica de esta escala. Una variación de 0.5 unidades de pH puede representar un cambio significativo en la concentración de iones hidrógeno, por lo que el controlador estará configurado para actuar con particular precaución cuando se acerque a los límites del rango permitido. La dosificación de químicos se realizará mediante bombas dosificadoras cuyo tiempo de activación será determinado por el PID, permitiendo ajustes muy finos en la cantidad de sustancia añadida.

El oxígeno disuelto recibirá tratamiento prioritario en la lógica de control. Si el sistema detecta que la concentración desciende por debajo de 5 mg/L, no solo activará la alarma sino que inmediatamente pondrá en marcha los equipos de aireación a máxima capacidad, reduciendo gradualmente su potencia solo cuando el nivel de oxígeno se haya recuperado por encima del umbral seguro. Esta estrategia de respuesta agresiva ante hipoxia será esencial porque los camarones pueden comenzar a morir en cuestión de minutos si el oxígeno se agota.

Cuando todos los parámetros estén dentro de rango, el sistema procederá a actualizar la interfaz HMI con los datos más recientes y registrará toda la información en la memoria del PLC con marcas de tiempo. Este registro histórico se estructurará en bloques de datos que podrán almacenar varios días de operación continua, y servirá tanto para análisis posteriores como para cumplir con posibles requisitos de trazabilidad en la producción acuícola.

El sistema también incorporará un módulo de alimentación automática que operará según horarios preprogramados. Cuando llegue la hora configurada para alimentar, el sistema verificará que las condiciones del agua sean adecuadas (todos los parámetros en rango) antes de activar el dosificador de alimento. Si detecta alguna anomalía, pospondrá la alimentación y notificará al operador, ya que alimentar a los camarones cuando están estresados por malas condiciones del agua resulta contraproducente y genera desperdicio. La cantidad de alimento suministrado se monitoreará para llevar un control preciso del factor de conversión alimenticia, un indicador clave del desempeño del cultivo.

Al final de cada turno o cuando el operador lo solicite, el sistema podrá generar un reporte completo que incluirá estadísticas de cada parámetro (promedios, valores máximos y mínimos, tiempo fuera de rango), listado de todas las alarmas que se activaron, acciones correctivas ejecutadas y consumo de insumos como químicos y alimento. Este reporte facilitará la gestión del cultivo y permitirá identificar tendencias o problemas recurrentes que requieran atención.

El siguiente diagrama representará la continuación del proceso operativo, enfocándose en la actualización de la interfaz de usuario y la gestión del sistema de alimentación automática. Una vez que todos los parámetros hayan sido verificados y se encuentren dentro de especificaciones, el sistema actualizará la interfaz HMI para que el operador pueda visualizar el estado actual del cultivo. Los datos se registrarán con marca de tiempo en la memoria del PLC, construyendo un historial que posteriormente podrá ser analizado o exportado. El módulo de alimentación automática operará según horarios preprogramados, pero solo si las condiciones del agua son apropiadas, evitando así desperdiciar alimento cuando los camarones están estresados y no se alimentan adecuadamente.

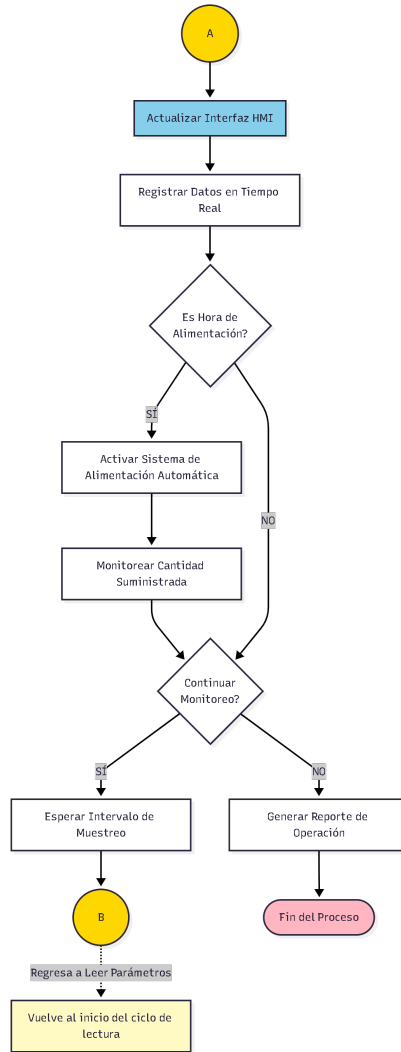


Figura 43. Diagrama de flujo del proceso de actualización HMI y gestión de alimentación automática, por J. Maridueña

VI-F. Métricas de desempeño y criterios de aceptación

Para determinar si el sistema cumple con los objetivos establecidos, se definirán criterios cuantitativos específicos que deberán satisfacerse durante las pruebas de validación. Estos criterios no surgirán de forma arbitraria—estarán fundamentados en los requerimientos biológicos del camarón en cultivo y en estándares que se aplican en sistemas de control industrial similares.



Figura 44. Criterio que se debe cumplir para una validación [55]

VI-G. Criterios de control de parámetros del agua

El sistema deberá mantener el pH dentro de estas especificaciones durante al menos el 75 % del tiempo de operación. Este porcentaje puede parecer modesto comparado con sistemas comerciales ya establecidos, pero es coherente con lo que se reporta en tesis similares donde se están validando conceptos y ajustando algoritmos de control.

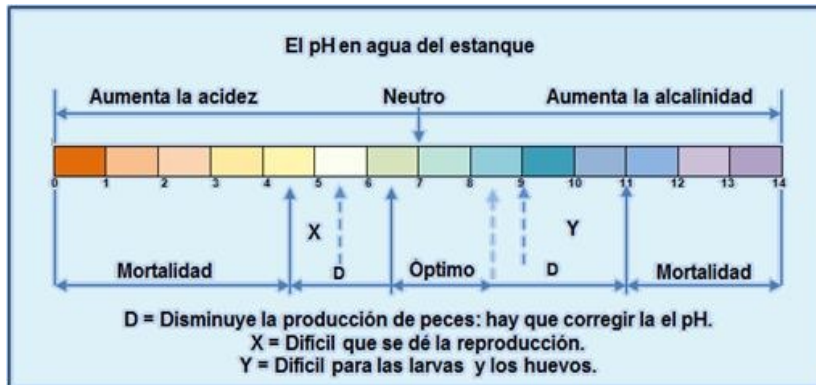


Figura 45. El pH en agua del estanque [1]

El oxígeno disuelto tendrá el criterio más estricto: deberá mantenerse por encima de 5 mg/L durante al menos el 85 % del tiempo. Esta exigencia reflejará la criticidad de este parámetro para la supervivencia. Una baja concentración de oxígeno disuelto es reconocida como la causa principal de estrés, falta de apetito, susceptibilidad a enfermedades y mortalidad en la acuicultura. Es el parámetro que más preocupa a DELOS. Aunque idealmente debería ser 100 %, siendo honestos con un proyecto de tesis que usa componentes de bajo costo, sensores con tiempo de respuesta no instantáneo, aireadores de capacidad limitada, el 85 % representa una meta ambiciosa pero alcanzable. El setpoint se configurará en 6 mg/L para mantener un colchón de seguridad que absorba pequeñas variaciones sin acercarse al mínimo crítico.

VI-H. Tiempos de respuesta del sistema

También se especificarán tiempos de respuesta. Para el oxígeno disuelto, el sistema deberá detectar desviaciones mayores al 5 % del setpoint e iniciar acciones correctivas en menos de 45 segundos. Para temperatura y pH, que tienen dinámicas más lentas, se permitirá hasta 3 minutos. Estos tiempos incluirán la detección de la anomalía, el procesamiento en el PLC y la activación física de los actuadores.

Revisando sistemas industriales similares, encontramos que procesos de autoajuste en controladores de flujo toman típicamente entre 30 y 90 segundos Dialnet, lo que situará nuestros tiempos de respuesta en un rango razonable para un prototipo experimental. Los 45 segundos para oxígeno disuelto serán más conservadores que en sistemas comerciales donde se buscan respuestas casi instantáneas—pero apropiados para hardware de nivel de tesis.

VIII. CONCLUSIONES

■ Automatización del proceso de monitoreo y control

El proceso automatizado que se desarrolló integra sensores, controladores PID, PLC y sistema HMI en una arquitectura de control en lazo cerrado. El funcionamiento arranca con la adquisición de datos de los sensores de oxígeno disuelto, pH, temperatura, salinidad y amoníaco. Los valores analógicos que entregan estos sensores son escalados y procesados por el PLC para convertirlos en unidades físicas reales.

Una vez procesados, cada variable se compara con su respectivo valor de consigna (setpoint). La diferencia entre el valor medido y el deseado genera una señal de error, que es procesada por el controlador PID correspondiente. El algoritmo PID calcula entonces una señal de salida que regula los actuadores —como aireadores, bombas dosificadoras o inyectores— para corregir la desviación detectada.

Este esquema de control en lazo cerrado permite que el sistema responda automáticamente ante perturbaciones o cambios en las condiciones del agua, manteniendo las variables dentro de rangos óptimos sin que sea necesaria una intervención manual constante.

■ Integración de modos de operación

El sistema automatizado incorpora dos modos de funcionamiento: manual y automático. En modo manual, el operador puede asignar valores directamente a los actuadores, lo que resulta útil para realizar pruebas o tareas de mantenimiento. En modo automático, el PLC ejecuta los algoritmos PID de forma continua, ajustando dinámicamente las salidas según cómo se van comportando las variables.

La conmutación entre modos se realiza desde el HMI, lo que garantiza flexibilidad operativa y seguridad en la transición entre estados.

■ Supervisión y registro mediante HMI

El sistema HMI cumple un papel fundamental dentro del proceso automatizado, ya que permite visualizar en tiempo real los valores medidos, las salidas de control y el estado de cada variable. Además, se implementó un sistema de alarmas que registra eventos cuando las variables superan los límites preestablecidos, almacenando la fecha y hora para poder hacer análisis posteriores.

La estructuración en pantallas funcionales (F1–F7) facilita la interacción del operador con el sistema, permitiendo configurar parámetros, hacer supervisión gráfica y diagnosticar posibles anomalías.

En conjunto, el proceso automatizado que se desarrolló reduce la dependencia del monitoreo manual, mejora la precisión del control y optimiza las condiciones operativas del cultivo, contribuyendo a una gestión más eficiente y segura del sistema acuícola.

IX. RECOMENDACIONES

- Optimización del proceso automatizado

Se recomienda realizar pruebas en condiciones reales de operación para validar el desempeño del sistema ante variaciones bruscas de carga biológica o cambios ambientales. Esto permitirá ajustar con mayor precisión los parámetros de los controladores PID y mejorar la robustez del sistema frente a perturbaciones.

- Mejoras en la arquitectura de control

Se sugiere evaluar la implementación de estrategias complementarias, como control adaptativo o control predictivo, que permitan anticipar variaciones del proceso y mejorar la respuesta ante perturbaciones prolongadas. Estas estrategias podrían resultar especialmente útiles cuando las condiciones del cultivo cambian de forma significativa a lo largo del ciclo de producción.

- Fortalecimiento del sistema de supervisión

Se recomienda ampliar la capacidad de almacenamiento histórico de datos y desarrollar herramientas de análisis estadístico que permitan evaluar tendencias, detectar patrones anómalos y optimizar la toma de decisiones.

Asimismo, podría considerarse la integración con plataformas de monitoreo remoto o tecnologías IoT, con el objetivo de mejorar la accesibilidad y escalabilidad del sistema automatizado. Esto permitiría supervisar el cultivo desde cualquier ubicación y facilitaría la expansión del sistema a múltiples estanques o instalaciones.

REFERENCIAS

- [1] J. Roldán, «Simulación de procesos industriales con TIA Portal,» Tesis de mtría., Universidad Estatal de Milagro, Ecuador, 2021.
- [2] A. Pérez y K. Jurado, «Aplicación de TIA Portal en sistemas de control para la industria acuícola,» Tesis de mtría., Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE), Ecuador, 2021.
- [3] R. Requena, M. Aranda y A. Olivera, «Environmental parameter variability and shrimp mortality,» *Aquaculture International*, vol. 29, n.º 3, págs. 1123-1134, 2021.
- [4] P. Salvatierra, «Evaluación de métodos manuales de control en camarónicas,» Tesis de mtría., Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Ecuador, 2019.
- [5] M. Bravo y P. Cárdenas, «Use of industrial automation systems in Ecuadorian aquaculture: A case study of shrimp farms,» *Latin American Journal of Automation and Control*, vol. 6, n.º 3, págs. 201-215, 2022.
- [6] L. Viteri, «Análisis de parámetros ambientales en piscinas camarónicas,» Tesis de mtría., Universidad de Guayaquil, Ecuador, 2020.
- [7] C. Meza y F. Rivera, «Monitoreo continuo de parámetros fisicoquímicos en camarónicas mediante sensores industriales,» Tesis de mtría., Universidad Estatal de Milagro (UNEMI), Ecuador, 2022.
- [8] R. Molina y D. Castillo, «Advances in sensor-based monitoring for shrimp farming: A review,» *Aquaculture Engineering*, vol. 87, pág. 102023, 2019.
- [9] G. Barreto y E. Zamora, «Desarrollo de un sistema de control PID para la regulación térmica en cultivo de camarón,» Tesis de mtría., Universidad de Guayaquil, Ecuador, 2021.
- [10] D. Carvajal y P. Medina, «Diseño e implementación de un sistema de control automático para el manejo de parámetros de calidad del agua en piscinas camarónicas,» Tesis de mtría., Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), Ecuador, 2020.
- [11] J. Hernández-López y E. Palacios, «Feeding strategies in *Litopenaeus vannamei*,» *Aquaculture Research*, vol. 49, págs. 1501-1510, 2018.
- [12] R. Hidalgo y K. Suárez, «Optimization of shrimp pond management using automated aeration control,» *Aquaculture Reports*, vol. 20, pág. 100742, 2021.
- [13] J. Torres y A. Mite, «Diseño de un sistema automatizado para control de oxígeno en piscinas camarónicas utilizando PLC,» Tesis de mtría., Universidad Técnica de Manabí (UTM), Ecuador, 2022.
- [14] E. Ramos y J. Villacís, «Automated aeration management in shrimp ponds using PLC-based variable speed control,» *Journal of Aquaculture Engineering and Technology*, vol. 12, n.º 3, págs. 118-129, 2020.
- [15] D. Andrade y L. Pincay, «Aquaculture water quality management using real-time sensor networks,» *Journal of Water Resource and Protection*, vol. 11, n.º 7, págs. 845-859, 2019.
- [16] Y. Liu et al., «Automatic control system for aquaculture using PID and PLC,» *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 175, pág. 105580, 2020.
- [17] H. Yu y W. Zhao, «PLC-based monitoring and control system for aquaculture,» *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, págs. 492-497, 2016.
- [18] P. Vera y M. Cedeño, «Diseño de un sistema SCADA para el control de parámetros de calidad en acuicultura,» Tesis de mtría., Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Ecuador, 2020.
- [19] S. López y P. Menéndez, «Implementación de un sistema de supervisión SCADA en procesos acuícolas de la costa ecuatoriana,» Tesis de mtría., Universidad Politécnica Salesiana (UPS), Ecuador, 2021.

- [20] S. Guerrero, «Optimización del proceso de alimentación en camarónicas,» Tesis de maestría., Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (UCSG), Ecuador, 2019.
- [21] L. R. Martínez-Córdova, A. Campaña-Torres y M. Porchas-Cornejo, «Real-time monitoring systems in aquaculture,» *Aquaculture*, vol. 468, págs. 328-336, 2017.
- [22] P. Silva y A. Castro, «Intelligent aquaculture: PLC-based automated systems for shrimp production,» *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, vol. 13, n.º 4, págs. 123-131, 2020.
- [23] M. Torres y F. Hidalgo, «Application of IoT and wireless sensor networks for real-time monitoring in shrimp aquaculture,» *Aquaculture Systems Engineering*, vol. 9, n.º 1, págs. 44-57, 2021.
- [24] F. Rodríguez y R. Cedeño, «Automated environmental monitoring for shrimp farming using IoT and PLC systems,» *Aquaculture Technology Review*, vol. 14, n.º 2, págs. 55-68, 2020.
- [25] C. Zambrano y J. Lloor, «Implementación de un sistema automatizado de monitoreo para piscinas camarónicas usando PLC Siemens,» Tesis de maestría., Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM), Ecuador, 2021.
- [26] R. Pacheco y V. Llaguno, «Sistema automatizado de control y supervisión para cultivos de camarón mediante PLC Siemens S7-1200,» Tesis de maestría., Universidad de Guayaquil, Ecuador, 2022.
- [27] L. Sánchez y D. Bravo, «Intelligent feeding systems for *Litopenaeus vannamei* using automated decision models,» *Latin American Journal of Aquatic Research*, vol. 48, n.º 4, págs. 623-632, 2020.
- [28] L. Mendoza y J. Alarcón, «Diseño de una arquitectura IoT-PLC para el monitoreo de calidad del agua en camarónicas,» Tesis de maestría., Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador, 2020.
- [29] C. Flores y J. Anchundia, «Supervisión y control de variables críticas en sistemas acuícolas mediante SCADA y PLC,» Tesis de maestría., Universidad Estatal de Milagro (UNEMI), Ecuador, 2021.
- [30] J. Cárdenas y F. Torres, «Modelado y simulación de procesos acuícolas mediante control PID y PLC,» Tesis de maestría., Universidad Internacional del Ecuador (UIDE), Ecuador, 2022.
- [31] *SIMATIC S7-1500 Automation System*, Product Information, Siemens AG, 2023.
- [32] *SIMATIC PLC Programming: Advanced Applications*, Training Manual, Siemens AG, 2022.
- [33] *WinCC: SCADA System Configuration and Operation*, User Manual, Siemens AG, 2023.
- [34] J. González y L. Pérez, «SCADA-based supervision systems for water quality management in aquaculture,» *Aquaculture Informatics*, vol. 5, n.º 2, págs. 85-97, 2022.
- [35] S. Kim y J. Park, «PLC-driven automation architectures for sustainable shrimp farming,» *Journal of Industrial Automation in Agriculture*, vol. 18, n.º 1, págs. 33-45, 2021.
- [36] M. Álvarez y R. Castillo, «Desarrollo de un sistema SCADA para monitoreo de parámetros fisicoquímicos en acuicultura,» Tesis de maestría., Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, 2021.
- [37] T. Wang y H. Liu, «Dissolved oxygen control strategies in shrimp ponds using automated systems,» *Aquaculture Control Engineering*, vol. 7, págs. 101-110, 2020.
- [38] D. Espinoza y M. Rivas, «Automatización del control de calidad del agua en piscinas camarónicas mediante PLC y sensores industriales,» Tesis de maestría., Universidad Técnica de Machala, Ecuador, 2022.
- [39] A. Fernández y C. Ruiz, «PID control performance for temperature and oxygen regulation in aquaculture systems,» *International Journal of Control Applications*, vol. 14, n.º 4, págs. 211-220, 2019.
- [40] F. Ortiz y H. Delgado, «Sistema de monitoreo remoto para piscinas de cultivo de camarón basado en PLC,» Tesis de maestría., Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador, 2020.
- [41] L. Nguyen y P. Tran, «Integration of IoT and SCADA platforms for smart aquaculture monitoring,» *Smart Agricultural Systems*, vol. 3, págs. 55-66, 2021.

- [42] J. Ruiz y E. Molina, «Control automático de aireadores en piscinas camaroneras mediante variadores de frecuencia,» Tesis de mtría., Universidad Técnica del Norte, Ecuador, 2021.
- [43] P. Lozano y S. Herrera, «Energy-efficient automation strategies for intensive shrimp aquaculture,» *Journal of Sustainable Aquaculture Engineering*, vol. 10, n.º 2, págs. 90-104, 2022.
- [44] *TIA Portal: Totally Integrated Automation*, Technical Documentation, Version 17, Siemens AG, 2023.
- [45] F. Araneda, M. González y P. Hernández, «Requerimientos de calidad del agua para cultivo de camarón blanco del Pacífico (*Litopenaeus vannamei*),» *Revista de Acuicultura*, vol. 12, n.º 3, págs. 45-58, 2021.
- [46] L. Martínez y J. Rodríguez, «Efectos de fluctuaciones en parámetros físico-químicos sobre supervivencia de postlarvas de camarón,» *Journal of Marine Biology*, vol. 18, n.º 2, págs. 112-125, 2020.
- [47] R. Sánchez, *Sensores industriales: Principios y aplicaciones*, 2.ª ed. Editorial Técnica, 2019.
- [48] H. Gómez y A. Vargas, «Camaronicultura intensiva: Fundamentos biológicos y tecnológicos,» *Acuicultura Moderna*, vol. 25, n.º 4, págs. 78-94, 2022.
- [49] M. Johnson y T. Anderson, «Temperature sensors for aquaculture applications,» *Aquacultural Engineering*, vol. 67, págs. 34-45, 2020.
- [50] P. Chen y L. Wang, «Electrochemical sensors for water quality monitoring,» *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 305, pág. 127458, 2021.
- [51] J. Torres y M. Delgado, «Sistemas de control PID en aplicaciones industriales,» *Automatización y Control*, vol. 15, n.º 1, págs. 23-39, 2021.
- [52] R. Boyd y A. Davis, «Water quality management for pond fish culture,» *Aquaculture Research*, vol. 51, n.º 8, págs. 3112-3128, 2020.
- [53] K. Fitzsimmons y P. Rouse, «Advances in shrimp farming technology,» *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, vol. 28, n.º 4, págs. 401-419, 2021.
- [54] E. Schulz y H. Wickins, «Dissolved oxygen management in intensive aquaculture systems,» *Aquacultural Engineering*, vol. 62, págs. 45-58, 2019.
- [55] D. López, *Instrumentación electrónica aplicada a sistemas acuáticos*, 3.ª ed. Editorial Universitaria, 2020.
- [56] J. Bolton y P. Anderson, «PLC-based control systems for aquaculture,» *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 172, pág. 105365, 2020.
- [57] M. García y L. Fernández, «Sistemas SCADA para monitoreo industrial,» *Revista de Ingeniería*, vol. 34, n.º 2, págs. 67-82, 2021.
- [58] F. Aguirre, J. Mendoza y R. Castro, «Parámetros críticos en fases tempranas de cultivo de camarón,» *Latin American Journal of Aquatic Research*, vol. 48, n.º 3, págs. 456-470, 2020.
- [59] S. Kumar y R. Sharma, «Automation in aquaculture: Current status and future prospects,» *Aquaculture International*, vol. 29, págs. 1537-1562, 2021.
- [60] T. Bergheim y A. Kristiansen, «Real-time monitoring systems for recirculating aquaculture,» *Aquacultural Engineering*, vol. 78, págs. 102-115, 2019.

X. ANEXO

X-A. Funcionamiento y uso correcto de la simulación por pantallas (F1–F7)

■ F1 – Ingreso y acondicionamiento de señales

La pantalla F1 es el punto de partida de toda la simulación. Aquí se ingresan los valores de los sensores simulados (nivel, temperatura, oxígeno disuelto, pH, salinidad y amoníaco) en formato de señal analógica ADC, que luego se escalan y convierten a unidades físicas reales.

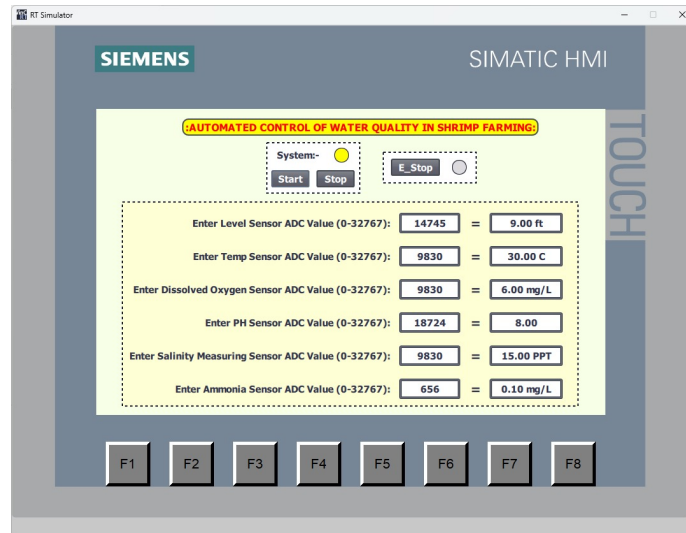


Figura 47. F1 – Ingreso y acondicionamiento de señales, por J. Maridueña

Para usar correctamente esta pantalla, hay que introducir valores que tengan sentido según las condiciones reales del cultivo, porque estos datos representan el estado actual del sistema. A partir de aquí, el PLC hace todos los cálculos necesarios para supervisar y controlar automáticamente el proceso. En resumen, F1 es la base de todo: cualquier decisión que tome el sistema depende directamente de lo que se ingrese en esta etapa.

■ F2 – Modo automático de control

La pantalla F2 corresponde al modo automático, donde el sistema toma los valores que se ingresaron en F1 o F3 y ejecuta las acciones de control sin que el operador tenga que intervenir.

Aquí se ven las salidas que genera el PLC: activación de bombas, inyectores, aeradores, calentadores o enfriadores. Para usar correctamente el modo automático hay que:

- Mantener el sistema habilitado.
- Verificar que las señales de entrada sean válidas.
- Dejar que el algoritmo actúe de forma autónoma.

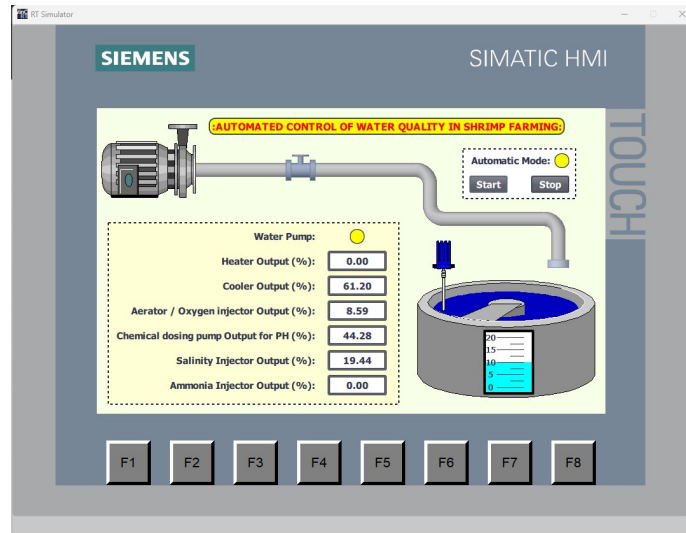


Figura 48. F2 – Modo automático de control, por J. Maridueña

Este modo representa la forma ideal de operar el sistema: el control es continuo, estable y se basa en criterios predefinidos de calidad del agua.

- F3 – Modo manual de operación

La pantalla F3 permite que el operador intervenga directamente sobre los actuadores, sin importar lo que el sistema decida automáticamente. En este modo se pueden asignar manualmente valores de salida a cada elemento del proceso, como bombas e inyectores.

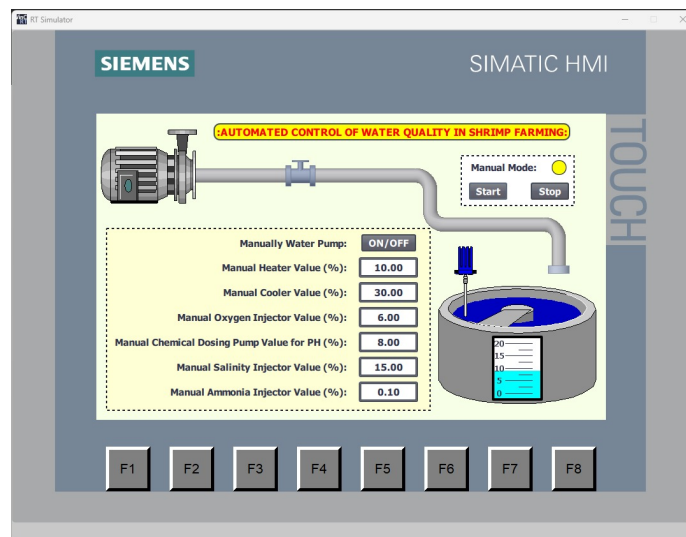


Figura 49. F3 – Modo manual de operación, por J. Maridueña


Esta pantalla se usa principalmente para:

- Hacer pruebas individuales de actuadores.
- Verificar que todo funcione bien a nivel mecánico.
- Operar en caso de contingencia si falla el modo automático.

Hay que tener claro que el modo manual debe usarse con criterio técnico. Si se manipulan mal los actuadores, se pueden generar condiciones que afecten negativamente al cultivo.

■ F4 – Registro y reporte de alarmas

La pantalla F4 funciona como un historial de eventos y alarmas del sistema. Aquí se almacenan automáticamente todos los eventos que se generan cuando una variable supera o cae por debajo de los límites establecidos.



The screenshot shows a SIMATIC HMI interface for 'SIEMENS' and 'SIMATIC HMI'. The main title is '(AUTOMATED CONTROL OF WATER QUALITY IN SHRIMP FARMING)'. Below this is the 'Alarm Screen' section, which contains a table with the following data:

No.	Time	Date	Text
12	6:45:02 PM	2/4/2026	Ammonia Sensor Value is High
7	6:44:59 PM	2/4/2026	PH Sensor Value is Low
5	6:44:59 PM	2/4/2026	Dissolved Oxygen Sensor Value is Low
3	6:44:59 PM	2/4/2026	Temp Sensor Value is Low
1	6:44:59 PM	2/4/2026	Level Sensor Value is Low
9	6:44:59 PM	2/4/2026	Salinity Sensor Value is Low

At the bottom of the screen, there are eight function keys labeled F1 through F8.

Figura 50. F4 – Registro y reporte de alarmas, por J. Maridueña

Cada registro incluye:

- Tipo de alarma.
- Fecha.
- Hora de ocurrencia.

Usar correctamente esta pantalla permite analizar cómo se está comportando el sistema, identificar patrones de fallas y evaluar si el control automático está funcionando bien. Además, este registro es clave para tener trazabilidad del proceso y poder tomar decisiones correctivas cuando sea necesario.

■ F5 – Visualización de tendencias (actuadores principales)

La pantalla F5 muestra gráficas de cómo evolucionan en el tiempo los actuadores principales del sistema. Con estas gráficas, el operador puede ver si todo está funcionando normalmente o detectar anomalías cuando las señales presentan variaciones bruscas, picos o caídas inesperadas.

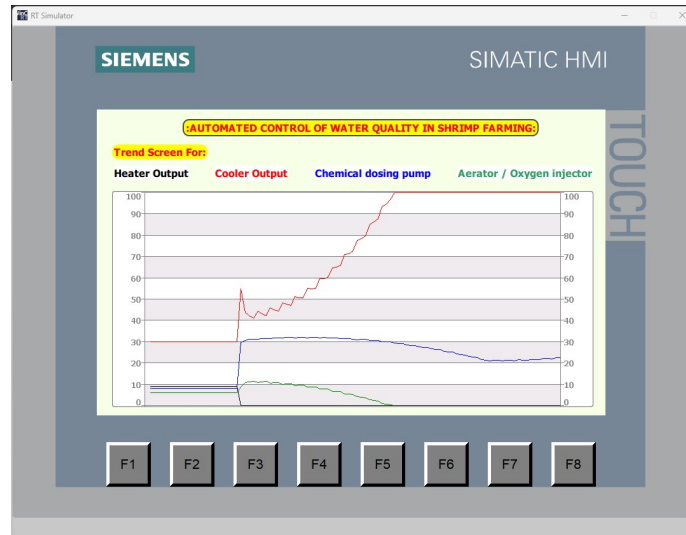


Figura 51. F5 – Visualización de tendencias, por J. Maridueña

Usar correctamente esta pantalla ayuda a:

- Evaluar si el control es estable.
- Detectar a tiempo si hay sobreajustes.
- Analizar cómo se está desempeñando el sistema.

■ F6 – Visualización de tendencias (actuadores químicos)

La pantalla F6 complementa el análisis de tendencias, pero se enfoca específicamente en los actuadores relacionados con la dosificación química, como los de salinidad y amoníaco. Esta separación permite analizar con más detalle variables que son críticas para la salud del camarón.

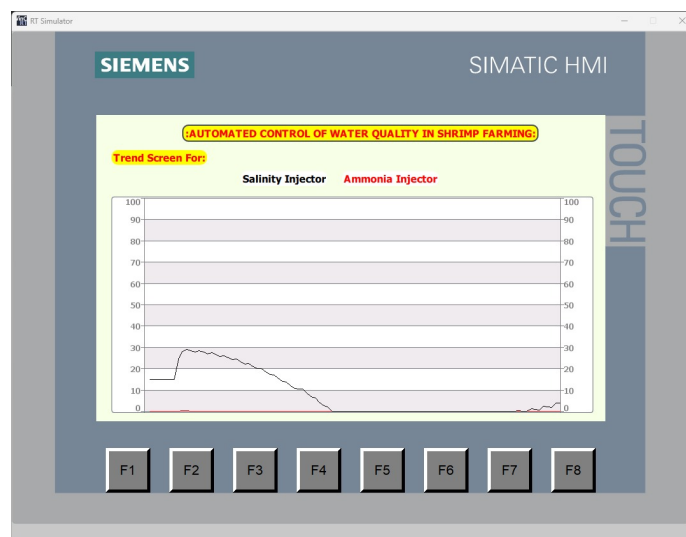


Figura 52. F6 – Visualización de tendencias, por J. Maridueña

Usarla correctamente permite verificar que las acciones de dosificación sean progresivas y controladas, evitando cambios bruscos que puedan desequilibrar el ecosistema acuícola.

- F7 – Supervisión general del sistema

La pantalla F7 funciona como una vista integral del sistema. Aquí se pueden ver simultáneamente el estado de las variables de entrada, las salidas de control y las alarmas activas. Está diseñada para ofrecer una visión completa del funcionamiento del proceso.

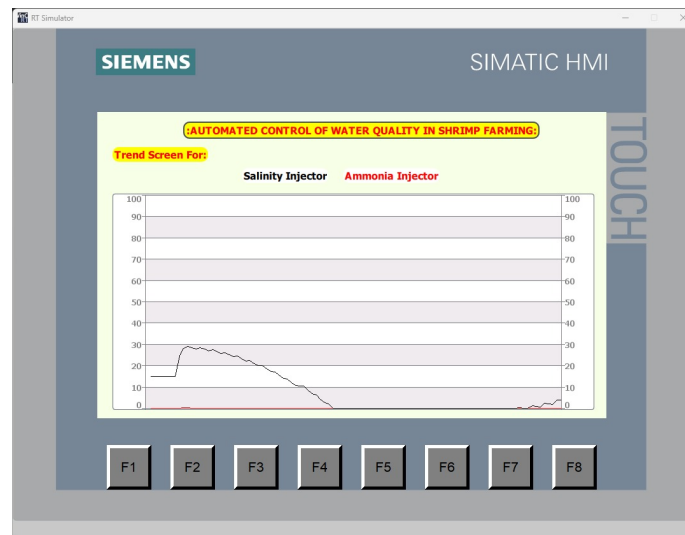


Figura 53. F7 – Supervisión general del sistema, por J. Maridueña

Usar correctamente F7 permite al operador:

- Confirmar que el sistema está funcionando de forma estable.
- Verificar que haya coherencia entre lo que se mide y las acciones de control.
- Supervisar el proceso sin tener que estar cambiando entre múltiples pantallas.

- Conclusión operativa

El uso adecuado y ordenado de las pantallas F1 a F7 garantiza una simulación segura y técnicamente consistente del sistema SCADA. Cada pantalla tiene una función específica dentro del proceso, y utilizarlas correctamente permite validar cómo se comporta el sistema bajo condiciones normales, anómalas y críticas antes de llevarlo a un entorno real.

X-B. *Funcionamiento de los controladores PID en el sistema SCADA*

El sistema de control implementado en el PLC utiliza controladores PID estándar de Siemens (PID Temp y PID Compact) para regular automáticamente los principales parámetros de calidad del agua en el cultivo de camarones: temperatura, oxígeno disuelto, pH, salinidad y amoníaco. Cada controlador opera de forma independiente, pero todos siguen la misma filosofía de control.

■ Condición de habilitación del control

En todas las redes hay una condición común que debe cumplirse antes de ejecutar el bloque PID:

- System Start/Stop Tags – System
- System Start/Stop Tags – Auto Mode Selected

Esto garantiza dos cosas importantes:

- Que el controlador PID solo opere cuando el sistema está encendido.
- Que el control automático no interfiera con el modo manual, asegurando una correcta conmutación entre modos de operación.

Esta lógica es fundamental para evitar acciones no deseadas sobre los actuadores cuando el operador está trabajando en modo manual o durante paradas del sistema.

■ Estructura general del controlador PID

Cada bloque PID recibe tres elementos principales:

- Setpoint (SP)

Es el valor de referencia deseado para cada variable:

- Temperatura: 30 °C
- Oxígeno disuelto: 6 mg/L
- pH: 8.0
- Salinidad: 15 PPT
- Amoníaco: 0.1 mg/L

Estos valores representan las condiciones óptimas para el cultivo de camarón.

- Input (PV – Process Variable)

Corresponde al valor medido por cada sensor, que previamente ha sido:

- Convertido desde ADC (0–32767)
- Escalado a unidades físicas reales

- Output (CV – Control Variable)

Es la señal de salida que el PID genera para accionar el elemento final de control:

- Calentador
- Enfriador
- Inyector de oxígeno
- Bomba dosificadora de químicos
- Inyector de salinidad
- Sistema de reducción de amoníaco

■ Control PID de temperatura (Network 2)

El bloque PID Temp compara la temperatura medida con el setpoint de 30 °C.

- Si la temperatura está por debajo del setpoint, el controlador incrementa la salida hacia el calentador.
- Si está por encima, el PID actúa sobre el enfriador.
- Cuando la temperatura se mantiene cerca del valor deseado, ambas salidas tienden a cero, lo que indica que el sistema está estable.

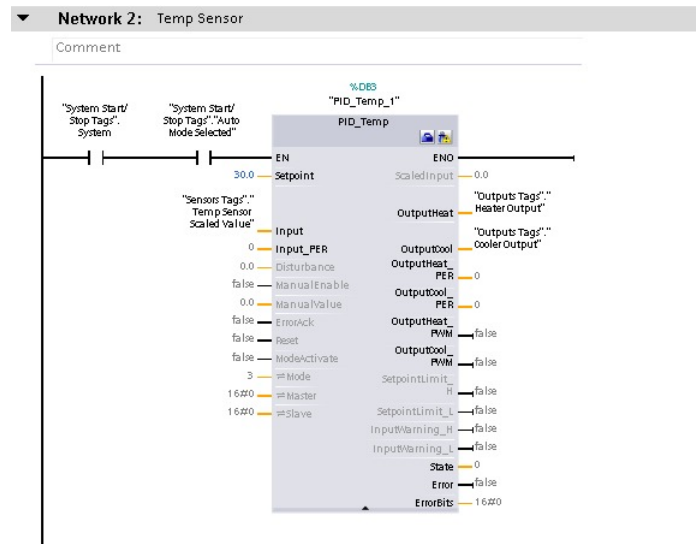


Figura 54. Control PID de temperatura (Network 2), por J. Maridueña

Este enfoque evita oscilaciones térmicas y protege a los organismos frente a cambios bruscos.

■ Control PID de oxígeno disuelto (Network 3)

El controlador PID Compact regula el oxígeno disuelto tomando como referencia 6 mg/L.

- Si el oxígeno cae, la salida del aerador o inyector de oxígeno aumenta progresivamente.
- Si el nivel es adecuado o superior al setpoint, la salida disminuye gradualmente.

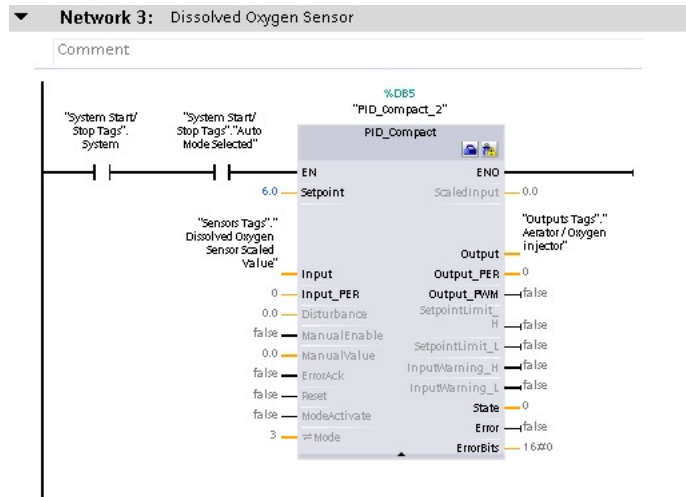


Figura 55. Control PID de oxígeno disuelto (Network 3), por J. Maridueña

Este control continuo es crítico, ya que niveles bajos de oxígeno pueden provocar estrés o incluso mortalidad masiva en el cultivo.

■ Control PID de pH (Network 4)

En esta red, el PID ajusta el pH hacia un valor objetivo de 8.0 mediante la bomba dosificadora de productos químicos.

- El controlador evalúa la desviación entre el pH medido y el deseado.
- La salida regula la cantidad de químico inyectado, evitando dosificaciones bruscas.
- El uso de control proporcional e integral permite correcciones suaves y sostenidas, manteniendo la estabilidad química del agua.

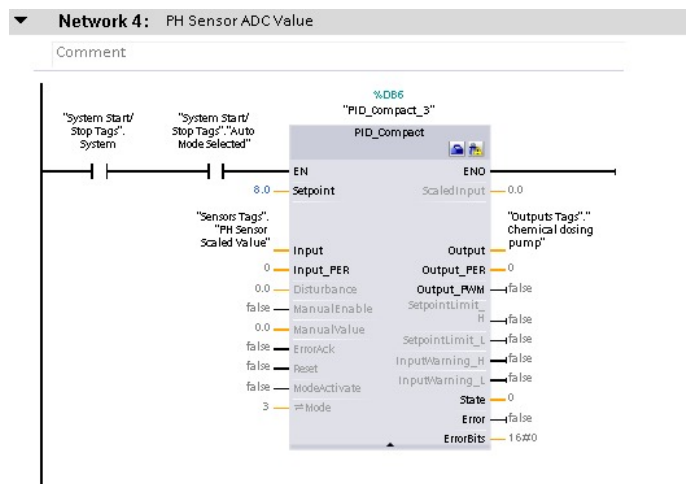


Figura 56. Control PID de pH (Network 4), por J. Maridueña

- Control PID de salinidad (Network 5)

El bloque PID mantiene la salinidad en 15 PPT mediante un inyector de salinidad.

- Si hay diluciones (por lluvias o recambios de agua), el PID incrementa la inyección.
- Si la salinidad es excesiva, la salida disminuye o se anula.

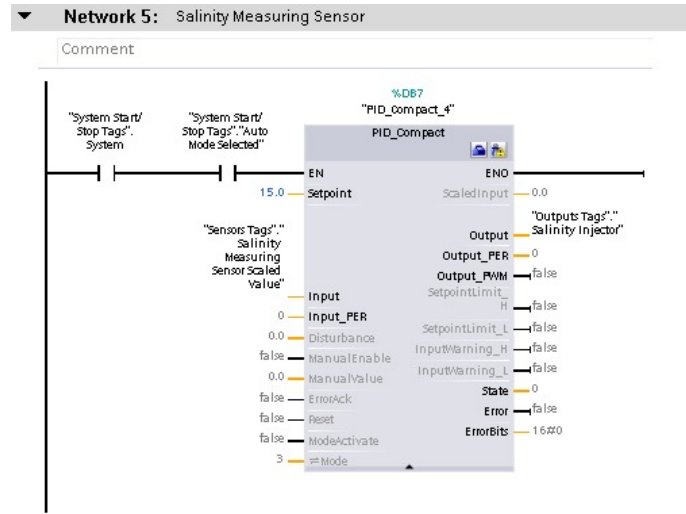


Figura 57. Control PID de salinidad (Network 5), por J. Maridueña

Este control es esencial para mantener el equilibrio osmótico del camarón y prevenir estrés fisiológico.

- Control PID de amoníaco (Network 6)

El amoníaco es uno de los parámetros más críticos del sistema.

- El setpoint de 0.1 mg/L representa un nivel seguro.
- Cuando el sensor detecta concentraciones superiores, el PID actúa sobre el inyector.
- La respuesta del controlador busca reducir gradualmente la concentración sin generar cambios químicos bruscos en el agua.

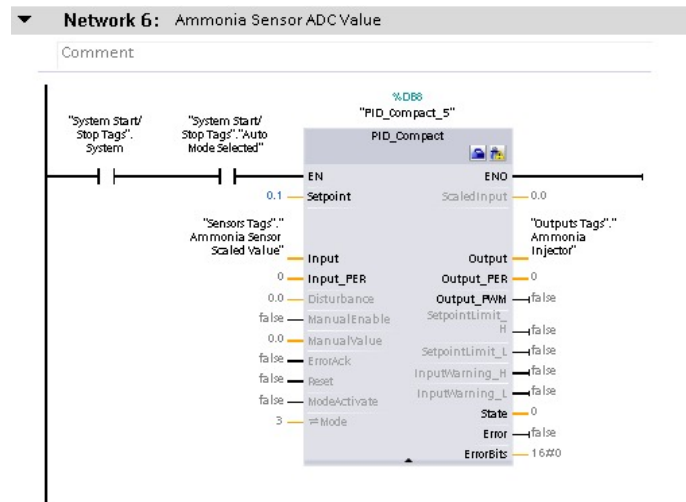


Figura 58. Control PID de amoníaco (Network 6), por J. Maridueña

X-C. Modelo matemático del oxígeno disuelto en Matlab

El oxígeno disuelto en un sistema acuícola se comporta como un proceso dinámico de primer orden. Esto tiene sentido si se piensa en cómo funciona realmente el sistema:

- El intercambio de oxígeno con el agua es gradual, no instantáneo.
- Existe un consumo biológico constante por parte de los camarones y las bacterias.
- La inyección de oxígeno no produce cambios bruscos, sino que el agua va absorbiendo el oxígeno de forma progresiva.

El modelo matemático que describe este comportamiento se expresa como:

$$\frac{dO(t)}{dt} = -\frac{1}{\tau}(O(t) - O_{eq}) + K \cdot u(t)$$

Parámetro	Descripción	Función en el sistema
$(O(t))$	Oxígeno disuelto (mg/L)	Variable controlada
(O_{eq})	Oxígeno natural del agua	Nivel base sin control
(τ)	Constante de tiempo (s)	Qué tan rápido responde el sistema
(K)	Ganancia del proceso	Efectividad del inyector de oxígeno
$(u(t))$	Señal del controlador	Acción del PID

■ Función de transferencia del oxígeno disuelto

Si aplicamos la transformada de Laplace al modelo dinámico del oxígeno disuelto, obtenemos la función de transferencia:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

Este modelo, aunque sencillo, es suficiente para lo que necesitamos:

- Diseño del PID: permite calcular las ganancias proporcional, integral y derivativa que garanticen un control estable y sin oscilaciones.
- Simulación dinámica: ayuda a predecir cómo responderá el sistema ante cambios en el setpoint o perturbaciones.
- Comparación con el PLC: facilita validar que el comportamiento del controlador implementado en el PLC coincida con lo esperado teóricamente.

En otras palabras, con esta función de transferencia podemos diseñar, simular y verificar el controlador antes de implementarlo en campo, lo que reduce riesgos y acelera la puesta en marcha.

Parámetro	Valor	Justificación
Setpoint	6 mg/L	Valor óptimo para camarón
(K)	1.2	Inyector eficiente
(τ)	60 s	Respuesta media
Tiempo simulado	1500 s	Proceso lento

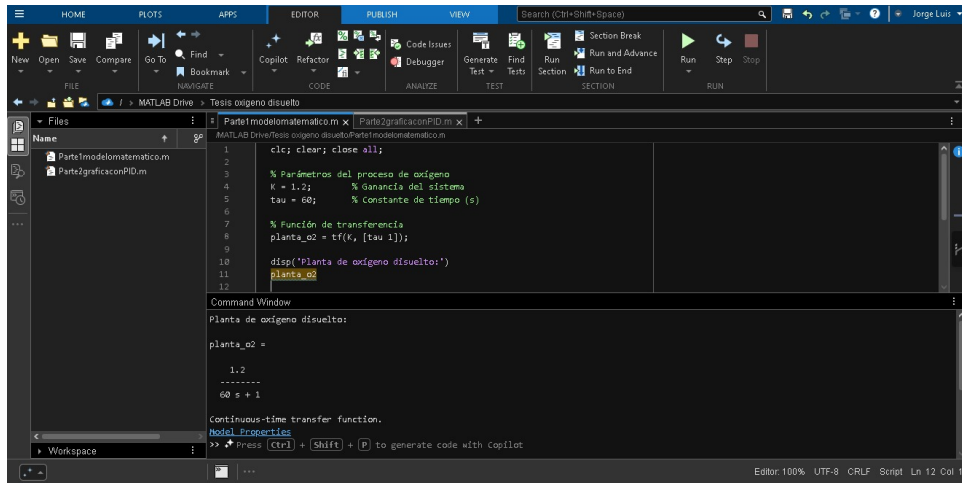


Figura 59. Simulación en MATLAB (Modelo del proceso), por J. Maridueña

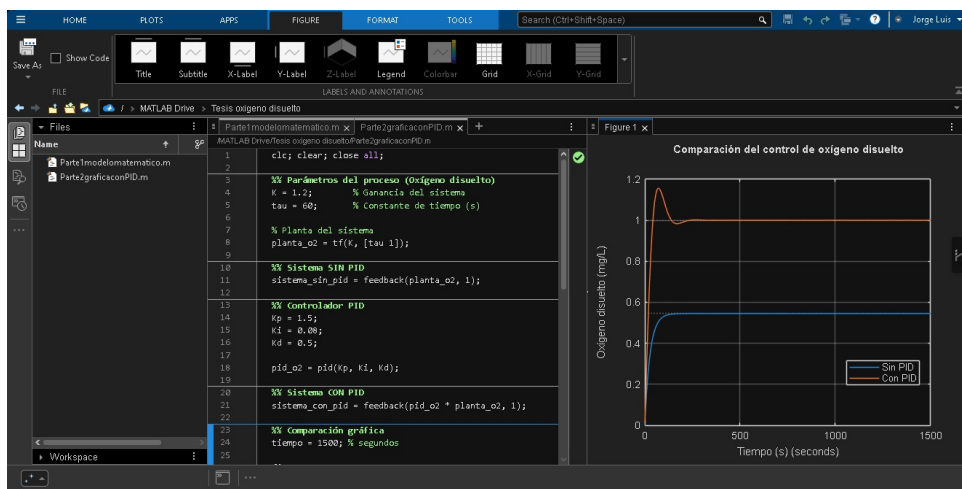


Figura 60. Comparación con y sin PID (Oxígeno disuelto), por J. Maridueña

■ Cómo interpretar la gráfica

En la gráfica se pueden observar claramente las diferencias entre ambos sistemas:

- Sistema SIN PID (curva naranja)

- La respuesta es lenta y tarda mucho en estabilizarse.
- Presenta un error en estado estacionario, es decir, nunca llega exactamente al setpoint.
- No alcanza correctamente el valor de referencia deseado.
- Este comportamiento no es apto para control automático, ya que no garantiza la calidad del agua.

- Sistema CON PID (curva azul)

- Alcanza el setpoint rápidamente y de forma eficiente.
- El error en estado estacionario es prácticamente nulo.
- La respuesta es estable, sin oscilaciones innecesarias.
- Representa fielmente cómo funciona el PLC en modo automático.

■ Conclusión

La comparación entre el sistema con y sin controlador PID permite evidenciar las ventajas que ofrece la implementación de un lazo de control cerrado en la regulación del oxígeno disuelto. En ausencia del controlador PID, el sistema exhibe una respuesta característica de lazo abierto: la variable controlada evoluciona de manera lenta hacia un valor cercano al setpoint, pero nunca logra alcanzarlo de forma precisa. Este comportamiento genera un error en estado estacionario que persiste en el tiempo, lo cual resulta inaceptable para aplicaciones donde la precisión es crítica, como en el cultivo de camarón. Además, la falta de acción correctiva continua hace que el sistema sea vulnerable ante perturbaciones externas, como cambios en la temperatura del agua, variaciones en la carga biológica o fluctuaciones en la aireación ambiental.

Por el contrario, al incorporar el controlador PID, el sistema adquiere la capacidad de corregir automáticamente cualquier desviación respecto al valor de referencia. La acción proporcional permite responder de inmediato ante errores grandes, la acción integral elimina el error residual acumulado en el tiempo, y la acción derivativa anticipa cambios bruscos, suavizando la respuesta. Como resultado, el sistema alcanza el setpoint de manera rápida, estable y sin oscilaciones excesivas, logrando un error prácticamente nulo en estado estacionario. Este comportamiento garantiza que la concentración de oxígeno disuelto se mantenga dentro del rango óptimo para el desarrollo del cultivo, independientemente de las perturbaciones que puedan presentarse.

Desde el punto de vista operativo, la implementación del PID en el PLC representa un salto cualitativo en la gestión del proceso: se pasa de un sistema pasivo, que solo responde a comandos manuales, a un sistema activo que monitorea, decide y actúa de forma autónoma. Esta capacidad de autorregulación no solo mejora la calidad del agua, sino que también reduce la carga de trabajo del operador, minimiza el riesgo de errores humanos y contribuye a la sostenibilidad del cultivo al evitar el uso innecesario de recursos como energía eléctrica o insumos químicos. En definitiva, la validación mediante simulación confirma que el controlador PID implementado cumple con los objetivos de control establecidos, proporcionando una base técnica sólida para su aplicación en el entorno real de producción acuícola.