



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Integración de un sistema de inferencia difusa para mejorar la usabilidad de un prototipo de monitoreo de calidad del agua en estanques piscícolas

Integration of a fuzzy inference system to improve the usability of a water quality monitoring prototype in fish ponds

Mendoza-López, R.^a, Verduzco-Ramírez, J.A.^{a*}, García-Díaz, N.^a, Reyes-Mendoza, O.F.^b, Bricio-Barrios, E.E.^c

^a División de Estudios de Posgrado e Investigación; Tecnológico Nacional de México campus Colima; C.P. 28976, Villa de Álvarez, Colima, México.

^b Departamento de Observación y Estudio de la Tierra, la Atmósfera y el Océano; El Colegio de la Frontera Sur; C.P. 77014, Chetumal, Quintana Roo, México.

^c Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica; Tecnológico Nacional de México campus Colima; C.P. 28976, Villa de Álvarez, Colima, México.

g2246014@colima.tecnm.mx; averduzo@colima.tecnm.mx*; ngarcia@colima.tecnm.mx;
oscar.reyes@ecosur.mx; elena.bricio@colima.tecnm.mx

Innovación tecnológica: Mejora de la usabilidad de un prototipo de monitoreo de la calidad del agua de cultivos piscícolas aplicando lógica difusa.

Área de aplicación industrial: Piscicultura.

Recibido: 24 diciembre 2023

Aceptado: 28 junio 2024

Abstract

Water quality monitoring systems in aquaculture ponds are limited to providing parameter values as output information, which makes it difficult for the user to determine the water quality. This work addresses the improvement of the usability of these systems by integrating a fuzzy inference system (FIS) and representing it in an output interface based on traffic light colors. The development phases of this work consisted of, first, the migration of the FIS to the Arduino platform, followed by the implementation of the water quality traffic light on the monitoring prototype. Finally, the third phase consisted of evaluating the usability improvement. For this, a sample of 20 participants involved in aquaculture activities was selected. Two tests were applied:

the first focused on measuring the speed of the participants to determine the water quality, timing the time spent in this activity; and the second aimed at measuring the participant's level of satisfaction in the use of the prototype by applying a survey based on a five-level Likert scale. The results show that the integration of the FIS into the water quality monitoring prototype has a positive impact on usability. Users reported a significantly improved user experience and were able to determine the water quality status three times faster compared to information provided in numerical format. This work highlights the importance of prioritizing usability in the implementation of technological products intended for the aquaculture sector to facilitate their technological transfer.

Keywords: Aquaculture, Monitoring Systems, Fuzzy Logic, Systems Usability.

Resumen

Los sistemas de monitoreo de la calidad del agua en estanques de cultivos piscícolas se limitan a proporcionar valores de parámetros como información de salida, lo que dificulta la determinación de la calidad del agua efectuada por el usuario. Este trabajo aborda la mejora de la usabilidad de estos sistemas mediante la integración de un sistema de inferencia difusa (SID) y su representación en una interfaz de salida basada en los colores del semáforo. Las fases del desarrollo de este trabajo consistieron en, primer término, la migración del SID a la plataforma Arduino, seguida de la implementación del semáforo de calidad del agua al prototipo de monitoreo. Finalmente, la tercera fase consistió en evaluar la mejora de la usabilidad. Para esto, se seleccionó una muestra de 20 participantes involucrados en actividades de cultivos piscícolas. Se aplicaron dos pruebas: la primera enfocada en medir la rapidez de los participantes para determinar la calidad del agua, cronometrando el tiempo invertido en esa actividad; y la segunda, orientada a medir el nivel de satisfacción del participante en el uso del prototipo aplicando una encuesta basada en una escala Likert de cinco niveles. Los resultados muestran que la integración del SID en el prototipo de monitoreo de la calidad del agua tiene un impacto positivo en la usabilidad. Los usuarios reportaron una experiencia de uso significativamente mejorada y lograron determinar el estado de la calidad del agua tres veces más rápido en comparación con la información publicada en formato numérico. Este trabajo resalta la importancia de priorizar la usabilidad en la implementación de productos tecnológicos destinados al sector piscícola para facilitar su transferencia tecnológica.

Palabras clave: Acuicultura, Sistemas de Monitoreo, Lógica Difusa, Usabilidad de Sistemas.

1. Introducción

La acuicultura es una actividad primaria que se enfoca en el cultivo de organismos acuáticos. Su relevancia a nivel mundial se debe a su contribución en el aumento de los

niveles de nutrición, la conservación de especies y la generación de empleos [1].

En México, esta actividad productiva es considerada como una de las fuentes de

ingreso más importantes para los pobladores de zonas costeras con un volumen de producción de 351 mil toneladas, representando un valor en el mercado de 19 mil 933 millones de pesos, de acuerdo con el censo del año 2021 [2].

En el contexto de la actividad acuícola, la piscicultura se enfoca en el cultivo de peces en estanques artificiales. Una de las especies más cultivadas es la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*). Organismos internacionales como la FAO (*Food and Agriculture Organization*) [3] y nacionales, como la Carta Nacional Acuícola [4] han estandarizado los procedimientos de este cultivo. Ambos organismos enfatizan que la producción de esta especie, en términos de volumen y de calidad, es afectada por diversos factores, siendo la calidad del agua de los estanques de cultivo uno de los más críticos [5]. Por tanto, es crucial que, durante el ciclo de cultivo, los productores conozcan el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos que determinan esta calidad [6], lo que implica la necesidad de un monitoreo continuo para detectar valores fuera de la norma y prevenir su impacto negativo en la producción [7]. Los parámetros más importantes para el cultivo de la tilapia son la temperatura, el oxígeno disuelto, el pH y la salinidad [8]. La estrategia más común es evaluarlos directamente en el agua de los estanques mediante diversos sistemas y métodos.

En las granjas piscícolas se utilizan comúnmente dos enfoques para monitorear los parámetros de calidad del agua. El primer método es manual, con sus desventajas

naturales, implica la lectura directamente en el agua de los estanques utilizando un medidor equipado con sensores que registran y muestran los valores en pantalla [8]. El segundo método es automatizado, permitiendo el monitoreo continuo del comportamiento, con la capacidad de detectar y notificar valores que se encuentren fuera de los rangos establecidos [9].

Ambos enfoques utilizan dispositivos que carecen de interfaces que simplifiquen la interacción con los usuarios. Estos dispositivos se limitan a proporcionar valores, lo que dificulta la interpretación y el uso oportuno de la información para la toma de decisiones [10]. Al usar estas interfaces, los usuarios se ven obligados a realizar un esfuerzo cognitivo adicional para comprender la información, lo cual tiene un impacto negativo en la interacción y representa una barrera significativa para llevar a cabo las tareas relacionadas con este proceso [11]. Esta situación fue confirmada mediante un análisis de tiempos y movimientos, complementado con una guía de observación aplicada a 10 trabajadores responsables del monitoreo en diversas granjas piscícolas situadas en la costa del estado de Colima. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 1. Como se aprecia, el porcentaje de errores cometidos al determinar la calidad del agua alcanza un 20% en un periodo de 24 horas. Además, el tiempo requerido por los empleados para realizar esta tarea es considerable, provocando omisiones en la realización de esta actividad, especialmente durante altas horas de la noche, exponiendo a riesgos al cultivo piscícola.

Tabla 1. Guía de observación y análisis de tiempos y movimientos aplicados a empleados de granjas piscícolas.

Análisis de Tiempos y Movimientos				Guía de Observación		
Empleado	Tiempo para leer el valor de los parámetros (segundos)	Tiempo para comparar el valor de los parámetros (segundos)	Tiempo para determinar la calidad del agua (segundos)	Número de errores en la interpretación de los parámetros	Número de errores en la determinación de la calidad del agua	Grado de dificultad para determinar la calidad del agua (1-5)
1	60	75	21	3	3	4
2	25	80	18	2	3	4
3	39	62	26	3	2	3
4	20	42	15	0	0	1
5	45	58	21	1	1	1
6	53	82	29	4	2	3
7	41	71	22	1	3	4
8	22	46	19	2	1	2
9	57	87	27	3	2	3
10	46	66	24	4	4	5

Fuente: Elaboración propia.

Un sistema usable debe ofrecer tanto una interfaz física como lógica que simplifique la interacción con los usuarios [11]. Los avances tecnológicos deben garantizar que incluso los usuarios con habilidades limitadas puedan utilizarlo de manera efectiva [12]. Las interfaces de los dispositivos deben diseñarse para ocultar la complejidad subyacente, facilitando su uso y apoyando la ejecución de tareas y la toma de decisiones, reduciendo así el esfuerzo cognitivo requerido para su uso [13].

Las técnicas de inteligencia artificial, en particular la lógica difusa, tiene como uno de sus objetivos simplificar la comunicación entre usuarios y sistemas, al incluir variables lingüísticas que reflejan el lenguaje utilizado por los usuarios [14], lo que resulta en una mayor facilidad en la interacción entre ambas partes.

La lógica difusa es un enfoque matemático diseñado para tratar con información imprecisa, utilizando valores de verdad que no son absolutos. A diferencia de la lógica clásica, que se basa en valores binarios (verdadero o falso), este enfoque permite manejar la incertidumbre y la imprecisión,

características comunes en muchos problemas del mundo real. Introducida por Lotfi Zadeh en 1965, esta teoría propone que las verdades pueden tener valores continuos entre 0 y 1, en lugar de ser solo verdaderas o falsas [15]. Esta técnica aborda la incertidumbre de manera efectiva, asignando grados de pertenencia a diferentes categorías en lugar de utilizar clasificaciones binarias. Esto permite una representación más flexible y precisa de la realidad [16].

A diferencia de otras estrategias para la toma de decisiones basadas en reglas de asociación, la lógica difusa permite el manejo de la incertidumbre, facilita la interpretación de los resultados y tiene una naturaleza adaptable que permite incorporar fácilmente nuevas reglas o modificar las existentes. Estas ventajas hacen que sea una herramienta valiosa en la toma de decisiones en situaciones donde la incertidumbre y la interpretación humana juegan un papel crucial [14].

Varios estudios han abordado este enfoque, aprovechando su potencial en la determinación de la calidad del agua en granjas acuícolas. Los trabajos [17], [18] y

[19] son ejemplos que demuestran el potencial de integrar la lógica difusa en los sistemas de monitoreo de la calidad del agua.

En [17], los autores implementaron un modelo de inferencia difusa tipo Mamdani en la plataforma Simulink. El modelo toma como entradas variables limnológicas como pH, temperatura, sólidos disueltos totales y niveles de oxígeno disuelto, y proporciona como salida la clasificación de la calidad del agua en excelente, buena, pobre o tóxica.

Un trabajo que considera la implementación física es [18]. Los autores desarrollaron un dispositivo de monitoreo de calidad del agua para el cultivo de tilapia. La plataforma Arduino aloja un modelo de lógica difusa tipo Mamdani y utiliza sensores para medir parámetros como pH, oxígeno disuelto y temperatura. El dispositivo evalúa la calidad del agua en tiempo real y muestra los resultados en una pantalla.

En [19], los autores describen un sistema de monitoreo en tiempo real de la calidad del agua para la producción acuícola utilizando lógica difusa. Los datos de temperatura, pH y turbidez se recopilan mediante sensores y se acceden a través de una aplicación móvil. Basado en la arquitectura de Internet de las Cosas (IoT), el sistema emplea un microcontrolador Raspberry-Pi, sensores digitales y módulos inalámbricos. Se utilizan funciones de pertenencia trapezoidales y triangulares para evaluar la calidad del agua, logrando un 72% de concordancia con expertos humanos.

En resumen, los trabajos [17], [18] y [19] implementan un sistema de inferencia difusa y, en algunos casos, lo integran en un sistema físico de monitoreo de parámetros de calidad

del agua. Sin embargo, los autores no consideran las pautas de usabilidad al no incorporar una interfaz que simplifique la interpretación de la información de salida. Estos trabajos se limitan a mostrar la calidad del agua en formato de texto en una pantalla. Aunque esto simplifica la comprensión de la calidad del agua, este formato presenta desventajas para el usuario, como la necesidad de colocar la pantalla a una distancia cercana para facilitar su lectura y la dependencia de las condiciones ambientales de luminosidad. Consecuentemente, este trabajo busca contribuir a la mejora de la usabilidad de los sistemas de monitoreo de la calidad del agua.

Este artículo aborda la oportunidad de mejora de los sistemas de monitoreo al integrar un semáforo que describe la calidad del agua utilizando un código de colores, en lugar de reportar valores numéricos de los indicadores. Con esta innovación, el usuario visualiza una respuesta luminosa, correspondiendo el color rojo a una calidad "mala", el amarillo a una calidad "regular" y el verde a una calidad "buena". Esta mejora en la usabilidad se logra mediante la integración de un Sistema de Inferencia Difusa (SID) en un prototipo de monitoreo de calidad del agua.

2. Materiales y métodos experimentales

La arquitectura conceptual está conformada por tres módulos funcionales que describen el prototipo de monitoreo integrado con el SID. Estos módulos cumplen la función del monitoreo de los parámetros de calidad del agua, el procesamiento del SID y la publicación. La Figura 1 muestra la arquitectura conceptual del prototipo.

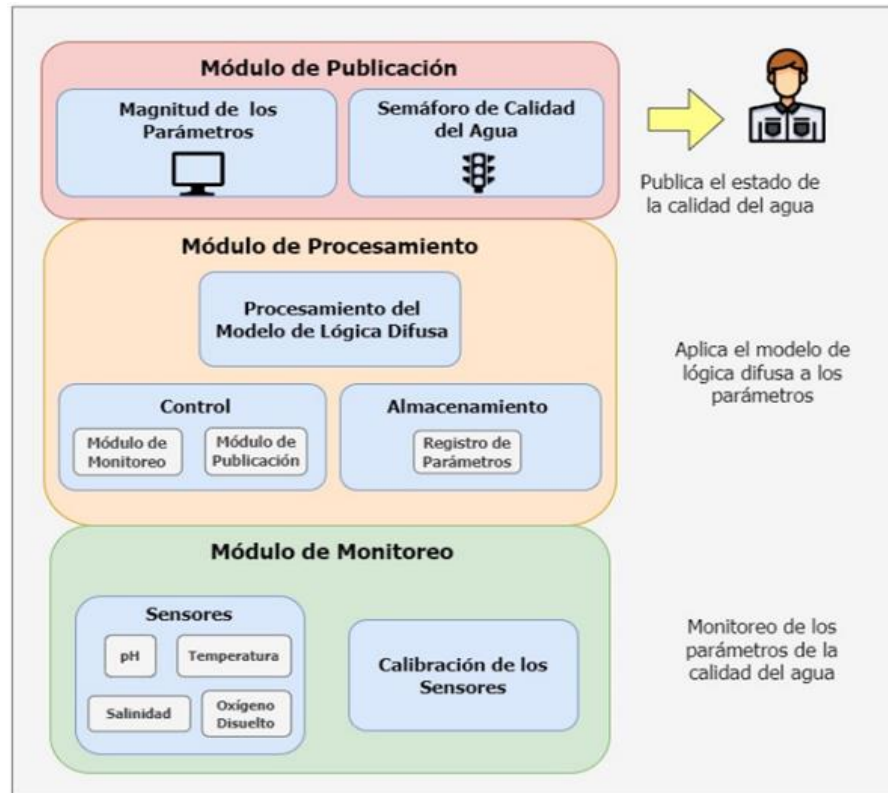


Figura 1. Arquitectura conceptual del prototipo.

Fuente: Elaboración propia.

Referente al procesamiento de información para la toma de decisiones (diseño del SID), se empleó el software Matlab R2020b [20]. Finalmente, se realizaron pruebas de usabilidad para validar el objetivo de este trabajo.

2.1 Módulo de monitoreo

La función de este módulo es adquirir los valores de los cuatro parámetros que determinan la calidad del agua de los estanques de cultivo: temperatura, oxígeno disuelto, pH y salinidad. Para obtener sus valores, se utilizaron cuatro sensores de la marca "Atlas Scientific" [21], que ha mostrado alto desempeño en la medición de estas variables fisicoquímicas en tanques de crianza de tilapia [22]. Para comunicar los sensores con el módulo de control, se utilizó el protocolo I²C (por sus siglas en inglés, Inter-Integrated Circuit).

2.2 Módulo de procesamiento

Este módulo consta de dos etapas. La primera etapa registra y almacena los valores de los parámetros censados, junto con su correspondiente marca de tiempo (fecha, hora e identificador de estanque). La segunda etapa aplica el SID para transformar estos valores numéricos en valores cualitativos y publicarlos en el semáforo de calidad del agua. La funcionalidad del SID se describirá más adelante.

El componente principal de este módulo es la tarjeta de desarrollo Arduino Mega 2560. El microcontrolador de esta tarjeta cumple con los requisitos de procesamiento, memoria y número de puertos de entrada/salida necesarios. Para gestionar la fecha y la hora, se utilizó una unidad de tiempo real (RTC, por sus siglas en inglés), y los valores de los indicadores se almacenan en un módulo de memoria microSD.

2.3 Módulo de publicación

Para informar el estado de la calidad del agua, este módulo publica en dos formatos adaptados a diferente perfil de usuario con el objetivo de incrementar la usabilidad del prototipo. Uno de los formatos utiliza como dispositivo de salida una pantalla LCD para imprimir el valor de los parámetros. El otro formato se basa en la señalización luminosa implementada con un semáforo. Cada color representa un estado de la calidad del agua; siendo rojo para una “mala” calidad, amarillo para una calidad “regular” y verde para una “buena” calidad.

2.4 Sistema de inferencia difusa tipo Mamdani

En este trabajo se empleó el SID tipo Mamdani [23] para interpretar el valor de cada parámetro fisicoquímico adquirido en el cuerpo de agua. Para este fin, el SID aplica un conjunto de reglas difusas y proporciona como información de salida la calidad del agua en tres etiquetas lingüísticas: “mala”, “regular”, “buena”. Para el diseño de las funciones de membresía de cada variable de entrada en el SID, se utilizaron los rangos

recomendados para la especie Tilapia del Nilo, los cuales se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Rangos recomendados para la Tilapia del Nilo.

Parámetro	Rango óptimo	Referencias
<i>Temperatura (°C)</i>	25 - 32	[24, 25, 26]
<i>Oxígeno Disuelto (mg/l)</i>	3 - 9	
<i>pH</i>	6.5 - 8.5	
<i>Salinidad (ppm)</i>	10 - 25	

Fuente: Elaboración propia.

Las funciones de membresía utilizadas en el SID, tanto en las entradas como en la salida, son del tipo trapezoidal. Este tipo de función se caracteriza por una transición adaptable entre el valor máximo y mínimo de pertenencia. La Figura 2 muestra las funciones de membresía definidas para el parámetro temperatura con sus respectivos rangos. Las Tablas 3 y 4 detallan las características de las funciones de membresía para las entradas y la salida del SID, respectivamente.

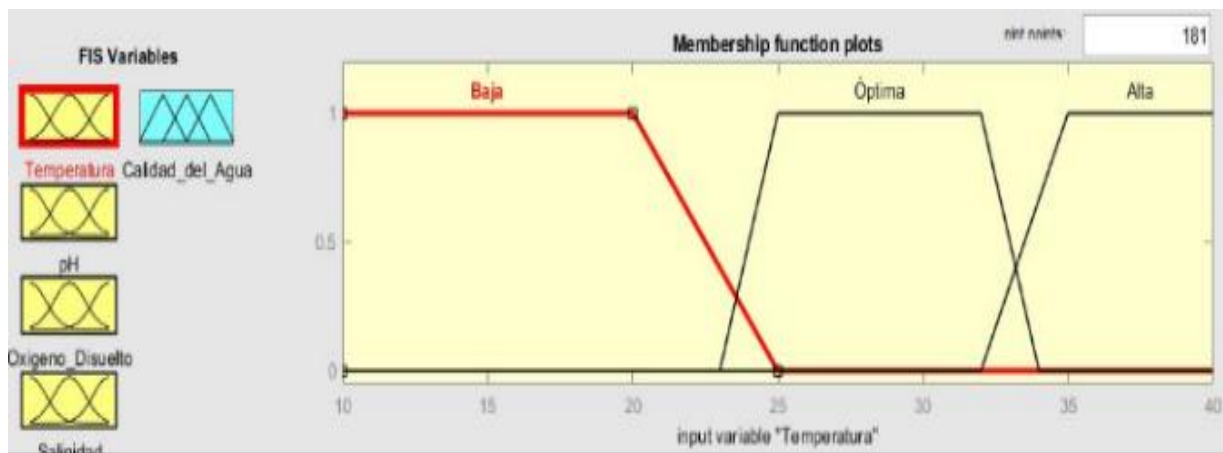


Figura 2. Funciones de membresía del parámetro temperatura. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Funciones de membresía para las entradas del SID.

Variable	Rango	Etiqueta / Parámetro	Etiqueta / Parámetro	Etiqueta / Parámetro
<i>Temperatura (°C)</i>	10 - 40	Baja / [10 10 20 25]	Óptima / [23 25 32 34]	Alta / [32 35 40 40]
<i>Oxígeno Disuelto (mg/l)</i>	0 - 12	Bajo / [0 0 3 5]	Óptima / [4 6 8 10]	Alto / [9 10 12 12]
<i>pH</i>	0 - 14	Ácido / [0 0 5 6.5]	Óptimo / [6 7 8 9]	Alcalino / [8.5 10 14 14]
<i>Salinidad (ppm)</i>	0 - 40	Baja / [0 0 5 10]	Óptima / [5 10 20 25]	Alta / [20 25 40 40]

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Funciones de membresía para la salida del SID.

SID	Variable: Calidad del Agua		
	Rango: 0 - 10		
	Etiqueta / Parámetro	Etiqueta / Parámetro	Etiqueta / Parámetro
<i>Mamdani</i>	Mala / [0 0 2.5 4]	Regular / [3 4 6 7]	Buena / [6 7.5 10 10]

Fuente: Elaboración propia.

en el conocimiento y la experiencia adquirida por expertos en cultivos acuícolas. Asimismo, se consideró el nivel de importancia de cada parámetro, teniendo en cuenta su relación con la especie. Se establecieron 81 reglas que abarcan las combinaciones de las funciones de membresía de las entradas y la salida. La Figura 3 presenta un subconjunto de las reglas diseñadas.

El diseño de las reglas difusas se fundamentó

1. If (Temperatura is Baja) and (pH is Ácido) and (Oxígeno_Disuelto is Bajo) and (Salinidad is Baja) then (Calidad_del_Agua is Mala) (1)
2. If (Temperatura is Baja) and (pH is Ácido) and (Oxígeno_Disuelto is Bajo) and (Salinidad is Óptima) then (Calidad_del_Agua is Mala) (1)
3. If (Temperatura is Baja) and (pH is Ácido) and (Oxígeno_Disuelto is Bajo) and (Salinidad is Alta) then (Calidad_del_Agua is Mala) (1)
-
-
-
79. If (Temperatura is Alta) and (pH is Alcalino) and (Oxígeno_Disuelto is Alto) and (Salinidad is Óptima) then (Calidad_del_Agua is Mala) (1)
80. If (Temperatura is Alta) and (pH is Alcalino) and (Oxígeno_Disuelto is Alto) and (Salinidad is Alta) then (Calidad_del_Agua is Mala) (1)
81. If (Temperatura is Alta) and (pH is Alcalino) and (Oxígeno_Disuelto is Bajo) and (Salinidad is Alta) then (Calidad_del_Agua is Mala) (1)

Figura 3. Subconjunto de reglas difusas del SID. Fuente: Elaboración propia.

La integración del SID en la representación lógica de los bloques funcionales del prototipo de monitoreo se muestra en la Figura 4. En esta representación lógica se secciona las tareas del prototipo en entradas,

procesamiento con las reglas difusa y la salida, integrando el SID en cada una de estas secciones y visualizando su aportación en cada tarea.

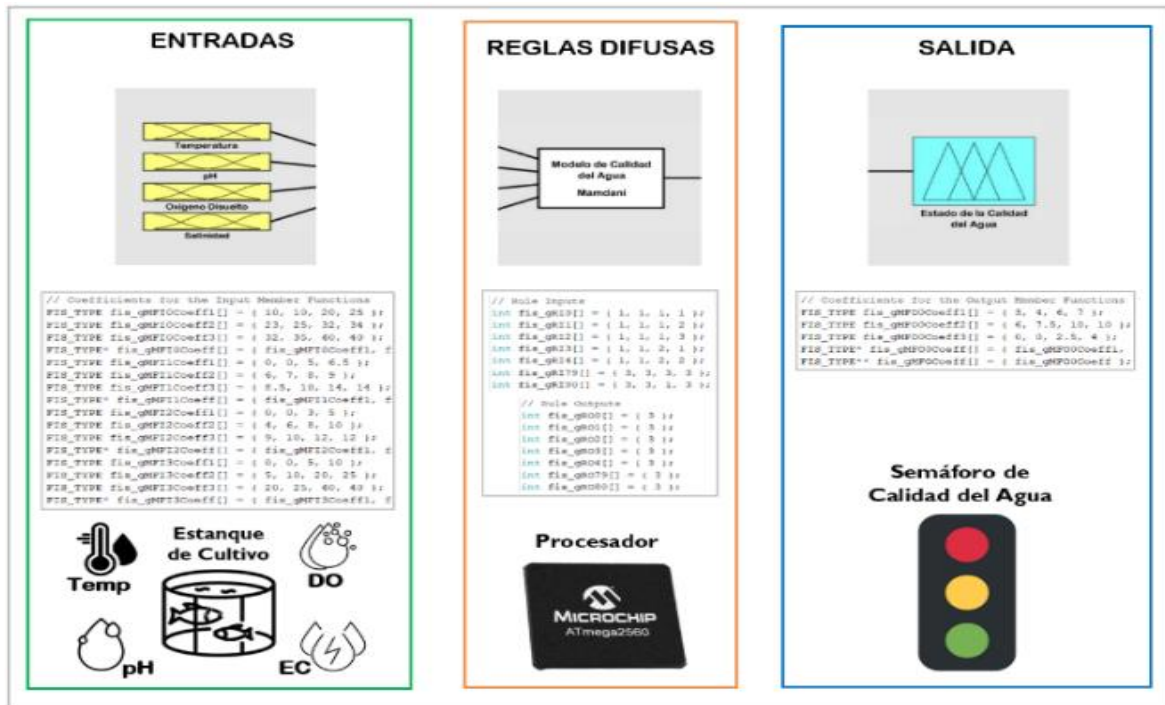


Figura 4. Integración del SID en el prototipo de monitoreo. Fuente: Elaboración propia.

2.5 Despliegue del SID en la plataforma Arduino

Una vez de implementado el SID en el entorno de MATLAB, se procedió a su migración a código utilizando el lenguaje

Arduino C mediante la herramienta Arduino FIST [27]. La Figura 5 muestra el prototipo físico integrado con el SID y los módulos de monitoreo y publicación en semáforo y pantalla.

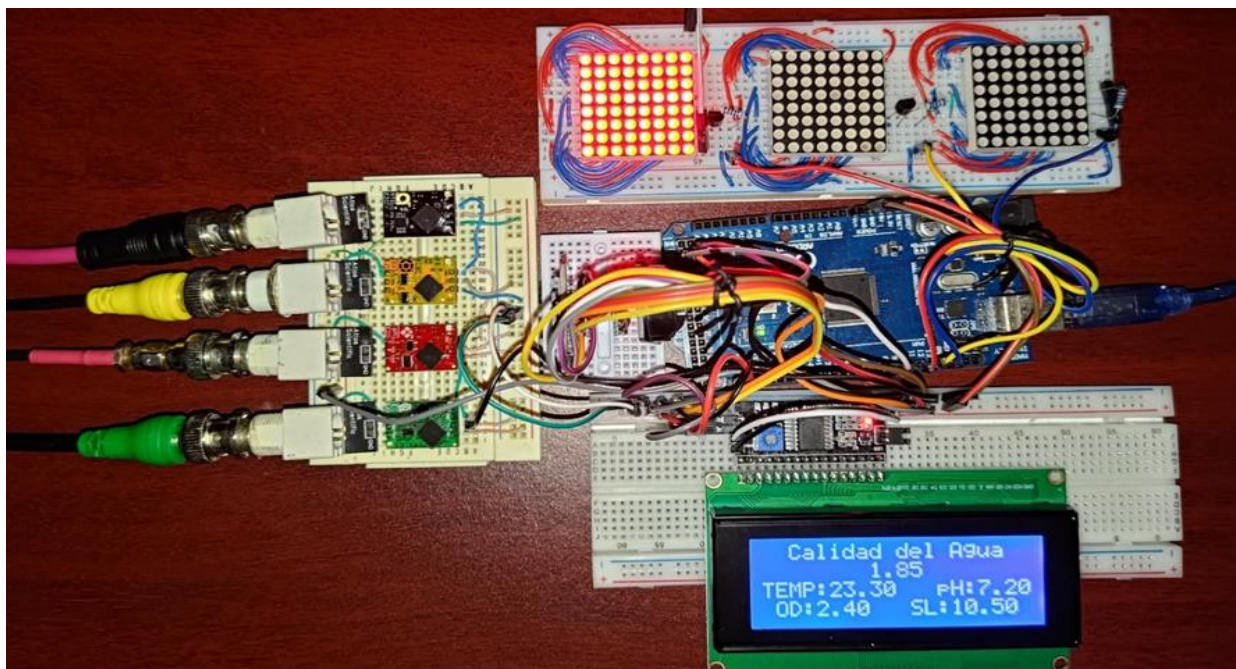


Figura 5. Prototipo físico integrado con el SID y los módulos de monitoreo y publicación en semáforo y pantalla. Fuente: Elaboración propia.

3. Discusión de resultados

Para evaluar el funcionamiento del prototipo, se diseñó y aplicó un conjunto de pruebas orientadas a evaluar la mejora de la usabilidad, así como el funcionamiento del SID.

3.1 Validación del SID

El objetivo de esta prueba es evaluar el funcionamiento del SID con respecto a la variabilidad de los parámetros. El material utilizado consta de un recipiente de 18 litros llenado con una muestra de agua de cultivo piscícola y el módulo de monitoreo integrado

con el SID.

El procedimiento de la prueba incluyó la inmersión de las sondas y la realización de modificaciones controladas de las variables del agua. Para este propósito, se añadió cloruro de sodio para aumentar la salinidad, ácido cítrico para alterar el pH. Asimismo, se empleó un agitador para variar la concentración de oxígeno disuelto, y finalmente, se modificó la temperatura del agua mediante la adición de hielo al recipiente. La Tabla 5 describe los resultados obtenidos de esta prueba.

Tabla 5. Resultados de la validación del SID.

Modificación	Magnitud de los Parámetros				Resultado del SID	Resultado Experto	Salida con Semáforo
	Temp. (°C)	pH	OD (mg/l)	Sal. (ppm)	Calidad del Agua		
Se agregó cloruro de sodio	25.3	7.2	4.5	40	Regular	Regular	
Se agregó ácido cítrico	25.1	5.6	5.2	10	Regular	Regular	
Se agitó el agua	25.4	7.3	8.4	12	Buena	Buena	
Se disminuyó la temperatura	19.6	7.1	3.7	8	Mala	Mala	

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 5, las modificaciones efectuadas a los parámetros alteraron el estado de la calidad del agua, una situación que se manifiesta en el entorno operativo en los estanques piscícolas y que fue detectada por el prototipo de monitoreo. Esta información se comunicó mediante los dos canales de salida: el primero que muestra el valor de los datos, y el segundo que representa el estado de la calidad del agua mediante el semáforo. Este resultado, contrastado con la interpretación de un experto humano, validó el funcionamiento del SID.

3.2 Prueba de usabilidad

El objetivo de esta prueba está orientado a evaluar la mejora de la usabilidad en el

prototipo de monitoreo con la integración del SID, centrándose en la facilidad con la que el usuario puede interpretar el estado de la calidad del agua.

La aplicación de la prueba se basó en el siguiente procedimiento:

- Selección de participantes: Se seleccionó una muestra de 20 participantes, considerando como único criterio que desarrollen actividades relacionadas con los cultivos piscícolas. Cabe mencionar que para esta muestra no se consideró al personal técnico. Esto debido a que este tipo de usuario requiere necesariamente conocer los valores de los parámetros de la calidad del agua.

- Escenario de uso: Para llevar a cabo el conjunto de pruebas, se presentó a los usuarios la salida del prototipo de monitoreo con valores y, como contraparte, la salida del prototipo de monitoreo integrado con el SID, visualizada mediante el semáforo que indica la calidad del agua.
- Desarrollo de las pruebas: Se les pidió a los usuarios que identificaran la calidad del agua interpretando ambas salidas. Para recolectar los datos, se elaboró una bitácora de usabilidad, registrando el tiempo de respuesta que le tomó a cada participante interpretar la calidad del agua al observar la información de salida. Además, a cada uno de ellos, se le aplicó una encuesta de usabilidad para evaluar la experiencia de uso. Las preguntas de la encuesta se diseñaron utilizando la escala de Likert [28], conformada por cinco preguntas con cinco niveles de respuesta. La Tabla 6 muestra el diseño de la encuesta de usabilidad.
- Análisis de datos. Para contrastar la usabilidad de ambas salidas, se realizó un análisis estadístico a los resultados recabados de la escala de Likert.

Tabla 6. Diseño de la encuesta de usabilidad.

Encuesta de usabilidad			
Parámetro de usabilidad	Descripción de la pregunta	Respuestas	Ponderación numérica
Facilidad de aprendizaje	¿Qué tan fácil fue para ti usar el sistema de monitoreo por primera vez para consultar la calidad del agua?	Muy fácil	5
		Fácil	4
		Ni fácil ni difícil	3
		Difícil	2
		Muy difícil	1
Eficiencia	¿Cómo evaluarías el tiempo que te tomó interpretar la calidad del agua al utilizar el sistema?	Muy rápido	5
		Rápido	4
		Ni rápido ni lento	3
		Lento	2
		Muy lento	1
Recordación	¿Crees que el uso del sistema es fácil de recordar para un posterior uso?	Muy fácil de recordar	5
		Fácil de recordar	4
		Ni fácil ni difícil de recordar	3
		Difícil de recordar	2
		Muy difícil de recordar	1
Satisfacción del usuario	En una escala del 1 al 5, ¿qué tan satisfecho te sientes al utilizar el sistema?	Totalmente satisfecho	5
		Satisfecho	4
		Neutral	3
		Insatisfecho	2
		Totalmente insatisfecho	1
Accesibilidad	En tu opinión, ¿consideras que el sistema es accesible para personas con discapacidades?	Muy inaccesible	1
		Inaccesible	2
		Normal	3
		Accesible	4
		Muy accesible	5

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Tiempo de interpretación de la calidad del agua de ambos sistemas

Se aplicó la prueba *t de Student* [29] que reporta la comparación de las medias obtenidas del tiempo empleado por el usuario para interpretar el estado de la calidad del agua de cultivo. Teniendo en cuenta que este intervalo es fundamental cuando se presentan, por ejemplo, valores bajos de oxígeno disuelto con respecto a la norma del cultivo. Si el usuario solamente percibe los valores de los parámetros, puede cometer errores en la interpretación y retardar la acción correctiva con la consiguiente afectación al cultivo.

La Tabla 7 y la Figura 6 presentan la comparación del tiempo que los usuarios dedicaron para interpretar el estado de la calidad del agua al consultar la información de salida. Como se puede observar, los usuarios que utilizaron el prototipo de monitoreo integrado con el SID, que incluye el semáforo de calidad del agua, lograron completar esta tarea tres veces más rápido.

Tabla 7. Resultados del tiempo de interpretación de la calidad del agua.

Tiempo de Interpretación de la Calidad del Agua		
Métricas	Sistema Convencional	Sistema Integrado con SID
Media	13.53	3.36
Desviación estándar	3.56	0.86
Mínimo	8.45	2.03
Primer cuartil (25%)	10.76	2.77
Segundo cuartil (50%)	13.16	3.14
Tercer cuartil (75%)	17.46	4.14
Máximo	18.92	4.82

Fuente: Elaboración propia.

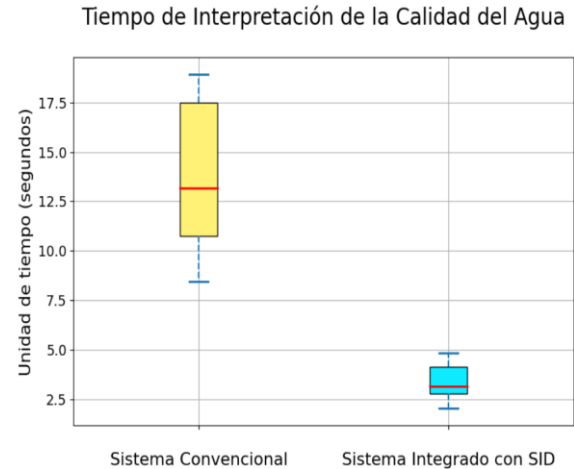


Figura 6. Resultados del tiempo de interpretación invertido en ambas salidas.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la gráfica, los usuarios al utilizar el prototipo integrado con el SID mostraron un tiempo de interpretación considerablemente menor, tanto en promedio como en todos los cuartiles, en comparación con la salida basada en valores de los parámetros. Estos resultados indican una mejora significativa en el tiempo de interpretación de la calidad del agua al utilizar el prototipo integrado con el SID, aspecto que favorece la oportuna toma de decisiones con respecto al estado del agua de cultivo en granjas piscícolas.

3.2.2 Desempeño de usabilidad

Se utilizó la prueba de *Mann-Whitney* [30] para analizar el conjunto de respuestas de la encuesta aplicada con el fin de obtener una visión integral del desempeño de usabilidad experimentado por el usuario al interactuar con ambas salidas. Se tuvieron en cuenta los siguientes indicadores de usabilidad: facilidad de aprendizaje, eficiencia, recordación, satisfacción del usuario y accesibilidad. Estos indicadores fueron seleccionados por su representatividad del perfil de usuario, que en este caso corresponde a los empleados de las granjas piscícolas.

La Figura 7 describe los resultados de la encuesta de usabilidad que describen la experiencia del usuario al interactuar con ambas salidas. Los usuarios que utilizaron el prototipo de monitoreo integrado con el SID, el cual incluye el semáforo de calidad del agua, informaron de una experiencia de usabilidad más significativa en comparación con el prototipo de monitoreo que muestra los valores de los parámetros.

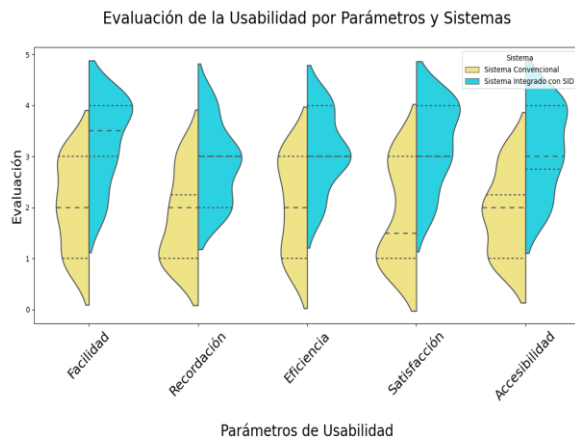


Figura 7. Resultados de la encuesta de usabilidad.
Fuente: Elaboración propia.

La gráfica muestra una preferencia por el prototipo integrado con SID en los indicadores de usabilidad evaluados. Este prototipo recibió evaluaciones más altas en cada aspecto, indicando una mejor percepción de la usabilidad en comparación con el prototipo basado en los valores de los parámetros. Esto se refleja en la posición relativa de los violines y la distribución de sus densidades.

3.3 Análisis de resultados de la prueba de usabilidad

Los resultados de estas pruebas validan el objetivo de este trabajo al mejorar la usabilidad del prototipo de monitoreo de la calidad del agua en cultivos piscícolas. Se demuestra que la incorporación de un SID en los sistemas de monitoreo tiene un impacto positivo en la mejora de la usabilidad. Esto se logra al adaptar el formato de la

comunicación de resultados para usuarios con distintos perfiles. Al representar la inferencia difusa mediante el código de colores del semáforo, se simplifica la interpretación de la calidad del agua en diversas condiciones de iluminación y distancia. Bajo estas condiciones, un usuario puede fácilmente evaluar la calidad del agua de un estanque de cultivo.

La implementación del SID simplifica la operación de los sistemas de monitoreo, al ofrecer información útil y fácil de comprender. Esto respalda la toma de decisiones oportunas relacionadas con la calidad del agua en la piscicultura, evitando que los usuarios se vean obligados a memorizar datos técnicos o de referencia. Estas características diferencian esta solución de otras alternativas que solo proporcionan valores de parámetros como información de salida, lo que dificulta la interpretación de la calidad del agua.

4. Conclusiones

Este trabajo reporta la integración de un sistema de inferencia difusa a un prototipo de monitoreo de la calidad del agua de cultivos piscícolas. Esta innovación se materializa en un formato de presentación visual, representado por un semáforo de calidad del agua diseñado para proporcionar accesibilidad a usuarios con diferentes perfiles. Este mecanismo ofrece una identificación rápida e intuitiva de la calidad del agua para el personal de granjas piscícolas, mejorando significativamente la usabilidad, reduciendo el número de errores y favoreciendo la toma oportuna de decisiones.

La integración del sistema de inferencia difusa al prototipo de monitoreo, en contraste con los métodos convencionales basados en la publicación de magnitud de parámetros, oculta la complejidad del funcionamiento interno del prototipo y contribuye a

incrementar la usabilidad. Esto permite un uso simple e intuitivo para el usuario, lo que resulta en una mayor eficiencia en la realización de esta actividad.

Este desarrollo evidencia las ventajas potenciales derivadas de los avances tecnológicos enfocados en la usabilidad. Esta característica contribuye a reducir la resistencia de los usuarios a la adopción de los productos tecnológicos, simplificando el proceso de transferencia de tecnología.

Trabajos futuros se enfocarán en identificar y satisfacer los requisitos funcionales necesarios para el despliegue de este prototipo en un entorno real. Se considerarán aspectos como el diseño del contenedor del sistema embebido, la comunicación, la autonomía energética y la tolerancia a fallas.

5. Referencias bibliográficas

- [1] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). *Acuicultura, producción y conservación de organismos acuáticos*. Gobierno de México. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/acuicultura-produccion-y-conservacion-de-organismos-acuaticos>
- [2] Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca. (2021). *Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca 2021*. Gobierno de México. Disponible en: https://nube.conapesca.gob.mx/sites/cona/dgppe/2021/ANUARIO_ESTADISTICO_DE_ACUACULTURA_Y_PESCA_2021.pdf
- [3] FAO. (2009). *FAO - Oreochromis niloticus*. FAO. Disponible en: https://www.fao.org/fishery/docs/DOCUMENT/aquaculture/CulturedSpecies/file/es/es_niletlapia.htm
- [4] Instituto Nacional de Pesca. (2021). *Carta Nacional Acuícola 2021*. Gobierno de México. Disponible en: <http://www.gob.mx/inapesca/documentos/carta-nacional-acuicola-2021>
- [5] FAO. (2016). *Mejora de la calidad de agua en los estanques*. FAO. Disponible en: https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6709s/x6709s02.htm
- [6] FAO. (2011). *Desarrollo de la acuicultura*. FAO. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i1750s/i1750s.pdf>
- [7] Boyd, C. E. (2017). "Chapter 6 - General Relationship Between Water Quality and Aquaculture Performance in Ponds". *Fish Diseases*, G. Jeney, Ed., Academic Press, pp. 147-166. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804564-0.00006-5>
- [8] Verduzco-Ramírez, J. et al. (2019). "Dispositivo portátil para monitoreo de calidad del agua en granjas acuícolas de camarón". *Ingenierías*, 2(2), pp. 54-59.
- [9] Olivo-Gutiérrez, M. et al. (2018). "Prototipo para el monitoreo automatizado de parámetros de calidad del agua en una granja de camarón". *Científica*, 22(2), pp. 87-95.
- [10] Susanti, N. D., Sagita, D., Apriyanto, I. F., Anggara, C. E. W., Darmajana, D. A., & Rahayuningtyas, A. (2022). "Design and implementation of water quality monitoring system (temperature, pH, TDS) in aquaculture using iot at low cost". *6th International Conference of Food, Agriculture, and Natural Resource (IC-FANRES 2021)*, pp. 7-11. <https://doi.org/10.2991/absr.k.220101.002>
- [11] Coutaz, J. (1990). "Interfaces homme-ordinateur: conception et réalisation". Bordas.
- [12] Crowley, J. L., Coutaz, J., Rey, G. &

Reignier, P. (2002). "Perceptual Components for Context Aware Computing". *UbiComp 2002: Ubiquitous Computing*. In Borriello, G., Holmquist, L. E. (eds), *Lecture Notes in Computer Science*, vol 2498. Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/3-540-45809-3_9

ISO 9241-11:2018. (2018). *Ergonomics of human-system interaction—Part 11: Usability: Definitions and concepts*. ISO. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9241:-11:ed-2:v1:en>

[14] Hellmann, M. (2001). *Fuzzy logic introduction*. Université de Rennes, 1(1).

[15] Zadeh, L. A. (1965). "Fuzzy sets". *Information and Control*, 8(3), pp. 338-353.

[16] Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller". *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), pp. 1-13.

[17] Bautista, M. G. A. et al. (2022). "Fuzzy Logic-Based Adaptive Aquaculture Water Monitoring System Based on Instantaneous Limnological Parameters". *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 26, pp. 937-943. doi: 10.20965/jaciii.2022.p0937

[18] Molato, M. R. D. (2022). "AquaStat: An Arduino-based Water Quality Monitoring Device for Fish Kill Prevention in Tilapia Aquaculture using Fuzzy Logic". *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 13(2). doi: 10.14569/IJACSA.2022.0130265

[19] Bokingito, P. B., & Caparida, L. T. (2018). "Using Fuzzy Logic for Real – Time Water Quality Assessment Monitoring System". *Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Automation,*

Control and Robots, pp. 21-25. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. doi: 10.1145/3293688.3293695.

[20] The MathWorks, Inc. (s.f.). *MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink*. MathWorks. Disponible en: <https://www.mathworks.com/>

[21] Atlas Scientific. (s.f.). *Atlas Scientific | Environmental Robotics*. Atlas Scientific. Disponible en: <https://atlas-scientific.com>

[22] Barajas Corona, J. de D. (2020). *Sistema de medición y gestión integral de la trazabilidad interna del cultivo del camarón*. Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México. Disponible en: <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/1500>

[23] Utnasari, I., & Putria, N. E. (2021). "Weather Determination Prediction Using Expert Fuzzy Logic Mamdani Method". *IJISTECH (International Journal of Information System and Technology)*, 5(4), 518-525.

[24] Boyd, C. E. (1998). *Water Quality for Pond Aquaculture*. International Center for Aquaculture and Aquatic Environments. Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University.

[25] Siriwardena, S. N., Nasr-Allah, A. M. & Olaniyi, A. A. (2022). *Water quality management*. WorldFish. Disponible en: <https://digitalarchive.worldfishcenter.org/handle/20.500.12348/5471>

[26] Instituto Nacional de Pesca. (2018). *Acuacultura Tilapia*. Gobierno de México. Disponible en: <http://www.gob.mx/inapesca/acciones-y-programas/acuacultura-tilapia>

[27] MakeProto. (2012). *Arduino FIST:*

MATLAB Fuzzy Inference System to Arduino Conversion. MakeProto. Disponible en: http://www.makeproto.com/projects/fuzzy/matlab_arduino_FIST/index.php

[28] Likert, R. (1932). "A technique for the measurement of attitude". *Archives of Psychology*, 140, 5-55.

[29] Mishra, P., Singh, U., Pandey, C. M., Mishra, P., & Pandey, G. (2019). "Application of student's t-test, analysis of variance, and covariance". *Annals of Cardiac Anaesthesia*, 22(4), 407.

[30] McKnight, P. E., & Najab, J. (2010). "Mann-Whitney U Test". *The Corsini Encyclopedia of Psychology*, 1-1.