

Portable Traffic Lights to Manage Traffic on Roads Restricted by Roadworks in the City of Arequipa

Andre Lazo-Villavicencio, Bach¹, Jose Lima-Filinich, Bach², Miranda Benavente-Huaco, Bach³, Jaime Villegas-Medina, Mg.⁶, Paola Meza-Gomez, Mg⁴, Edmundo Aparicio-Maldonado, Mg⁵, José Esquicha-Tejada, Dr⁷
Universidad Católica de Santa María, Peru,
¹andre.lazov@estudiante.ucsm.edu.pe, ²jose.limaf@estudiante.ucsm.edu.pe, ³miranda.benavente@estudiante.ucsm.edu.pe, ⁴jvillegasmedina@ucsm.edu.pe, ⁵pmezag@estudiante.ucsm.edu.pe, ⁶eparicio@ucsm.edu.pe, ⁷jesquicha@ucsm.edu.pe

Abstract – *This project proposes a smart, portable traffic light system based on IoT technology to optimize vehicle flow in construction zones in Arequipa, Peru. Traditional manual traffic control methods, such as "Stop" and "Go" signs, are inefficient and lead to congestion, delays, and safety risks. The proposed solution consists of two wirelessly synchronized portable traffic lights equipped with computer vision cameras (Raspberry Pi + OpenCV) for real-time traffic analysis. Each unit features a mobile wheeled structure, vibration and gyroscope sensors for anti-vandalism detection, and LoRa modules for long-range communication. The system is powered by four 100W solar panels and rechargeable batteries, ensuring 48 hours of autonomous operation. A mobile app allows remote monitoring and manual control. Field surveys revealed that 60% of drivers experience high stress due to construction-related traffic, with 93% reporting significant delays. The system is projected to reduce wait times by 20%, addressing inefficiencies in current methods. Cost analysis shows comparable expenses to hiring flaggers (10,130 vs. 9,600 Peruvian soles for 4 months), but with long-term savings due to reusability and automation. The solution is technically viable, socially accepted, and scalable to other regions with similar challenges.*

Keywords – *Automated system, portable traffic light, invention, vehicle flow control, construction works*

Semáforos Portátiles para Ordenar el Tránsito en Vías Restringidas por Obras Viales en la Ciudad De Arequipa

Andre Lazo-Villavicencio, Bach¹, Jose Lima-Filinich, Bach², Miranda Benavente-Huaco, Bach³, Jaime Villegas-Medina, Mg.⁶, Paola Meza-Gomez, Mg.⁴, Edmundo Aparicio-Maldonado, Mg.⁵, José Esquicha-Tejada, Dr.⁷
Universidad Católica de Santa María, Peru,

¹andre.lazov@estudiante.ucsm.edu.pe, ²jose.limaf@estudiante.ucsm.edu.pe, ³miranda.benavente@estudiante.ucsm.edu.pe, ⁴jvillegasmedina@ucsm.edu.pe, ⁵pmezag@estudiante.ucsm.edu.pe, ⁶eparicio@ucsm.edu.pe, ⁷jesquicha@ucsm.edu.pe

Este proyecto propone un sistema de semáforos inteligente y portátil basado en la tecnología IoT para optimizar el flujo vehicular en zonas de construcción en Arequipa, Perú. Los métodos tradicionales de control manual del tráfico, como las señales de «Stop» y «Go», son ineficientes y provocan atascos, retrasos y riesgos para la seguridad. La solución propuesta consiste en dos semáforos portátiles sincronizados de forma inalámbrica y equipados con cámaras de visión por ordenador (Raspberry Pi + OpenCV) para el análisis del tráfico en tiempo real. Cada unidad cuenta con una estructura móvil con ruedas, sensores de vibración y giroscopio para la detección antivandálica, y módulos LoRa para la comunicación de largo alcance. El sistema funciona con cuatro paneles solares de 100 W y baterías recargables, lo que garantiza 48 horas de funcionamiento autónomo. Una aplicación móvil permite la supervisión remota y el control manual. Las encuestas sobre el terreno revelaron que el 60 % de los conductores experimentan un gran estrés debido al tráfico relacionado con la construcción, y el 93 % declaran retrasos significativos. Se prevé que el sistema reduzca los tiempos de espera en un 20%, subsanando las deficiencias de los métodos actuales. El análisis de costes muestra gastos comparables a la contratación de banderilleros (10.130 frente a 9.600 soles durante 4 meses), pero con ahorros a largo plazo gracias a la reutilización y la automatización. La solución es técnicamente viable, socialmente aceptada y escalable a otras regiones con retos similares.

Palabras clave - Sistema automatizado, semáforo portátil, invención, control del flujo de vehículos, obras de construcción.

I. INTRODUCCIÓN

Durante obras de construcción el tráfico vehicular es controlado por los constructores con letreros de “Pare” y “Siga, lo que efectúa una deficiencia hacia el constructor y hacia el control de flujo vehicular ya que los mismos constructores no presentan una capacitación sobre el control del tráfico. En el Perú existen diversos casos donde la obstrucción de las vías a causa de obras ocasionó accidentes, por ejemplo, en Tacna que un trabajador edil fue atropellado por un bus debido al caos vehicular que se generó [1]. Gracias a este tipo de problema se

ideó esta alternativa para que el flujo del tráfico en obras de construcción sea automatizado sin generar algún tipo de ineficiencia por parte del constructor, ni el control vehicular. Respecto a nuestra solución, presenta diferentes componentes que con el uso del IoT funcionaría automatizada mente, además como sabemos en Arequipa hay bastante sol durante todo el año, con un promedio de 10 horas de sol por día, cabe destacar que en verano es prácticamente un clima árido [2], incluso el Ministerio de Energía de Minas (Perú), aprobó una concesión hacia una empresa Internacional (Continua Energías Positivas) en el año 2020 el poder realizar distintos proyectos solares en Arequipa [3]. Además, durante el 2024 en Arequipa se iniciaron 13 obras para la atención de distintas necesidades existentes en los ciudadanos, por otro lado 12 obras ya fueron terminadas; además en la actualidad el gobierno regional de Arequipa en este momento está ejecutando un total de 118 obras, donde 58 son por administración directa y 60 son por contratos [4]. Teniendo en cuenta estas consideraciones, nuestro sistema incorpora paneles fotovoltaicos para garantizar autonomía energética, además de optimizar la gestión del tránsito en vías afectadas por obras. Esta necesidad es evidente en proyectos como el mejoramiento de la Carretera Variante Uchumayo [5], la habilitación de rutas alternas en el mismo tramo [6], y las acciones para mitigar interferencias en sistemas de riego [7], donde la movilidad se ve severamente impactada.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento urbano y la constante necesidad de mantenimiento y ampliación de infraestructura vial en ciudades como Arequipa han generado un aumento significativo en la realización de obras de construcción [8]. Estas obras, aunque son necesarias, suelen restringir temporalmente uno o más carriles de circulación, lo que genera problemas de tráfico vehicular. A nivel global, la gestión del tránsito en zonas de obra es un desafío que enfrentan muchas ciudades, y Arequipa no es la excepción [9]. La falta de sistemas eficientes para regular el flujo vehicular en estas áreas no solo causa congestión y retrasos, sino que también incrementa los riesgos de

accidentes y afecta la calidad de vida de los conductores y peatones.

En la carretera PE-34A, tramo afectado por obras de ampliación, [10] documentó demoras que sobrepasan los 90 segundos por vehículo en las intersecciones donde solo se emplearon desvíos manuales y conteos ocasionales [11].

La ausencia de semáforos portátiles inteligentes impide ajustar los ciclos de luz a la variabilidad del tránsito,

ocasionando congestión e ineficiencia por parte de los trabajadores.

El manual de Señalización para Obras del MTC se limita a esquemas estáticos que dependen de observación humana. Esta carencia normativa tiene como consecuencias entornos de obra peligrosos para peatones, trabajadores, y pérdidas económicas superiores a los 500 US\$/hora por kilómetro de vía afectada [12]. Esto ocurre por la falta de un sistema portátil y autónomo que gestione el tráfico en vías reducidas por obras.

TABLA I
ESTADÍSTICA DURANTE Y SIN OBRAS EN LIMA Y AREQUIPA

Ciudad o tramo	Tiempo medio de congestión	Tiempo medio durante obras	Longitud de cola vehicular antes	Longitud de cola vehicular durante
Arequipa (caso típico)	32min	60-75min(estimado)	0.5km(estimado)	>1km
Lima (tramo costanero)	30min	Entre 66min(estimado)	0.5km(estimado)	Entre 2km (horas pico)

Analizando los datos de tráfico urbano en vías reducidas por obras en Arequipa y Lima, esta investigación constata que el tiempo medio de desplazamiento se duplica, de 32min a más de 1h para Arequipa [13] y de 30min a 66min en Lima [14], mientras que las colas vehiculares crecen de 0.5km a más de 1km en la Av. Jesús de Arequipa [15] y hasta 2km en la Av. Costanera de Lima [16]. No obstante, el exceso de congestión correlaciona con un aumento vial atemorizante: la Asociación Automotriz del Perú reporta que Arequipa pierde más de 700 millones de soles al año por congestión vehicular, y esto repercute en un alza de accidentes de tránsito” [17], mientras que el MTC documenta que en 2021 hubo en total 74.624 siniestros de tránsito con 3.032 fallecimientos a nivel nacional, más del 50% concentrados en Lima y Callao [18].

Estos hallazgos evidencian ineficiencias críticas: como costos operativos, incremento del estrés de los usuarios, aumento de emisiones contaminantes e ineficiencias por los trabajadores de obras al tener que realizar el flujo vehicular manual.

III. SITUACIÓN ACTUAL

En el Perú, la mayoría de los semáforos urbanos opera con ciclos de tiempo fijo, estos no se adaptan a la demanda de cantidad de vehículos, y muy pocos disponen de sensores de conteo vehicular. En el caso de vías reducidas por obras, la señalización semafórica rara vez es portátil; cuando se emplea, consiste en dispositivos básicos solares que funcionan de manera independiente, sin sincronización automática ni algoritmos de optimización [19]. Esto da como resultado que, a pesar de su autonomía energética, no ajustan dinámicamente los

tiempos de ciclo al flujo real de vehículos, dejando sin resolver los cuellos de botella que genera una sola vía.

Las políticas de restricción vehicular implementadas en Lima (2019) demostraron que, sin un sistema integral de monitoreo en tiempo real, la medida simplemente traslada la congestión a vías alternas mal equipadas, incrementando el tráfico en distritos como San Isidro hasta un 25% durante las mañanas y tardes en horas pico [20]. En Arequipa no se ha implementado un esquema similar debido a la carencia de herramientas tecnológicas para analizar el impacto en tramos específicos de obra, lo que demuestra la necesidad de sistemas adaptativos para destinar restricciones de forma más inteligente.

Prototipos locales desarrollados por universidades e institutos tecnológicos en Arequipa han incorporado cámaras y sensores de proximidad para la detección de densidad vehicular en zonas urbanas, logrando enviar alertas a las autoridades municipales. Sin embargo, ninguno de estos prototipos integra el control semafórico y automático ni una comunicación IoT que permita modificar en tiempo real los ciclos de luz en vías reducidas por obras [21].

IV. PROPUESTA DE MEJORA

Para el diseño de la propuesta se emplea una placa de desarrollo (Raspberry Pi 5 o 4 o ESP32) como unidad central de procesamiento. Esta placa ejecuta un contenedor Docker con OpenCV [29] para realizar el conteo vehicular en tiempo real, y un servicio Node.js que se encarga de la lógica de control semafórico adaptativo. La placa se comunica con un módulo

Lora para sincronizar fases con la otra unidad de semáforo, garantizando una coordinación a distancias sin cobertura móvil (ver fig.1).

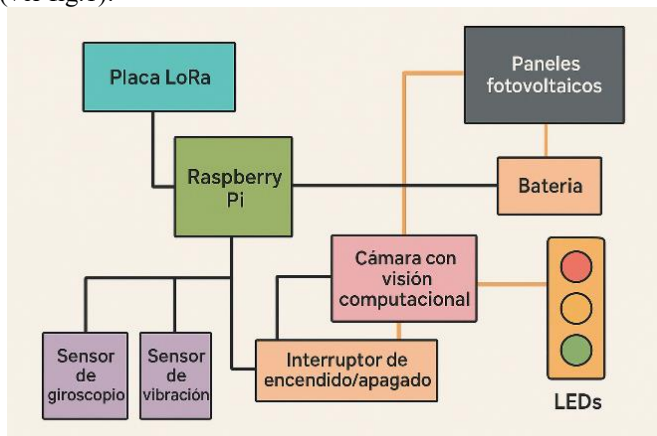


Fig. 1 Propuesta de diseño

Los componentes necesarios para el prototipo son:

1. Placa de desarrollo - LoRa (Transceiver Lora 433MHZ E32): Es una tecnología para la modulación en las rees LoRaWAN que nos permite a los dispositivos IoT intercambiar información con un largo alcance y con consumo mínimo de energía [28] (ver fig.2).



Fig. 2. Placa de desarrollo LoRa

2. Raspberry (Pi 5 – 4GB) (Dos): Computador de bajo consumo que será el servidor de visión computacional y controlador de red LoRa. [30] (ver fig.3).



Fig. 3. Raspberry Pi 5

3. Ruedas giratorias con freno (Ocho): Fabricada en aluminio anodizado para resistencia y ligereza [23] (ver fig.4).



Fig. 4. Ruedas giratorias con freno

4. Focos de color rojo y verde (LED Serie S4 Tricolor Base H7 0,000LM NAOEVO): Indica el cambio de dirección, estas luces serían visibles desde el exterior gracias a una apertura [31] (ver fig.5).



Fig. 5. Focos LED

5. Soporte extensible de tipo telescópico (Cuatro): Extiende tanto la altura del semáforo, como también la altura de la cámara que detectará la cantidad de los autos (ver fig.6).



Fig. 6. Soporte extensible

6. Cámara industrial con visión computacional (Arducam IMX219 Wide-Angle Camera for Raspberry Pi): Esta cámara cuenta con una resolución de 1080p, con lente gran angular para conteo vehicular, además de un ángulo de 160°, y con visión nocturna de ser necesario [32] (ver fig.7).



Fig. 7. Cámara industrial

7. Paneles fotovoltaicos (Renogy 100W 12V Polycrystalline Solar Panel) : cada panel alimenta al controlador de carga MPPT [26] (ver fig.8).



Fig. 8. Paneles fotovoltaicos

8. Batería (Renogy Deep Cycle AGM Battery) (Dos): Estas baterías son de ciclo profundo (12 V, 100 Ah) que es ideal para la carga y descarga de forma repetida [27] (ver fig.9).



Fig. 9. Batería AGM

9. Interruptor de encendido y apagado (3P, TBSN – 210) : Inicializa el semáforo portátil y también a apagar el mismo (ver fig.10).



Fig. 10. Interruptor modelo 3P, TBS-210

10. Sensor de Giroscopio (L3G4200D): 3 ejes, este nos proporciona una salida digital precisa mediante interfaces I2C o SPI, lo cual nos facilitaría su integración en el Arduino, ESP32 o Raspberry Pi, además, cuenta con ejes de medición X, Y, Z, un voltaje de 3V a 5V, también, es de bajo consumo energético y cuenta con una gran sensibilidad lo cual lo hace ideal para el sistema [25] (ver fig.11).

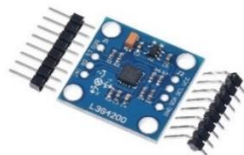


Fig. 11. Sensor de giroscopio modelo L3G4200D

14. Sensor de Vibración (SW-420) (Dos): Este sensor nos va ayudar a identificar los movimientos bruscos, este cuenta con un comparador en la salida el cual nos da una señal limpia, la forma en onda y además con una capacidad de conducción que supera los 15mA, el voltaje que usa es de 3.3V – 5V lo que hace que sea ideal para este sistema [24] (ver fig.12).



Fig. 12. Sensor de vibración modelo SW-420

11. Lente de telaraña para los focos (Cuatro): Los lentes serán de un tamaño de 200mm, estos nos servirán para poder mejorar la visibilidad (ver fig.13).



Fig. 13. Lente de telaraña tamaño 200mm

Con estos elementos podemos armar el semáforo inteligente base para solucionar el problema de la gestión de tránsito en vías que son reducidas por obras (ver fig.14).

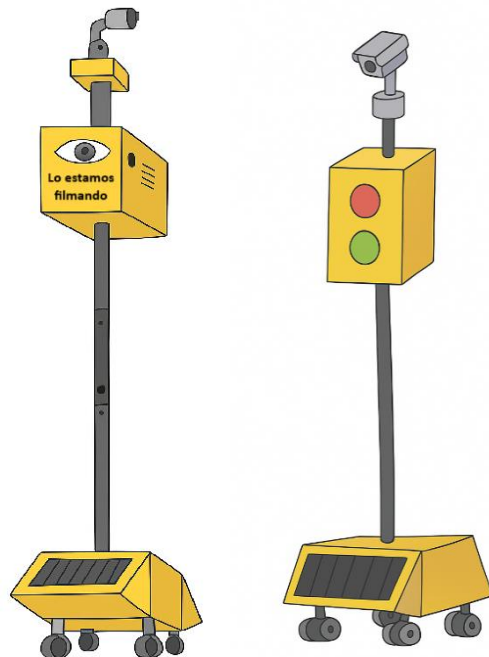


Fig. 14. Prototipo

Además, contara con una app móvil y portal web: dashboards de estado y control remoto. Que ayudaran a poder monitorearlo a distancia, así como mantenerse informado ante cualquier contratiempo que pueda suceder, además de poder conectar tanto emisor con receptor, verificar la conexión, verificar la batería, etc. (ver fig. 15).



Fig. 15. Interfaz móvil para inicializar el semáforo (izquierda receptor y derecha emisor)

Adicionalmente, se podría llegar a usar opcionalmente un microcontrolador Arduino UNO el cual es muy fácil de programar y entender, cuenta con 14 pines de entradas/salidas digitales de los cuales 6 se pueden usar como salidas PWM, además tiene 6 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16 MHz, una conexión USB, un conector ICSP [22]; todo esto nos servirá para gestionar las señales de los LEDs y para recibir comandos desde la Raspberry Pi mediante comunicación UART, esto asegura una transición rápida y fiable de estados semafóricos. Cada semáforo está integrado en una estructura móvil montada sobre ruedas giratorias con freno, fabricada en aluminio anodizado para resistencia y ligereza [23]. Esta base incluye un trípode telescópico que ajusta la altura de la unidad hasta 2 m, adaptándose a distintas condiciones de visibilidad en obras. La caja de componentes alberga no solo la electrónica, sino también sensores de vibración SW-420 que tiene un comparador en la salida el cual nos da una señal limpia, la forma en onda y cuenta con una capacidad de conducción que supera los 15mA, el voltaje que usa es de 3.3V – 5V y pesa 3.3g con dimensiones de 31.3mm x 14.3mm lo que hace que sea ideal para este sistema [24]; y giroscopio L3G4200D de 3 ejes, este nos proporciona una salida digital precisa mediante interfaces I2C o SPI, lo cual nos facilitaría su integración en el Arduino, ESP32 o Raspberry Pi, cuenta con ejes de medición X, Y, Z, un voltaje de 3V a 5V, bajo consumo energético lo cual lo hace ideal para el sistema, un tamaño de 20mm x 20mm aproximadamente, además de ser muy sensible y preciso en la medición [25]; estos sensores nos servirán para detectar intentos de sabotaje o caídas, activando alertas instantáneas a la plataforma de monitoreo. La movilidad del sistema permite su despliegue rápido en tramos de vía reducida por obras, sin necesidad de una infraestructura fija, ni de otras herramientas especiales. La alimentación energética se sostiene con un sistema fotovoltaico autónomo: cuatro paneles solares policristalinos Renogy 100W 12V Polycrystalline Solar Panel [26], cada uno alimentan un controlador de carga MPPT, que a su vez mantiene dos baterías Renogy Deep Cycle AGM Battery de ciclo profundo (12 V, 100 Ah) que es ideal para la carga y descarga de forma repetida [27]. Este conjunto garantiza más

de 48 h de operación continua sin sol intenso, aprovechando el promedio de 10 h de sol diario en Arequipa. Un inversor DC-DC reduce la tensión a 5 V/3 A para la Raspberry Pi y a 3.3 V para el Arduino, maximizando la eficiencia energética. Gracias a este diseño, el sistema funciona de forma ininterrumpida, incluso durante cortes eléctricos o condiciones meteorológicas adversas.

La arquitectura de software incluye un nodo maestro local que recopila los datos de conteo vehicular y estado de batería de cada unidad mediante LoRa. En el “edge”, se ejecuta un algoritmo de optimización basado en teoría de colas, que ajusta dinámicamente las duraciones de verde y rojo según la densidad detectada en el carril reducido. Paralelamente, un portal web y una app móvil (iOS/Android) permiten al operador visualizar en tiempo real mapas de calor de congestión, niveles de batería, alertas de antivandálico y logs históricos. Las intervenciones remotas (por ejemplo, cambiar el modo a manual) se envían vía MQTT, minimizando la necesidad de presencia física en obra.

Con esta integración de hardware y software bajo un esquema IoT robusto y alimentado por energía solar, la propuesta ofrece una reducción de hasta 20 % en tiempos de espera, menor dependencia de bandereros y una mejora sustancial de la seguridad vial en tramos reducidos por obras, situándose como una solución escalable y sostenible para Arequipa y otras provincias del Perú.

Además, con estos componentes se ha realizado una evaluación de costos.

- Todo el hardware del semáforo inteligente costaría un aproximado de 6830 soles.
- Otros costos como la creación de la app, el sitio web y el ensamblado del semáforo costaría alrededor de unos 3300 soles.

Estos dos tipos de costos nos darían un aproximado de 10130 soles (aproximadamente 2829 USD), para tener el sistema de dos semáforos listos para ser instalados y empezar a trabajar. Recordando el tipo de cambio de soles peruanos es de 3.58 soles un dólar americano.

Por otro lado, el costo de dos trabajadores para que dirijan el tráfico en una obra, considerando que la obra sea “rápida” con una duración de 4 meses y considerando un salario de 1200 soles mensuales, nos daría un total de 9600 soles.

Como se puede observar, en comparación de costos, ambos están parejos, sin embargo, se debe de tomar en cuenta que este sistema tiene las ventajas de ser reutilizable, puede tener monitoreo remoto, puede trabajar las 24 horas del día los 7 días de la semana, mejora la eficiencia en la gestión del tránsito, evita exponer a los trabajadores a posibles accidentes y obviamente a largo plazo genera un gran ahorro.

TABLA 2

COMPARATIVA DE COSTOS, ENTRE EL SISTEMA DE SEMÁFOROS Y EL MÉTODO DE GESTIÓN ACTUAL.

	4 meses	8 meses	12 meses
Semáforo	5630 S/.	0	0
2 bandereros	2670 S/.	5240 S/.	8000 S/.

V. DISEÑO METODOLÓGICO DE ENCUESTAS

Para complementar el análisis técnico del sistema propuesto, se aplicó una encuesta de carácter exploratorio a conductores de la ciudad de Arequipa. El objetivo principal fue identificar la percepción de los usuarios respecto a los problemas actuales de tráfico en zonas de obra y evaluar la aceptación social de la propuesta de semáforos portátiles inteligentes.

La encuesta se diseñó con tres objetivos específicos:

- 1) Medir el nivel de estrés de los conductores ante la congestión generada por obras viales.
- 2) Identificar el tiempo adicional de retraso reportado en sus desplazamientos diarios.
- 3) Evaluar el grado de aceptación y satisfacción esperada frente a la implementación del sistema propuesto.

El cuestionario incluyó 10 preguntas estructuradas, combinando ítems cerrados de opción múltiple (escala Likert de 1 a 5) y preguntas dicotómicas (sí/no). La muestra se conformó por 68 conductores seleccionados de manera no probabilística, abordados en distintos puntos de la ciudad cercanos a obras viales activas. Este tamaño de muestra se consideró adecuado para obtener una primera aproximación exploratoria de la problemática.

El diseño metodológico permitió relacionar cuantitativamente la percepción de estrés, los tiempos de retraso y la aceptación del sistema, aportando insumos sociales que complementan el análisis técnico y económico.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos a partir de las encuestas realizadas a 68 conductores en Arequipa revelaron que el 60% de los encuestados presentaba niveles elevados de estrés (“muchos” o “bastante estrés”) por la congestión del tráfico en zonas de obras, con solo un 3% indicando ausencia de estrés (ver fig. 16). Esta percepción se correlaciona con las deficiencias en la señalización existente: mientras el 37% la calificó como “excelente”, un 10% la describió como “inexistente o confusa” (ver fig. 17), lo que indica que existe fallas en la implementación y en la comunicación clara de rutas alternas.

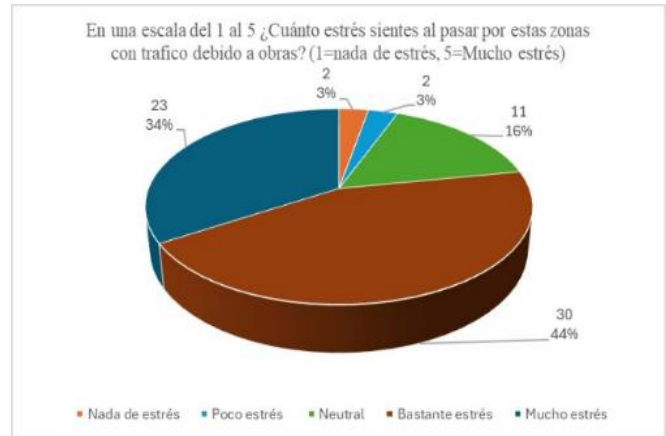


Fig. 16. Resultado del nivel de estrés por tráfico en obras.



Fig. 17. Resultado de señalización en distintas zonas.

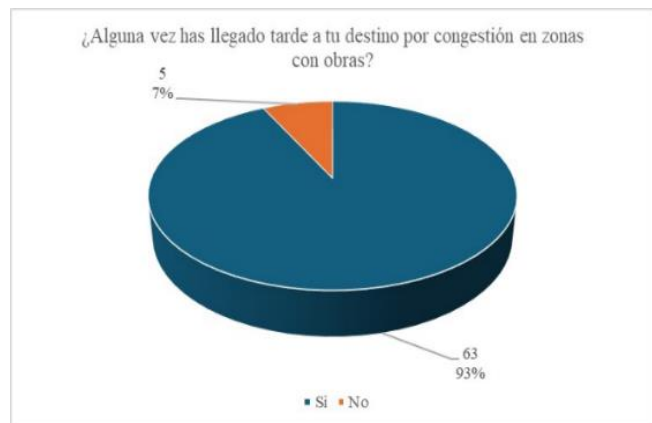


Fig. 18. Resultado de consecuencias por la congestión en obras.



Fig. 19. Resultado del tiempo adicional perdido a causa de obras.

La magnitud del problema se amplifica al analizar el tiempo de demora. Un 93% de los participantes confirmó haber llegado tarde a su destino a causa de las congestiones en zonas de obras (ver fig. 18), con un 44% reportando pérdidas de tiempo mayores a 40 minutos diarios y un 29% entre 30 y 40 minutos (ver fig. 19). Estos retrasos no solo demuestran las ineficiencias operativas, sino que también se vinculan a pérdidas económicas estimadas en 700 millones de soles anuales para Arequipa, derivadas de la congestión vehicular [17].

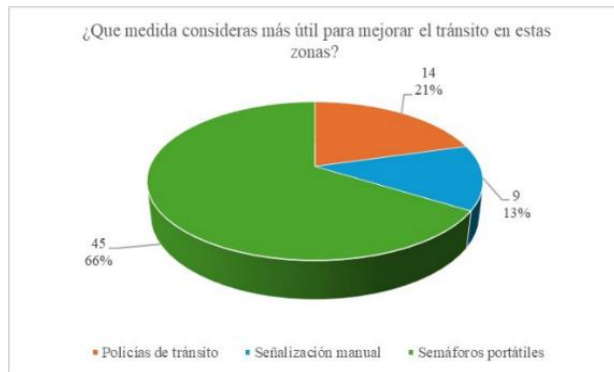


Fig. 20. Resultado de optimización del tránsito.



Fig. 21. Resultado de medida para reducir el estrés al conducir por zonas de obras.

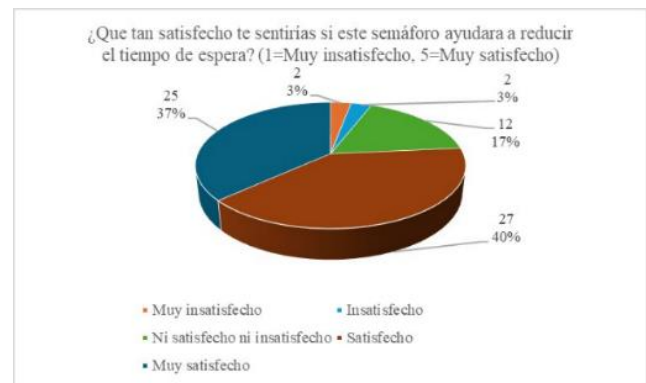


Fig. 22. Resultado de satisfacción por emplear un semáforo IoT.

Frente a este escenario, la necesidad por crear soluciones tecnológicas quedó evidenciada al evaluar las medidas más útiles: el 50% de los encuestados priorizó los semáforos portátiles, superando opciones como “policías de tránsito” (24%) y “señalización manual” (26%) (ver fig. 20). Esta inclinación se alinea con las expectativas de reducción de estrés, donde el 50% anticipó que el sistema “reduciría mucho” su tensión y un 24% esperaba una “reducción moderada” (ver fig. 21). Además, el 40% de los usuarios se sentiría “muy satisfecho” y el 17% “satisfecho” si el sistema lograra disminuir los tiempos de espera (ver fig. 22), reforzando su aceptación social.

Los hallazgos resaltan la necesidad de reemplazar métodos de gestión de tráfico estáticos, como señalización fija o dependencia de señalización manual, por sistemas adaptativos. La alta prevalencia de estrés (ver fig. 19) y retrasos (ver fig. 19 y 20) reflejan la insuficiencia de enfoques tradicionales en entornos como obras viales. El sistema propuesto, basado en algoritmos de teoría de colas y comunicación LoRa, podría reducir los tiempos de espera un 20% teóricamente, lo que cumpliría con las expectativas del 74% de usuarios que anticipan una mejora en su experiencia (ver fig. 20 y 21).

La autonomía energética del sistema, respaldada por paneles solares y baterías no solo garantiza operatividad continua, sino que también aprovecha la radiación solar de Arequipa, un factor crítico en regiones con infraestructura eléctrica limitada. Económicamente, su reutilización las múltiples obras contrasta con los costos de contratar bandereros, lo que lo posiciona como una inversión sostenible.

En comparación con prototipos locales [21], que se limitan a alertas pasivas, este sistema integra un control activo y adaptativo, elementos que son clave para reducir colas vehiculares en un 15-20% en tramos críticos como la Av. Jesús de Arequipa. Su escalabilidad demuestra al extrapolar resultados a ciudades como Lima, donde las obras generan colas de 2km [16], duplicando el impacto observado Arequipa.

En conclusión, los datos validan tanto la viabilidad técnica como la aceptación social del sistema.

VII. CONCLUSIONES

El sistema de semáforos portátiles inteligentes se presenta como solución efectiva para la gestión del tráfico en obras viales. Los datos muestran que el 60% de conductores sufre estrés por congestiones, con un 93% afectado por retrasos. La propuesta, basada en IoT y energía solar, es satisfactoria a por el 74% de usuarios. Aunque presenta limitaciones en climas adversos, su diseño modular permite implementación en diferentes ciudades. La solución optimiza flujos vehiculares, reduce riesgos y es sostenible económicamente, demostrando ser una alternativa viable para zonas de construcción.

Si bien los resultados presentados se sustentan en proyecciones teóricas y encuestas exploratorias, aún no se han realizado pruebas piloto en condiciones reales de tráfico. Como trabajo futuro, se plantea la implementación de un prototipo en campo, lo que permitirá validar empíricamente los supuestos de eficiencia, resiliencia y aceptación social del sistema en escenarios de operación real.

VIII. RECONOCIMIENTOS

Este equipo de trabajo desea expresar su más sincero agradecimiento a la Universidad Católica de Santa María (UCSM) por ofrecer un entorno académico de calidad y proporcionar los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación. El apoyo institucional y la infraestructura disponible fueron elementos clave para la realización de este estudio.

REFERENCIAS

- [1] "Tacna: Trabajador edil es atropellado por caos vehicular en avenida Municipal." Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: https://diariocorreo.pe/edicion/tacna/tacna-trabajador-edil-atropellado-por-caos-vehicular-avenida-municipal-noticia/#google_vignette
- [2] "El clima y el tiempo promedio en todo el año en Arequipa." Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: <https://es.weatherspark.com/y/25845/Clima-promedio-en-Arequipa-Perú-durante-todo-el-año>
- [3] "Empresa Continua Energías obtienen concesión para dos centrales solares en Arequipa." Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: <https://larepublica.pe/economia/2020/02/12/empresacontinua-energias-obtiene-concesion-para-dos-centralessolares-en-arequipa/>
- [4] "Gobierno regional inició 13 obras durante el 2024." Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/regionarequipa/noticias/1088766-gobierno-regional-inicio-13-obras-durante-el-2024>
- [5] "Mejoramiento de la carretera variante uchumayo, entre el puente san isidro y la vía de evitamiento, distritos sachaca, yanahuara y cerro colorado, provincia arequipa, region arequipa" tramo ii – habilitación de rutas alternas para el plan de desvío." Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: <https://informacion.regionarequipa.gob.pe/Obras/ObrasDetalle/ObrasEjecucion/?TipoObra=7DCJLGHTRY3PHVPZ>
- [6] "Partidas en vías auxiliares del tramo ii entre las progresivas 1+468.0 al 2+490 del proyecto de inversión: mejoramiento de la carretera variante de uchumayo, entre el puente san isidro y la vía de evitamiento, distritos sachaca, yanahuara y cerro colorado, provincia arequipa, region arequipa." Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: <https://informacion.regionarequipa.gob.pe/Obras/ObrasDetalle/ObrasEjecucion/?TipoObra=JTY28ZEV29V6Z2Z4>
- [7] "Mejoramiento de la carretera variante Uchumayo, entre el puente san isidro y la vía de evitamiento, distritos Sachaca, Yanahuara y cerro colorado, provincia arequipa, region Arequipa" tramo i – acciones necesarias para desarrollar la interferencia en el sistema de riego." Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: <https://informacion.regionarequipa.gob.pe/Obras/ObrasDetalle/ObrasEjecucion/?TipoObra=PL62VVAJMESBABL4>
- [8] M. E. Bejarano Meza, G. M. Paz Cahuina, P. F. Vásquez Macedo, and A. M. Chanove Manrique, "The First Botanical Garden: A Technical Design for a Sustainable City in Arequipa, Peru," *Journal of Zoological and Botanical Gardens*, vol. 6, no. 1, p. 18, Mar. 2025, doi: 10.3390/jzbg6010018.
- [9] Z. Peng and L. Yin, "Nonlinear prediction model of vehicle network traffic management based on the internet of things," *Systems and Soft Computing*, vol. 7, p. 200254, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.sasc.2025.200254.
- [10] J. Huerta Merino, "Análisis del flujo de tráfico mediante el reconocimiento." Accessed: May 14, 2025. [Online]. Available: https://gredos.usal.es/bitstream/handle/10366/150014/memoria_del_proyecto.pdf?sequence=1
- [11] L. A. Mamani Limachi, "Análisis y optimización de la red vial nacional y urbana para reducir la congestión vehicular en la carretera pe-34a, en los distritos de Yura y Cerro Colorado, Arequipa 2021," *Universidad Continental*, 2022, Accessed: May 22, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/11562>
- [12] "Ministerio de Transportes y Comunicaciones." Accessed: May 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/mtc>
- [13] "Arequipa Traffic." Accessed: May 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.tomtom.com/traffic-index/arequipa-traffic/>
- [14] Gerencia de Estudios Económicos y Estadística, "Lima es la ciudad con mayor congestión vehicular en América Latina." Accessed: May 14, 2025. [Online]. Available: <https://aap.org.pe/observatorio-aap/ranking-de-congestion-vehicular-enero2024/ranking-de-congestion-vehicular-enero2024.pdf>
- [15] "Problemas en Arequipa: Obras viales generan caos y desorden." Accessed: May 14, 2025. [Online]. Available: <https://lavozarequipa.com/problemas-en-arequipa-obras-viales-generan-caos-y-desorden/>
- [16] "Efectos de la congestión vehicular en Lima y Callao." Accessed: May 14, 2025. [Online]. Available: <https://afin.org.pe/wp-content/uploads/2015/12/17.03.25-Efectos-de-la-congestion-vehicular-en-Lima-y-Callao-web.pdf>
- [17] "Arequipa pierde más de 700 millones de soles al año por congestión vehicular." Accessed: May 14, 2025. [Online]. Available: <https://aap.org.pe/arequipa-pierde-mas-de-700-millones-de-soles-al-año-por-congestion-vehicular-agencia-nacional-de-transito-y-seguridad-vial-plan-urbano-de-movilidad/>
- [18] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, "De enero a julio del 2022 ocurrieron más de 47 mil siniestros de tránsito en el Perú," Sep. 2022, Accessed: May 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/mtc/noticias/647689-de-enero-a-julio-del-2022-ocurrieron-mas-de-47-mil-siniestros-de-transito-en-el-peru/>
- [19] "Semáforo vehicular 1C/1L con Sistema Fotovoltaico." Accessed: May 14, 2025. [Online]. Available: <https://ingenium-tec.pe/product/semforo-vehicular-1c-1l-con-sistema-fotovoltaico/>
- [20] A. Facho Dede, "Más pico y con (o sin) placa." Accessed: May 14, 2025. [Online]. Available: <https://blogs.gestion.pe/politicas-publicas-para-el-desarrollo/2019/10/mas-pico-y-con-o-sin-placa.html>
- [21] M. Flores Gutiérrez, E. Herrera Ramos, M. Apaza Cornejo, and E. Valeriano Cuba, "Integration of a Vehicle Congestion Detection and Alert Prototype in the city of Arequipa."
- [22] R. Sanchez-Iborra and A. F. Skarmeta, "TinyML-Enabled Frugal Smart Objects: Challenges and Opportunities," *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 20, no. 3, pp. 4–18, Jan. 2020, doi: 10.1109/MCAS.2020.3005467.
- [23] J. M. Garcia Caicedo, I. J. Medina Ramirez, A. Garcia Cerezo, and A. D. Linares Mora, "Improving the Static Stability of A Mobile Manipulator Using Its End Effector in Contact with the Ground," *IEEE Latin America*

- Transactions, vol. 13, no. 10, pp. 3228–3234, Oct. 2015, doi: 10.1109/TLA.2015.7387226.
- [24] S. Q. Mahdi, S. K. Gharghan, and A. H. Mutlag, “Earthquake detection system based on LoRa communication technology,” *AIP Conf Proc*, vol. 3232, no. 1, p. 020061, Oct. 2024, doi: 10.1063/5.0236285.
- [25] L. Zhao, S. Luo, G. Yang, and J. Li, “Accelerated adaptive backstepping control of the chaotic mems gyroscope by using the type-2 sequential fnn[Control acelerado del backstepping adaptativo del giroscopio caótico mems por medio de la fnn secuencial de tipo],” *Ingeniería e Investigación*, vol. 41, no. 1, p. e85825, Jan. 2021, doi: 10.15446/ing.investig.v41n1.85825.
- [26] A. Apaza-Pinto, J. Esquicha-Tejada, P. Lopez-Casaperalta, and J. Sulla-Torres, “Supervised Machine Learning Techniques for the Prediction of the State of Charge of Batteries in Photovoltaic Systems in the Mining Sector,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 134307–134317, 2022, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3225406
- [27] J. Esquicha-Tejada and J. Copa-Pineda, “Integration of an IoT system - Photovoltaic system to optimize the consumption of drinking water in the irrigation of gardens in the City of Arequipa” *Proceedings of the LACCEI International Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, 2020, DOI: 10.18687/LACCEI2020.1.1.212.
- [28] M. Dafare, S. Waghmare, A. Bhoyar, A. S. Titarmare, and P. Chandankhede, “LoRa-Enabled Smart RS485 Data Logger and MQTT Gateway for Industrial IoT Applications Using ESP32,” *Proceedings of the International Conference on Circuit Power and Computing Technologies, ICCPCT 2023*, pp. 1297–1302, Jan. 2023, doi: 10.1109/ICCPCT58313.2023.10245760.
- [29] J. Alpaca Rendón, J. Esquicha Tejada, and K. Rosas Paredes, “Hospitalized patients caring system using Raspberry Pi with megapixel camera and OpenCV [Sistema de atención a pacientes hospitalizados utilizando Raspberry Pi con Cámara Megapíxel y OpenCV],” *Proceedings of the LACCEI International Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, 2017-July, DOI: 10.18687/LACCEI2017.1.1.223.
- [30] X. Pérez-Palomino, K. Rosas-Paredes, and J. Esquicha-Tejada, “Low-Cost Gas Leak Detection and Surveillance System for Single Family Homes Using Wit.ai, Raspberry Pi and Arduino”, *Int. J. Interact. Mob. Technol.*, vol. 16, no. 09, pp. pp. 206–216, May 2022. DIO: 10.3991/ijim.v16i09.30177
- [31] Z. Ji, L. Yin, and J. Wang, “Spatiotemporal Pattern Analysis Of Land Use In Jiangsu Province Based On Long-term Time Series Remote Sensing Images,” *Journal of Applied Science and Engineering*, vol. 29, no. 1, pp. 1–12, Jan. 2026, doi: 10.6180/jase.202601_29(1).0001.
- [32] F. Z. Oyuela and O. A. Paz, “AI-powered backup robot designed to enhance cognitive abilities in children with Down syndrome,” *Proceedings of 2023 IEEE Central America and Panama Student Conference, CONESCAPAN 2023*, pp. 134–138, Jan. 2023, doi: 10.1109/CONESCAPAN60431.2023.10328430.