



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

TEMA:

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE HOGAR INTELIGENTE HETEROGÉNEO DE BAJO COSTO QUE INTEGRE NODOS IOT BASADOS EN FPGA, MICROCONTROLADOR Y NODOS COMERCIALES”

AUTOR: Montenegro Almeida Alex Fernando

DIRECTOR: Ing. Pablo Ramos, PhD.

Sangolquí 2023



ÍNDICE DE CONTENIDO

- 1.- JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA
- 2.- OBJETIVOS
- 3.- DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN
- 4.- PRUEBAS Y RESULTADOS
- 5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Internet de las Cosas:
Objeto inteligente



Hogar Inteligente:
Comodidad, seguridad y
eficiencia energética

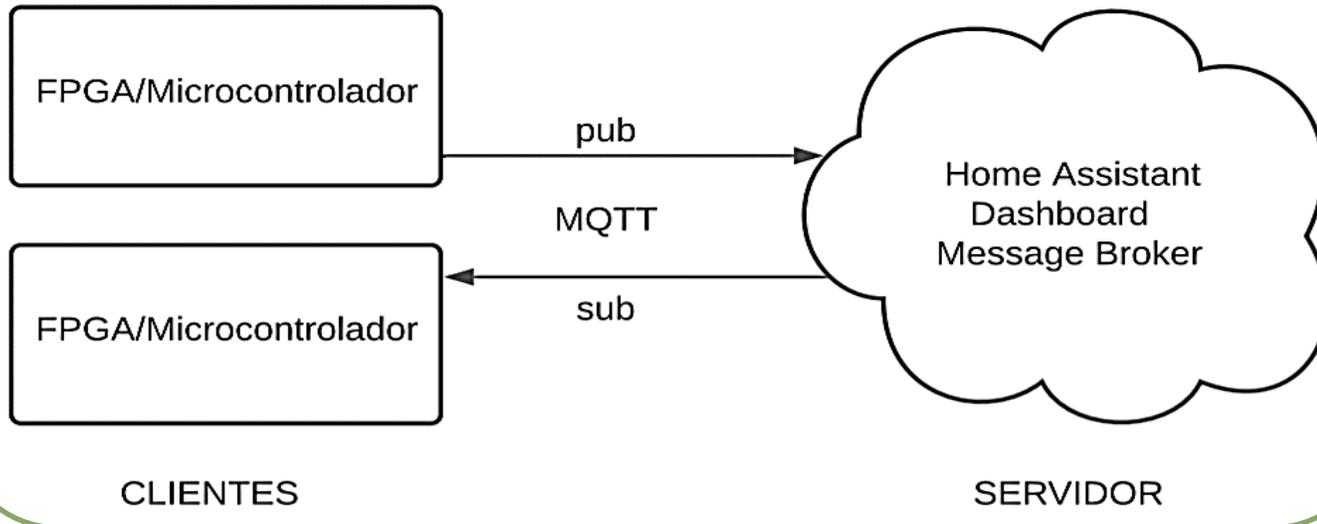


Problemas operativos:
Sistemas heterogéneos e
interoperabilidad



**Tecnologías para la
conectividad:** Bluetooth,
Wi-Fi, ZigBee y LoRa

ARQUITECTURA DE INTEGRACIÓN



Importancia

- Masificación del uso de IoT
- Nodo basado en FPGA (tendencia nueva)



OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un sistema de hogar inteligente heterogéneo de bajo costo que integre nodos IoT basados en FPGA, microcontrolador y nodos comerciales.

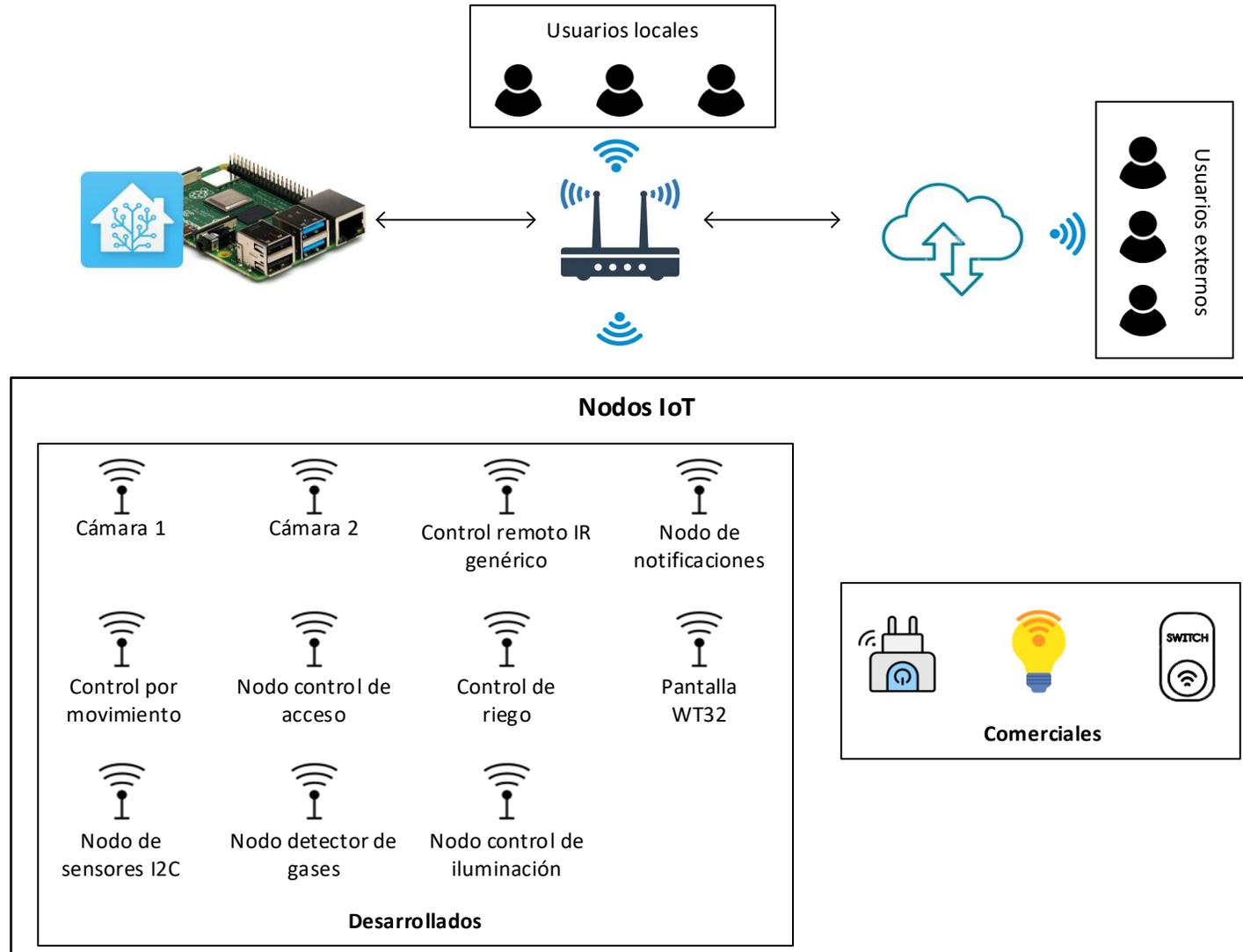


OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la importancia del IoT enfocado al Smart Home, los tipos de nodos y software que se emplean en un sistema de hogar inteligente mediante un estudio de los conceptos y del estado del arte.
- Integrar nodos comerciales con nodos desarrollados en base a chips, sensores y actuadores en un sistema Smart Home por medio de la comunicación MQTT de los diferentes nodos con el servidor.
- Explicar la funcionalidad de los nodos IoT y determinar el desempeño del sistema a través de pruebas de rendimiento.
- Determinar el consumo de energía de los nodos desarrollados en base a chips, sensores y actuadores con la ayuda de dispositivos de medición.
- Comparar los costos de los nodos desarrollados en base a chips, sensores y actuadores con dispositivos IoT comerciales mediante una revisión del precio de los productos en el mercado ecuatoriano.



DIAGRAMA SISTEMA DE SMART HOME



IMPLEMENTACIÓN DEL SERVIDOR

Home Assistant

- Software gratuito de código abierto: control local y privacidad.
- Archivos de configuración en formato YAML.
- Control por interfaz gráfica y comandos de VOZ.
- Integraciones y add-ons.
- Automatizaciones: trigger, condition y action.



Raspberry Pi 3 Modelo B

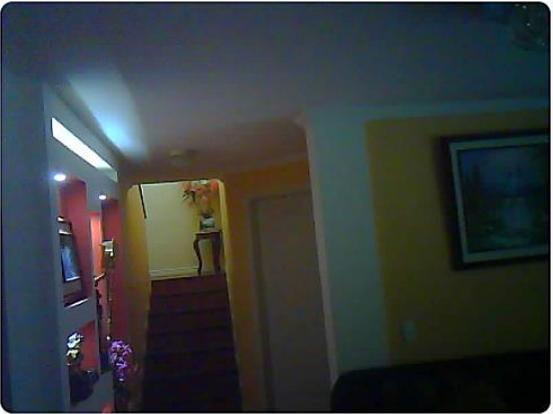
- Procesador ARM Cortex-A53 de 64 bits y 4 núcleos a 1,2GHz.
- Conectividad inalámbrica: IEEE 802.11.b/g/n en la banda de 2.4 GHz y Bluetooth 4.1.
- Puerto Ethernet hasta 100 Mbps.
- Medio de almacenamiento: microSD.



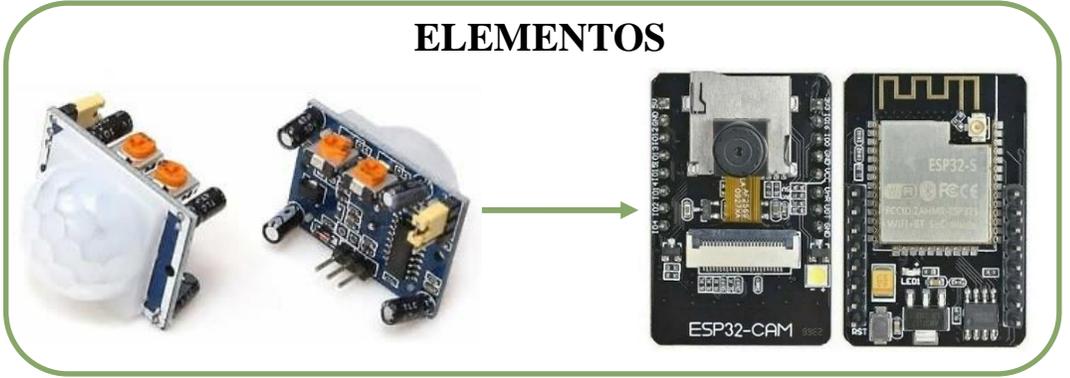
NODO CÁMARA INTELIGENTE

Función: Brindar seguridad al hogar

INTERFAZ GRÁFICA

Cámara 1	Cámara 2
	
<p>FLASH <input type="checkbox"/></p> <p>NOTIFICACIÓN <input type="checkbox"/></p>	<p>FLASH <input type="checkbox"/></p> <p>NOTIFICACIÓN <input type="checkbox"/></p>

ELEMENTOS



NOTIFICACIONES



Home Assistant • 1 min

Cámara 2

Se ha detectado movimiento!

ESP32-CAM #2

Movimiento Detectado
Se adjunta la imagen capturada.

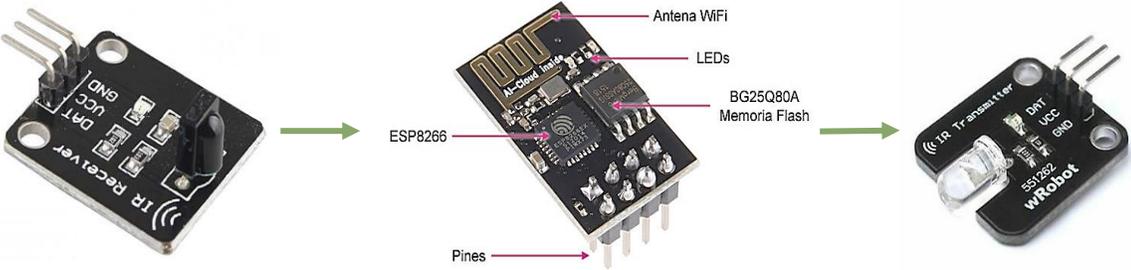
ARCHIVAR RESPONDER

ALARMA VISUALIZAR

NODO CONTROL REMOTO IR GENÉRICO

Función: Controlar electrodomésticos que tengan control remoto con tecnología IR (confort)

ELEMENTOS



INTERFAZ GRÁFICA

Control
Presione la tecla POWER de su electrodoméstico apuntando al dispositivo inteligente.

Receptor IR 
No encontrado

NEC Tv

Samsung Tv



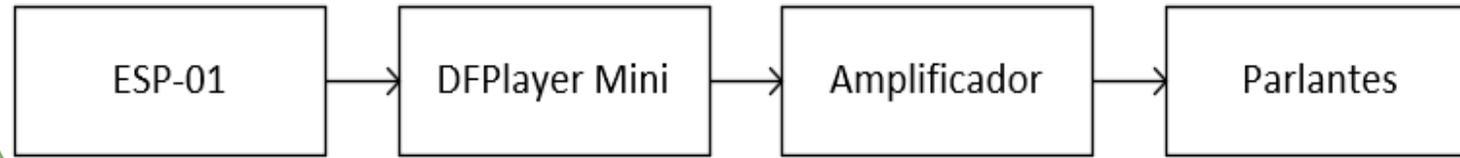
The graphical user interface (GUI) is designed for controlling various TV brands. It features a top section for 'Control' with instructions to press the power button on the smart device. Below this, there are sections for 'Receptor IR' (showing 'No encontrado') and 'NEC Tv'. The 'NEC Tv' section includes a power button and a home button. The 'Samsung Tv' section includes a power button, a mute button, and a volume button. The central control panel contains a grid of buttons: a home button, a back button, a forward button, a power button, a volume up/down button, a channel up/down button, a left/right arrow button, and an OK button.



NODO DE NOTIFICACIONES

Función: Permite escuchar anuncios de otros nodos IoT y reproducir canciones guardadas en la memoria microSD (seguridad y confort)

DIAGRAMA DE BLOQUES



INTERFAZ GRÁFICA

Anuncios



Volumen



Canción
3 days ago

NIRVANA-SMELLS LIKE TEEN SPIRIT



NODO DE CONTROL POR MOVIMIENTO

Función: Controlar remotamente el nodo de notificaciones (confort)

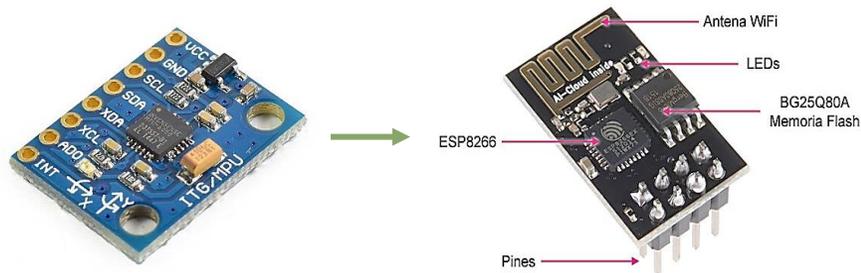
INTERFAZ GRÁFICA
Temperatura



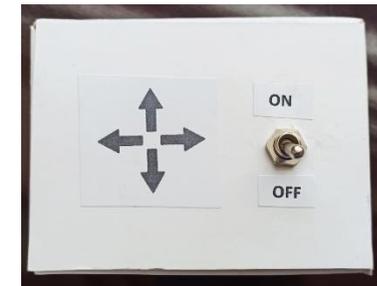
ESP-01 MPU6050

21.49 °C

ELEMENTOS



PROTOTIPO



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

NODO DE CONTROL DE ACCESO

Función: Controlar el acceso al hogar (seguridad)

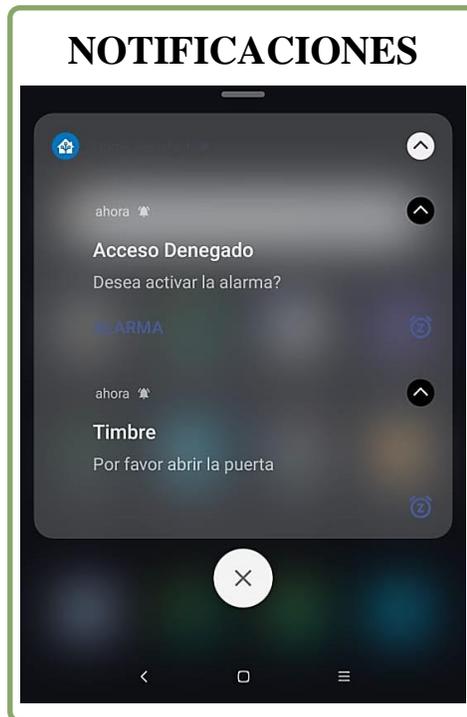


DIAGRAMA DE BLOQUES

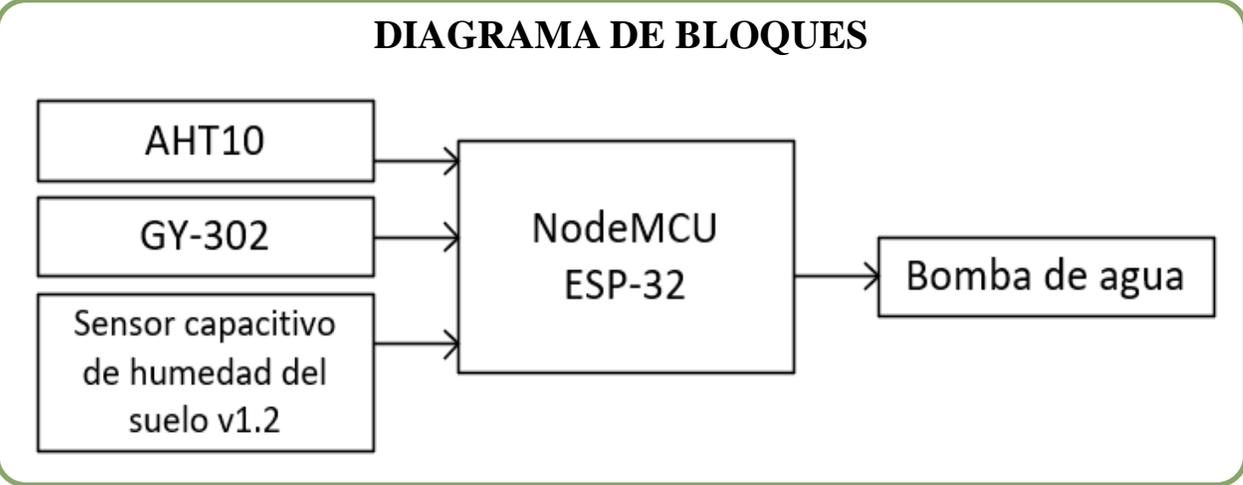


PROTOTIPO



NODO CONTROL DE RIEGO

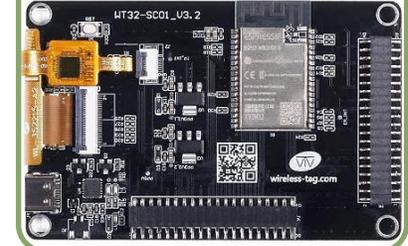
Función: Controlar el riego de una planta (confort)



PANTALLA WT32

Función: Visualizar datos de otros nodos (confort)

WT32-SC01



INTERFAZ PANTALLA TÁCTIL



INTERFAZ HOME ASSISTANT

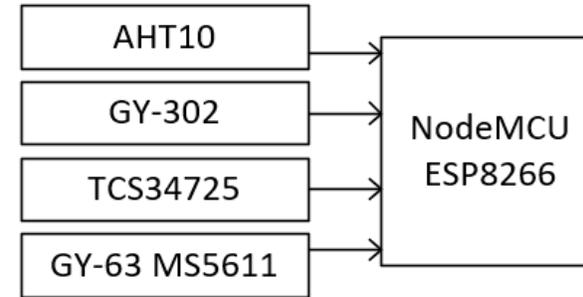
PANTALLA



NODO DE SENSORES I2C

Función: Medir diferentes variables mediante la interfaz I2C (confort)

DIAGRAMA DE BLOQUES



INTERFAZ GRÁFICA

AHT10

Humedad



55.81%

Temperatura



22.24 °C

MS5611

Presión



756.1 hPa

Temperatura



22.2 °C

TCS34725



Rojo

33.7%



Verde

33.2%



Azul

22.8%



Luz blanca

0.8%



Luminosidad

5.2 lx



Temperatura de Color

3,968.5 K

BH1750

Luminosidad



5.9 lx



NODO DETECTOR DE GASES

Función: Medir la concentración de gases en ppm (seguridad y confort)

ELEMENTOS



Clean Air

5V
0V
Output Voltage



INTERFAZ GRÁFICA

Sensor MQ-2

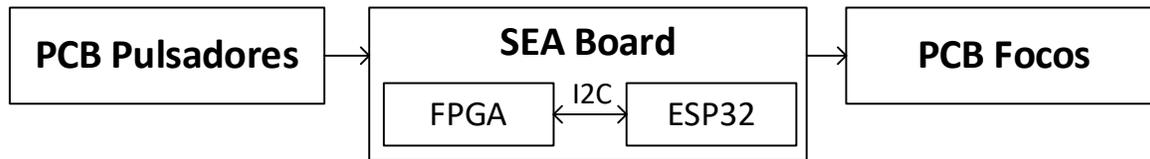
 Monóxido de carbono	4,106 ppm
 Gas licuado del petróleo	146 ppm
 Humo	1,001 ppm



NODO CONTROL DE ILUMINACIÓN

Función: Controlar la iluminación del hogar (confort)

DIAGRAMA DE BLOQUES



INTERFAZ GRÁFICA



 FPGA

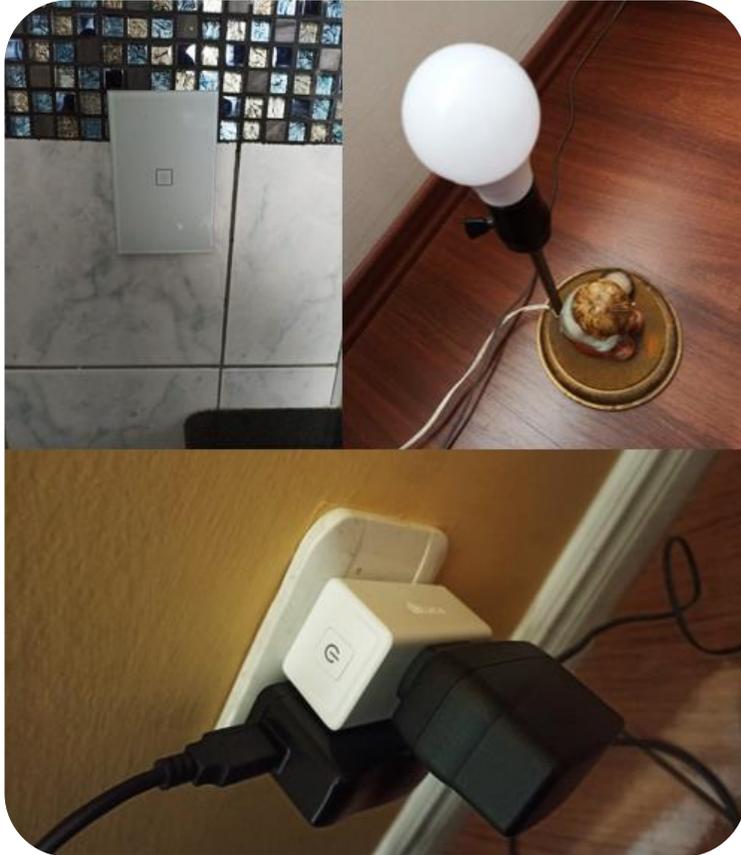
25.76 °C



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

NODOS COMERCIALES

IMPLEMENTACIÓN



INTERFAZ GRÁFICA

Tuya Smart



Interruptor
1 hour ago



TP-Link



Enchufe
15 hours ago



Foco
1 minute ago



CONEXIÓN A LA NUBE

ASISTENTE DE VOZ



CLOUDFLARE TUNNEL



Cloudflared

Use a Cloudflare Tunnel to remotely connect to Home Assistant without

NOMBRE DE DOMINIO

Managing hogarinteligenteha.cf

Information

Upgrade

Management Tools

Manage Freenom DNS

Information

To the right you can find the details of your domain.
You can manage your domain using the tabs above.

[« Back to Domains List](#)

Domain:
hogarinteligenteha.cf **ACTIVE**

Registration Date:
18/11/2022

Expiry date:
18/11/2023

ENLACE CON GOOGLE HOME



home-assistant-7f406

Google Assistant

[1 service](#) and [1 entity](#)



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

PRUEBAS Y RESULTADOS: CONSUMO DE ENERGÍA, RENDIMIENTO Y COSTOS



CONSUMO DE ENERGÍA

Dispositivo IoT	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Consumo diario [kWh]	Consumo mensual [kWh]	Gasto mensual [USD]
Nodo cámara 1	5.14	0.111	0.570	0.01	0.41	0.04
Nodo cámara 2	4.93	0.113	0.557	0.01	0.40	0.04
Control remoto IR genérico	5.06	0.078	0.394	0.01	0.28	0.03
Nodo control de acceso	5.05	0.082	0.414	0.01	0.30	0.03
Nodo control de riego	4.98	0.234	1.165	0.03	0.84	0.08
Pantalla WT32	5.00	0.296	1.480	0.04	1.07	0.10
Nodo de sensores I2C	5.05	0.083	0.419	0.01	0.30	0.03
Nodo detector de gases	4.98	0.197	0.981	0.02	0.71	0.06
Nodo control de iluminación (FPGA)	5.09	0.231	1.175	0.03	0.85	0.08
Nodo control de iluminación (PCB Focos)	5.37	0.518	2.781	0.07	2.00	0.18
Total				0.24	7.16	0.67



Autonomía nodo de control por movimiento

- 33 horas aproximadamente con un consumo promedio de corriente de 30 mA
- Tiempo de carga alrededor de 3 horas con una alimentación de 5 V



PRUEBA DE SONIDO: NODO DE NOTIFICACIONES

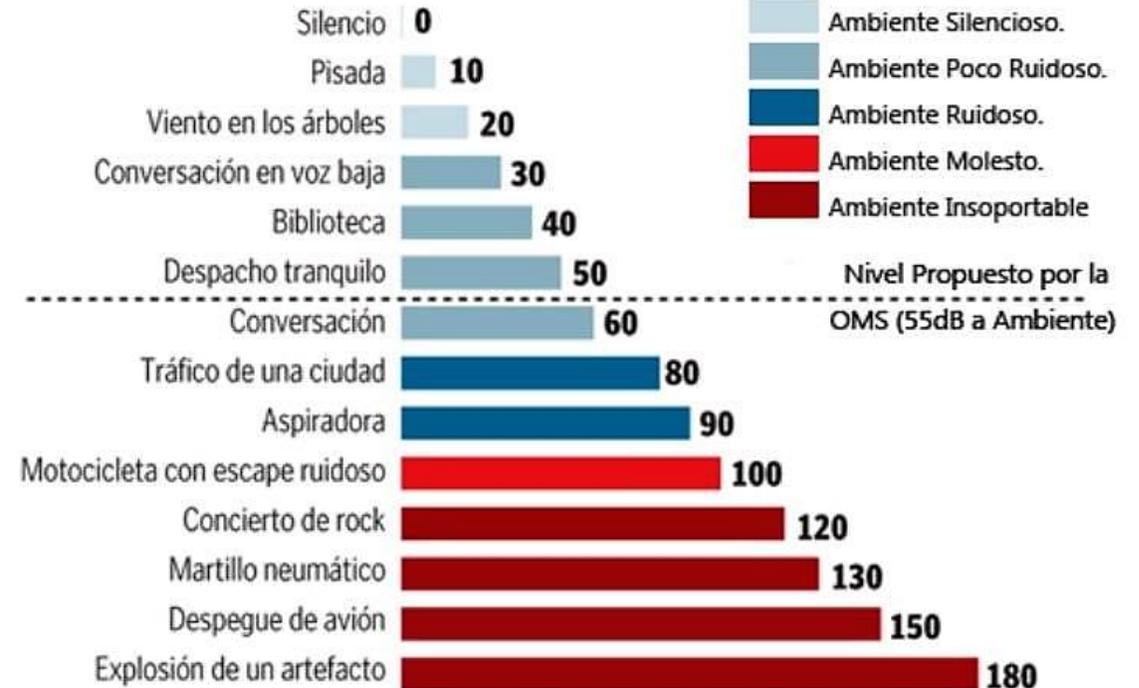
APLICACIÓN SONÓMETRO



NIVELES DE INTENSIDAD DEL SONIDO

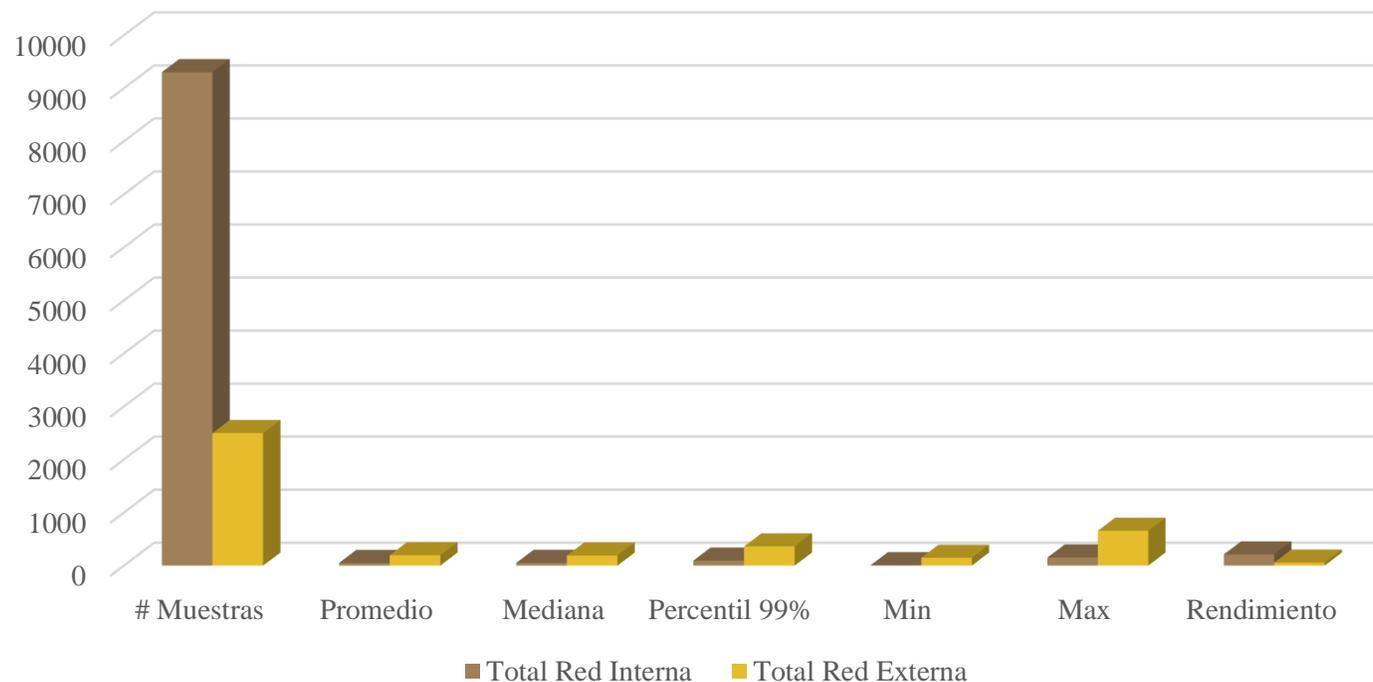
En decibelios (dBs)

Tipo de Ambientes



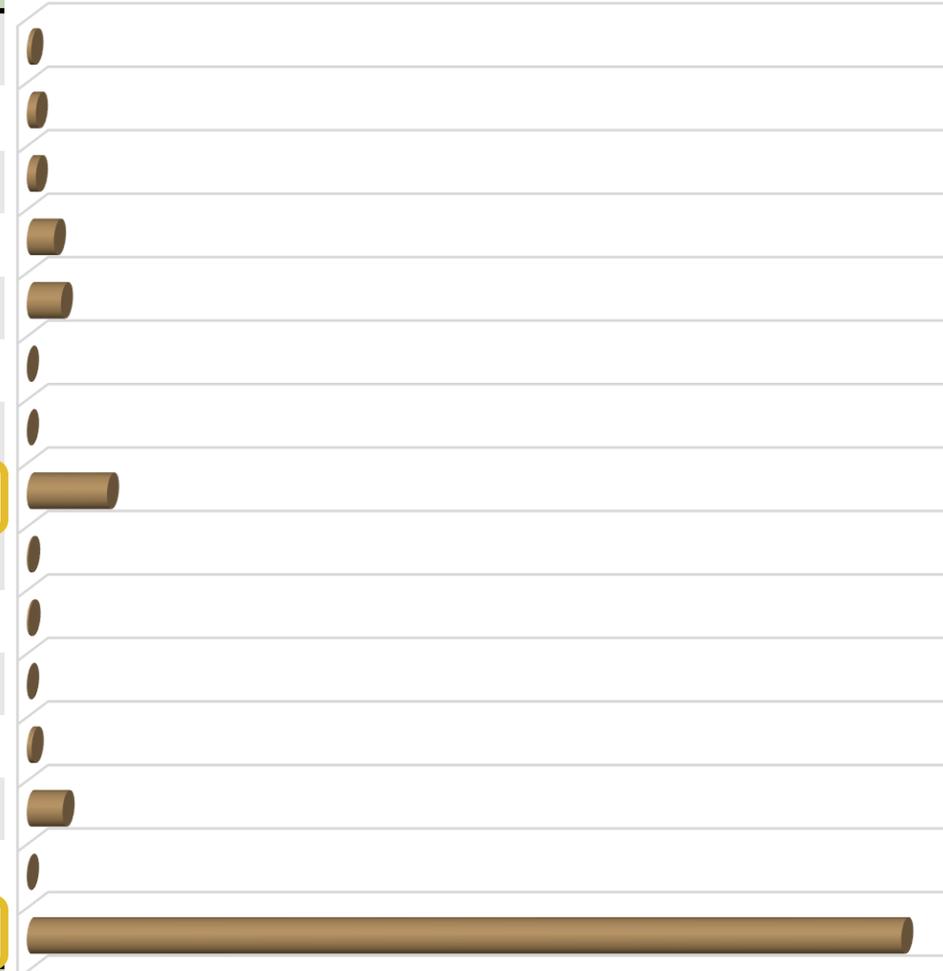
PRUEBAS DE CARGA EN LA RED INTERNA Y EXTERNA

	Número de muestras	Promedio [ms]	Mediana [ms]	Percentil 99% [ms]	Min [ms]	Max [ms]	Rendimiento [solicitudes/s]
Red Interna	9304	50	51	95	7	152	211.07
Red Externa	2498	196	190	360	147	656	56.57



PRUEBA DE RENDIMIENTO: PROTOCOLO MQTT

Topic	Número de mensajes	Throughput [mensaje/h]
ESP8266/BH1750/#	271	60.22
ESP8266/AHT10/#	542	120.44
ESP8266/MS5611/#	542	120.44
ESP8266/TCS34725/#	1632	362.67
ESP8266/MQ2/#	2055	456.67
CAM/01/#	5	1.11
CAM/02#	5	1.11
HASP/#	4830	1073.33
ESP01/DFPLAYER/#	79	17.56
ESP01/IR/#	100	22.22
ESP01/MPU6050/#	14	3.11
FPGA/#	291	64.67
ESP32/HUERTO/#	2152	478.22
PIC/#	7	1.56
\$SYS/#	52656	11701.33
Total:	65181	14484.67



RENDIMIENTO DEL SERVIDOR



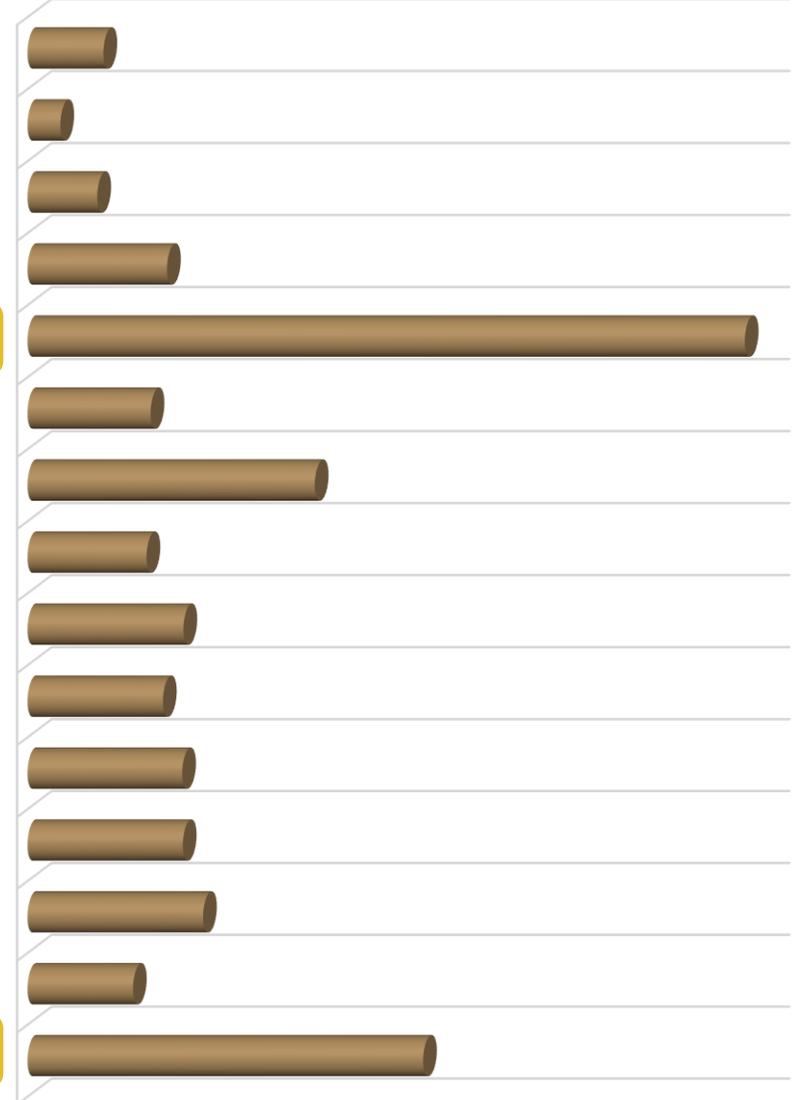
Métricas del servidor

	Disk use (percent) /config	19.1%
	Memory use (percent)	62.4%
	Processor use	2%



Componente	Cantidad	Precio Referencial	Precio Total
Interruptor inteligente Tuya Smart	1	\$18.50	\$18.50
Enchufe Inteligente TP link	1	\$8.00	\$8.00
Foco Inteligente TP Link	1	\$17.00	\$17.00
Google Home Mini	1	\$34.00	\$34.00
Raspberry PI 3	1	\$175.00	\$175.00
Pantalla Táctil WT32	1	\$30.00	\$30.00
Nodo Cámara inteligente	2	\$35.00	\$70.00
Nodo Control Remoto IR Genérico	1	\$29.00	\$29.00
Nodo de Notificaciones	1	\$38.00	\$38.00
Nodo de Control por movimiento	1	\$33.00	\$33.00
Nodo de Control de Acceso	1	\$37.70	\$37.70
Nodo Control de Riego	1	\$37.85	\$37.85
Nodo de Sensores I2C	1	\$42.78	\$42.78
Nodo Detector de Gases	1	\$25.70	\$25.70
Nodo Control de iluminación	1	\$96.42	\$96.42
		Total:	\$692.95

COSTO DEL SISTEMA



CONCLUSIONES

- En el presente trabajo de titulación se implementó un sistema de hogar inteligente mediante la integración de nodos desarrollados en base a chips, sensores y actuadores, con nodos comerciales. Los dispositivos inteligentes desarrollados se ajustan de mejor manera a las necesidades del usuario y se basan en dos componentes principales para su procesamiento, como el microcontrolador y la FPGA, brindando una mayor comodidad, seguridad y eficiencia energética en el hogar.
- En el sistema de hogar inteligente fue posible la integración de nodos comerciales con nodos desarrollados basados en microcontrolador y FPGA mediante un protocolo de comunicación rápido, liviano y confiable como lo es MQTT. Para la implementación de este protocolo es necesario que el servidor tenga instalado un sistema operativo como Home Assistant y la integración de Mosquitto bróker.
- El consumo energético anual de los 11 nodos desarrollados es 85.92 kWh lo que representa un gasto de 7.92 USD en Ecuador. El gasto anual de energía de un electrodoméstico como la lavadora es alrededor de 23.46 USD, por lo cual, si se compara con el precio de consumo de los nodos, resulta viable la implementación de estos dispositivos IoT en un sistema de hogar inteligente para brindar comodidad, seguridad y eficiencia energética a los usuarios.

CONCLUSIONES

- El costo total del sistema de hogar inteligente es de 692.95 USD, el cual incluye el servidor junto con los dispositivos comerciales y desarrollados. Los nodos comerciales disponibles en el mercado evidencian mejores características tecnológicas que los desarrollados a un precio competitivo. El dispositivo desarrollado que mayor ahorro permite al usuario es el nodo control de iluminación basado en FPGA ya que reemplaza a 10 interruptores o focos inteligentes.
- El nodo basado en FPGA emplea la Spartan Edge Accelerator Board como placa de desarrollo, la cual permite controlar 10 focos y 10 interruptores a través de una interfaz o pulsadores y monitorear la temperatura con Home Assistant. La placa SEA combina la programabilidad de la FPGA y la conectividad inalámbrica del ESP32 mediante la interfaz de comunicación I2C. En cuanto a su funcionamiento, es necesario realizar la programación de la FPGA en un lenguaje como VHDL y para el ESP32 se puede programar en C++ en el entorno Arduino. El principal aporte de este trabajo es el desarrollo de este nodo, debido a que representó un gran trabajo investigativo para su programación e implementación como dispositivo inteligente en el hogar.
- Las pruebas de carga muestran que el tiempo de respuesta promedio para las solicitudes HTTP en la red interna es de 50 ms y en la red externa es de 196 ms. En ambos casos este tiempo es muy aceptable ya que los usuarios perciben una respuesta inmediata. De acuerdo con Google LLC, un tiempo medio de respuesta menor a 200 ms es adecuado para brindar una buena experiencia de usuario.



CONCLUSIONES

- El servidor tiene un porcentaje de uso de disco del 19.1%, lo cual se considera bajo y bueno para el equipo. Esto significa que existe mucho espacio libre en el disco para almacenar datos adicionales, actualizaciones y acomodar el crecimiento del sistema.
- Una utilización de memoria del 62.4% en el servidor se considera moderada. Es importante disponer de algo de memoria no utilizada, ya que permite al sistema operativo almacenar en caché los datos utilizados con más frecuencia, lo que mejora el rendimiento general. Sin embargo, si el uso de la memoria se mantiene constantemente alto (por encima del 80%) y hay escasez de memoria disponible, puede provocar que el sistema se ralentice y cause problemas de rendimiento. En tales casos, puede ser necesario actualizar la memoria u optimizar su uso cerrando las aplicaciones y servicios innecesarios.
- La Raspberry Pi 3 Modelo B que se utiliza como servidor presenta un porcentaje de uso del procesador de 2%, lo que se considera bajo. Esto significa que el procesador tiene mucha capacidad sin utilizar y que hay un gran margen para carga de trabajo adicional, de esta manera se evita problemas de rendimiento en el futuro. Esta placa de desarrollo evidencia en general un rendimiento adecuado para la implementación de este tipo de sistemas.



RECOMENDACIONES

- Con la finalidad de abaratar los costos en el desarrollo de dispositivos IoT y volver más competitivo el sistema de hogar inteligente es necesario buscar una producción a gran escala y una importación directa de los componentes electrónicos, de esta manera resulta más accesible la implementación de este tipo de sistemas en los hogares ecuatorianos.
- Difundir este tipo de tecnología y los beneficios de su uso en los hogares ecuatorianos mediante la organización de demostraciones y eventos para mostrar las casas inteligentes y sus características, ofrecer incentivos como descuentos y opciones de financiación para fomentar la implementación, además de brindar formación y apoyo a los usuarios sobre cómo utilizar y mantener los hogares inteligentes para automatizar y monitorear la vivienda.



TRABAJOS FUTUROS

- En un trabajo futuro se podría focalizar en la realización de pruebas de penetración en dispositivos y redes domésticas inteligentes mediante la simulación de ataques reales al sistema para identificar puntos débiles y vulnerabilidades de seguridad. Este enfoque es un método eficaz para verificar la seguridad del sistema y es fundamental para mantener la seguridad y la privacidad de los usuarios de hogares inteligentes.
- Integrar un nodo IoT con redes neuronales que mejore el control de acceso a la vivienda mediante el reconocimiento facial y de voz de los usuarios para brindar mayor seguridad y confort en el hogar. Existen placas de desarrollo que soportan la implementación de este tipo de aplicaciones, realizando procesamiento en el borde, lo que significa que los datos generados se procesan localmente en el dispositivo y en tiempo real.

