



Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión

Facultad de Ingeniería Industrial, Sistemas e Informática
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

Relación entre la frecuencia de operación de microcontroladores y el consumo energético en sistemas embebidos

Tesis

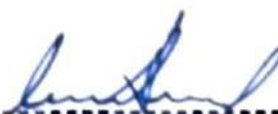
Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

Autor

Elias Melin Sanchez Mariños

Asesor

Ing. Paul Dino Beteta Osorio



**PAUL DINO
BETETA OSORIO**
Ingeniero Electrónico
CIP N° 319756

Huacho – Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial – Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Reconocimiento: Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. **No Comercial:** No puede utilizar el material con fines comerciales. **Sin Derivadas:** Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. **Sin restricciones adicionales:** No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN

LICENCIADA

(Resolución de Consejo Directivo N° 012-2020-SUNEDU/CD de fecha 27/01/2020)

FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL, SISTEMAS E INFORMÁTICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

METADATOS

DATOS DEL AUTOR (ES):		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	FECHA DE SUSTENTACIÓN
Elias Melin Sanchez Mariños	63497217	02 – 07 – 2026
DATOS DEL ASESOR:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CÓDIGO ORCID
Paul Dino Beteta Osorio	47238659	https://orcid.org/0009-0005-8876-7912
DATOS DE LOS MIEMBROS DE JURADOS – PREGRADO/POSGRADO-MAESTRÍA-DOCTORADO:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CÓDIGO ORCID
Teodorico Jamanca Alberto	15604418	https://orcid.org/0000-0002-9739-6683
Ulises Robert Martínez Chafalote	15616588	https://orcid.org/0000-0002-9523-308X
Ernesto Díaz Ronceros	46943961	https://orcid.org/0000-0002-2841-7014

Elias Melin Sanchez Mariños

Relación entre la frecuencia de operación de microcontroladores y el consumo energético en sistemas emb...

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FIISI - PREGRADO 2026

Unidad de Investigación de la FIISI - 2026

Facultad de Ingeniería Industrial, Sistemas e Informática

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::1:3498571533

Fecha de entrega

5 mar 2026, 11:41 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

5 mar 2026, 12:01 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

BORRADOR_DE_SANCHEZ_MARI_OS_-_CORREGIDO.pdf

Tamaño del archivo

714.8 KB

87 páginas

14.665 palabras

93.576 caracteres



Página 2 de 92 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::1:3498571533

13% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

13% Fuentes de Internet

3% Publicaciones

6% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

“A mis seres queridos, cuyo amor, apoyo incondicional y confianza me impulsaron a alcanzar esta meta.”

Elias Melin Sánchez Mariños

AGRADECIMIENTO

Agradezco, en primer lugar, a Dios por brindarme la fortaleza y la constancia necesarias para culminar esta etapa académica. Expreso mi sincero agradecimiento a mi asesor de tesis por su orientación, paciencia y valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo.

Asimismo, agradezco a los docentes de la carrera por los conocimientos transmitidos a lo largo de mi formación profesional. Finalmente, agradezco a mi familia por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante, los cuales fueron fundamentales para alcanzar este logro académico.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	5
AGRADECIMIENTO.....	6
RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12
 CAPÍTULO I	 18
 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	 19
1.1. Descripción de la realidad problemática	19
1.2. Formulación del problema	27
1.2.1. Problema general.....	27
1.2.2. Problemas específicos	27
1.3. Objetivos de la investigación	28
1.3.1. Objetivo general	28
1.3.2. Objetivos específicos.....	28
1.4. Justificación.....	29
1.5. Delimitación	30
1.6. Viabilidad	32
 CAPÍTULO II	 34
 MARCO TEÓRICO.....	 35
2.1. Antecedentes del estudio.....	35

2.1.1.	Antecedentes internacionales	35
2.1.2.	Antecedentes Nacionales	37
2.2	Bases Teóricas:.....	40
2.2.1	Frecuencia de operación de microcontroladores	40
2.2.2	Configuración del reloj.....	41
2.2.3	Estabilidad de frecuencia	43
2.2.4	Control y ajuste dinámico	44
2.2.5	Consumo energético en sistemas embebidos	45
2.2.6	Consumo dinámico.....	47
2.2.7	Consumo estático	48
2.2.8	Eficiencia energética	49
2.4.	Hipótesis e investigación.....	53
2.4.1.	Hipótesis general	53
2.4.2.	Hipótesis específicas.....	53
2.5.	Operacionalización de las variables	53
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....		57
3.1	Diseño metodológico.....	58
3.1.1	Tipo de investigación	58
3.1.2	Nivel de Investigación.....	58
3.1.3	Diseño.....	58
3.1.4	Enfoque	58
3.2	Población y muestra	59
3.2.1	Población.....	59

3.2.2	Muestra.....	59
3.3	Técnica para la recolección de datos.....	60
CAPÍTULO IV: RESULTADOS		61
4.1	Análisis de resultados.....	62
4.2	Contrastación de hipótesis.....	70
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN		77
5.1	Discusión de los resultados	78
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		80
6.1	Conclusiones	81
6.2	Recomendaciones.....	82
REFERENCIAS.....		83
7.1	Referencias bibliográficas.....	84
7.2	Referencias electrónicas.....	84
ANEXOS		86

RESUMEN

La presente tesis analiza la relación entre la frecuencia de operación de los microcontroladores y el consumo energético en sistemas embebidos, utilizando como caso de estudio el microcontrolador ESP32. El objetivo principal fue determinar cómo la frecuencia de operación influye en el comportamiento energético del sistema, considerando la configuración del reloj, la estabilidad de la frecuencia y el uso de mecanismos de ajuste dinámico. Para ello, se realizaron pruebas experimentales bajo distintas configuraciones de frecuencia, midiendo tanto el consumo instantáneo de corriente como la energía total consumida durante la ejecución de tareas representativas. Los resultados obtenidos evidencian que el incremento de la frecuencia produce un aumento del consumo energético, aunque este efecto puede verse parcialmente compensado por la reducción del tiempo de ejecución en ciertas aplicaciones. Asimismo, se determinó que la estabilidad de la frecuencia contribuye a un consumo más uniforme y predecible, mientras que el ajuste dinámico de frecuencia permite reducir el consumo promedio cuando se implementa adecuadamente. En conjunto, los hallazgos confirman que la frecuencia de operación constituye una variable crítica en el diseño de sistemas embebidos, y que su gestión adecuada permite equilibrar el rendimiento del sistema con las restricciones energéticas propias de aplicaciones modernas.

Palabras clave: sistemas embebidos, consumo energético, frecuencia de operación.

ABSTRACT

This thesis analyzes the relationship between the operating frequency of microcontrollers and energy consumption in embedded systems, using the ESP32 microcontroller as a case study. The main objective was to determine how operating frequency influences the energy behavior of the system, considering clock configuration, frequency stability, and the use of dynamic frequency adjustment mechanisms. Experimental tests were conducted under different frequency settings, measuring both instantaneous current consumption and total energy consumed during representative tasks. The results show that increasing the operating frequency leads to higher energy consumption, although this effect can be partially offset by shorter execution times in certain applications. In addition, frequency stability was found to contribute to more uniform and predictable energy consumption, while dynamic frequency adjustment allows a reduction in average energy consumption when properly implemented. Overall, the findings confirm that operating frequency is a critical design variable in embedded systems and that proper frequency management enables a balance between system performance and energy constraints.

Keywords: embedded systems, energy consumption, operating frequency.

INTRODUCCIÓN

El avance vertiginoso de la electrónica digital ha cambiado la forma en que interactuamos con el mundo, muchas veces sin que seamos plenamente conscientes de ello. Desde el despertador que nos saca de la cama hasta los sistemas de control que regulan procesos industriales complejos, los sistemas embebidos están presentes de manera silenciosa pero decisiva. En el corazón de estos sistemas se encuentran los microcontroladores, pequeños dispositivos que concentran en un solo chip la capacidad de procesar información, tomar decisiones y comunicarse con el entorno. Su aparente sencillez contrasta con la enorme responsabilidad que cargan: ejecutar tareas de manera confiable mientras administran recursos limitados, siendo la energía uno de los más críticos.

El consumo energético ha pasado de ser un detalle técnico a convertirse en una preocupación central para ingenieros, desarrolladores y diseñadores de sistemas. Basta pensar en un sensor remoto alimentado por una batería que debe durar meses, o incluso años, sin intervención humana. Cada microamperio cuenta. En este escenario, la frecuencia de operación del microcontrolador aparece como una perilla tentadora: subirla promete más velocidad y capacidad de respuesta; bajarla sugiere ahorro energético y mayor autonomía. La pregunta surge casi de manera natural: ¿qué se gana y qué se pierde al mover esa perilla?, ¿realmente más frecuencia implica siempre más consumo?, ¿o el panorama es más complejo de lo que parece a primera vista?

A medida que las aplicaciones exigen más procesamiento —pilas de comunicación más pesadas, algoritmos de cifrado, tratamiento de señales o simples interfaces de usuario más elaboradas— los microcontroladores han ido incrementando sus frecuencias de reloj. Hoy no resulta extraño encontrar dispositivos de bajo costo operando a decenas o incluso centenas de megahercios. Esa capacidad abre muchas puertas, aunque también introduce tensiones en el diseño energético. Cada ciclo de reloj implica conmutaciones internas, corrientes que van y vienen, calor que se disipa. Esa actividad tiene un precio energético, y pagarlo o no depende de cómo se configure y se programe el sistema.

Desde una perspectiva física, el vínculo entre frecuencia y consumo parece claro: a mayor número de conmutaciones por segundo, mayor gasto energético. El consumo dinámico crece con la frecuencia y con el nivel de voltaje, una relación bien conocida en la teoría de circuitos digitales. Aun así, la realidad rara vez se comporta de manera tan ordenada como las ecuaciones. Los microcontroladores modernos incorporan memorias, buses, aceleradores, periféricos y lógicas internas que no siempre reaccionan igual ante cambios de frecuencia. Un temporizador activo, un conversor analógico-digital en funcionamiento o una interfaz de comunicación enviando datos pueden alterar de forma significativa el balance energético total.

También entra en juego el consumo estático, ese gasto silencioso que permanece incluso cuando el microcontrolador “no hace nada”. Las corrientes de fuga, cada vez más relevantes a medida que las tecnologías de fabricación se miniaturizan, introducen un piso energético que no desaparece por bajar la frecuencia. Esto plantea una paradoja interesante: ejecutar una tarea muy lentamente puede mantener el sistema activo más tiempo y terminar gastando más energía que

hacerlo rápido y volver a un estado de reposo profundo. ¿Conviene correr despacio y constante, o rápido y descansar? La respuesta no es universal y depende de múltiples factores.

Los fabricantes son conscientes de esta complejidad y han respondido con una amplia gama de mecanismos de gestión de energía. Modos de bajo consumo, suspensión selectiva de periféricos, escalado de frecuencia e incluso ajustes automáticos de voltaje forman parte del arsenal habitual. Sobre el papel, estas herramientas prometen un control fino del consumo energético. En la práctica, su comportamiento depende de cómo se integren en el diseño y de qué tan bien se comprendan sus implicaciones. Un modo de bajo consumo mal gestionado puede no aportar beneficios reales; una frecuencia mal elegida puede generar un gasto innecesario que pase desapercibido durante las pruebas iniciales.

En este punto, el papel del desarrollador y del investigador cobra especial relevancia. No basta con conocer las especificaciones del microcontrolador; es necesario observar cómo se comporta en situaciones reales, ejecutando tareas concretas, con cargas de trabajo que reflejen el uso previsto del sistema. Medir corriente mientras se ejecuta un bucle vacío dice poco. Medir energía durante la transmisión periódica de datos por radio, o durante el procesamiento de una señal capturada por sensores, ofrece una imagen mucho más cercana a la realidad. Es ahí donde la relación entre frecuencia de operación y consumo energético muestra matices, contradicciones aparentes y oportunidades de optimización.

La literatura técnica reúne numerosos estudios dedicados al consumo energético en sistemas embebidos; sin embargo, buena parte de ellos se orienta a comparar arquitecturas o a

describir estrategias generales de optimización. Aunque estos aportes resultan valiosos, con frecuencia dejan sin resolver una cuestión más específica: cómo se modifica el consumo cuando se ajusta la frecuencia de reloj dentro de un mismo dispositivo y bajo condiciones estrictamente controladas. Para quienes desarrollan sistemas reales, este dato no es menor. Decidir si un microcontrolador debe operar a 8 MHz, 16 MHz o 32 MHz trasciende lo meramente técnico, ya que puede incidir directamente en la autonomía de la batería o en el comportamiento térmico del equipo.

Esta investigación surge precisamente de esa necesidad concreta. Examinar el vínculo entre la frecuencia de operación de los microcontroladores y el consumo energético en sistemas embebidos exige abordar el fenómeno desde distintas perspectivas, evitando conclusiones simplistas. El propósito no consiste únicamente en registrar valores de corriente en determinados puntos del circuito, sino en comprender qué representan esos datos cuando se integran a lo largo del tiempo y se vinculan con el rendimiento efectivo del sistema. En este sentido, la energía total requerida para completar una tarea específica, más que el consumo instantáneo, se perfila como un indicador fundamental para valorar el impacto real de la frecuencia seleccionada.

De allí que el enfoque experimental adquiera un papel central. Escoger un microcontrolador representativo, diseñar escenarios de prueba que puedan reproducirse con fidelidad y utilizar instrumentos de medición adecuados demanda precisión y constancia. Incluso detalles aparentemente menores —como un periférico activado sin necesidad, una interrupción mal gestionada o una configuración secundaria del reloj— pueden alterar de forma significativa los resultados obtenidos. Lejos de constituir un obstáculo, esta sensibilidad experimental revela

la complejidad inherente al problema y subraya la importancia de un análisis cuidadoso. El comportamiento energético en sistemas embebidos no depende de un único factor aislado, sino de la interacción continua entre decisiones de hardware y estrategias de software.

Las implicaciones de este análisis trascienden el entorno controlado del laboratorio. Una configuración inadecuada puede reducir drásticamente la vida útil de una batería, incrementar los costos de mantenimiento o comprometer el funcionamiento de aplicaciones críticas, como dispositivos de instrumentación médica o sistemas de monitoreo ambiental. En contraste, un diseño que considere de manera explícita el efecto de la frecuencia de operación puede traducirse en soluciones más duraderas, estables y eficientes. En un contexto donde la sostenibilidad dejó de ser una aspiración teórica para convertirse en una exigencia concreta, las decisiones técnicas vinculadas al consumo energético adquieren una relevancia adicional.

El software, por su parte, desempeña un rol tan determinante como el hardware. La organización de las tareas, la administración de interrupciones, el uso adecuado de temporizadores y la gestión de transiciones entre estados activos y modos de reposo influyen directamente en el perfil energético del sistema. Analizar cómo la frecuencia impacta en estos mecanismos permite desarrollar código más consciente del consumo, incluso cuando el diseño electrónico permanece inalterado. Para profesionales con trayectoria en sistemas embebidos, esta relación puede resultar evidente; para quienes se inician en el área, comprenderla puede transformar de manera profunda su aproximación al diseño.

A lo largo de esta tesis se adopta una perspectiva prudente: no existen soluciones universales ni fórmulas aplicables a todos los casos. La relación entre frecuencia de operación y consumo energético está condicionada por múltiples variables, entre ellas la naturaleza de la aplicación, el entorno de funcionamiento y las decisiones específicas de diseño. Reconocer esta diversidad de factores no debilita el análisis, sino que lo fortalece. Admitir que los resultados dependen del contexto y que ciertas conclusiones no pueden generalizarse indiscriminadamente contribuye a dotar al estudio de mayor solidez y abre nuevas líneas de investigación.

Se invita al lector a recorrer este trabajo con una actitud analítica. ¿Reducir la frecuencia garantiza siempre un menor consumo energético? ¿Conviene ejecutar tareas intensivas en el menor tiempo posible para regresar antes a un modo de bajo consumo? ¿Cómo inciden los estados de reposo y la gestión de periféricos en el balance final de energía? Estas preguntas no buscan respuestas categóricas, sino promover una reflexión sustentada en datos experimentales y en una interpretación rigurosa de los resultados. El objetivo es aportar claridad en un ámbito donde la intuición no siempre coincide con la evidencia empírica.

En definitiva, esta tesis se propone profundizar en uno de los compromisos esenciales del diseño de sistemas embebidos. Estudiar la influencia de la frecuencia de operación de los microcontroladores sobre el consumo energético permite articular la teoría electrónica, la validación experimental y las decisiones prácticas de ingeniería. Se aspira así a fomentar un enfoque de diseño más consciente, en el que rendimiento y eficiencia energética no se perciban como variables antagónicas, sino como dimensiones que pueden equilibrarse mediante criterio técnico y comprensión fundamentada.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción de la realidad problemática

En la actualidad, la sociedad transita una etapa marcada por la presencia constante de dispositivos electrónicos que interactúan de forma continua tanto con las personas como con su entorno. Desde electrodomésticos inteligentes y sistemas de automatización industrial hasta aplicaciones médicas, automotrices y de telecomunicaciones, los sistemas embebidos se han consolidado como el núcleo funcional de una amplia variedad de tecnologías. Estos sistemas, entendidos como la integración estrecha de hardware y software orientada a ejecutar tareas específicas en tiempo real, dependen en gran medida del desempeño y la eficiencia de sus componentes esenciales, entre los que sobresalen los microcontroladores. Al reunir en un único chip capacidades de procesamiento, memoria y control de periféricos, los microcontroladores ofrecen una solución de alta integración y costo reducido, lo que explica su papel central en la electrónica contemporánea. No obstante, el aumento sostenido en las exigencias de procesamiento y conectividad ha convertido la eficiencia energética en un criterio decisivo dentro de los procesos de diseño y optimización.

El consumo energético en sistemas embebidos se ha transformado en uno de los retos más significativos, tanto desde la perspectiva técnica como desde la ambiental. En un escenario global donde la sostenibilidad y la disminución de la huella de carbono ocupan un lugar prioritario en las agendas estratégicas, desarrollar dispositivos con bajo

consumo ya no es una opción secundaria, sino una necesidad concreta. Las restricciones de autonomía en equipos alimentados por baterías —como sensores inalámbricos, dispositivos portátiles o plataformas asociadas al Internet de las Cosas (IoT)— evidencian con claridad la importancia de optimizar cada variable que incida en el gasto energético. Dentro de este marco, la frecuencia de operación de los microcontroladores adquiere un protagonismo particular. La relación entre la frecuencia del reloj del procesador y el consumo energético total dista de ser simple o proporcional, ya que intervienen factores físicos, eléctricos y arquitectónicos que influyen directamente en los mecanismos de disipación de potencia y en la dinámica global del sistema.

A nivel técnico, el consumo energético de un microcontrolador se divide principalmente en dos componentes: el consumo dinámico, asociado a las transiciones de estado en los circuitos lógicos, y el consumo estático, vinculado a las corrientes de fuga en los transistores incluso cuando no se realiza procesamiento activo. La frecuencia de operación influye directamente sobre el consumo dinámico, dado que este se incrementa proporcionalmente al número de transiciones por unidad de tiempo. A mayores frecuencias, los microcontroladores ejecutan más ciclos de instrucción en un mismo intervalo temporal, lo que implica mayor actividad de conmutación y, por ende, mayor consumo de energía. Sin embargo, reducir la frecuencia con el propósito de disminuir la energía consumida puede tener un efecto contraproducente, ya que prolonga los tiempos de ejecución de las tareas, aumentando el periodo durante el cual el sistema permanece activo. Esta dualidad genera un dilema de optimización donde no basta con disminuir la frecuencia de reloj para lograr eficiencia energética; es necesario

comprender la interacción compleja entre los parámetros de hardware, las condiciones de operación y las estrategias de gestión de energía implementadas.

En el ámbito industrial y académico, la investigación sobre la relación entre frecuencia de operación y consumo energético ha cobrado importancia en la medida en que los dispositivos embebidos se integran a infraestructuras críticas. Por ejemplo, en los sistemas IoT distribuidos en redes de sensores ambientales, la vida útil del nodo depende directamente del consumo de energía del microcontrolador. Un diseño ineficiente puede traducirse en costos operativos elevados, mayor frecuencia de mantenimiento y reemplazo de baterías, e incluso en pérdida de información por fallas prematuras. De manera similar, en la industria automotriz, los sistemas de control electrónico exigen una gestión energética precisa para garantizar tanto la funcionalidad continua como la reducción del peso total de los vehículos mediante la optimización de la batería. En el contexto médico, los dispositivos implantables o portátiles demandan un equilibrio extremadamente delicado entre rendimiento computacional y consumo, donde la seguridad y la confiabilidad están estrechamente relacionadas con la eficiencia energética.

No obstante, a pesar de la relevancia de este fenómeno, existe todavía un vacío significativo en la caracterización empírica y analítica de cómo la frecuencia de operación afecta al consumo energético en distintos entornos y arquitecturas de microcontroladores. Si bien los fabricantes suelen proveer hojas de datos con estimaciones del consumo a diversas frecuencias y voltajes, dichas cifras se basan en

condiciones de laboratorio o modelos teóricos que no siempre reflejan las cargas reales de trabajo. Las aplicaciones embebidas difieren sustancialmente entre sí en cuanto al tipo de tareas, el uso de periféricos, los modos de suspensión, las interrupciones y las condiciones ambientales, factores todos que modifican la manera en que la frecuencia de operación impacta la eficiencia total del sistema. Por ello, los resultados teóricos o de simulación deben ser contrastados mediante mediciones experimentales en contextos reales para lograr una comprensión integral y aplicable al diseño.

En el terreno académico, la literatura especializada ha mirado este problema desde ángulos muy distintos, casi como si cada grupo de investigación estuviera iluminando una cara diferente del mismo poliedro. Algunos trabajos plantean modelos matemáticos donde el consumo energético se expresa como función de la frecuencia de operación y del voltaje de alimentación. De ahí nacieron las conocidas estrategias de escalado dinámico de frecuencia y voltaje (DVFS), tan extendidas en procesadores de propósito general. Con esas ecuaciones en la mano es posible estimar potencia dinámica y estática, y anticipar qué pasará con el rendimiento o con la temperatura si se toca un parámetro. Suena ordenado, casi elegante. El problema aparece cuando esas ideas bajan del laboratorio a un microcontrolador de bajo costo: muchos no traen reguladores de voltaje configurables en tiempo real, y modificar la frecuencia puede desajustar periféricos críticos como módulos de comunicación o conversores analógico y digitales. Ahí es donde la teoría tropieza con la realidad del silicio barato, y aplicar sin más técnicas pensadas para arquitecturas complejas deja de ser tan simple en entornos embebidos restringidos.

Frente a ese enfoque teórico, otros investigadores prefieren ensuciarse las manos. Optan por una vía marcadamente experimental: miden, registran, comparan. Con instrumentación de alta precisión caracterizan el consumo en modo activo, en reposo, en suspensión profunda o durante la ejecución de rutinas concretas. El objetivo Detectar patrones que orienten el diseño de firmware que no devore batería sin necesidad. Este camino aporta datos duros, evidencia tangible, y permite contrastar predicciones con el comportamiento real del hardware, que a veces se comporta como quiere. El detalle es que la diversidad de arquitecturas, procesos de fabricación y configuraciones de prueba complica mucho comparar resultados entre estudios. Sin protocolos estandarizados ni métricas uniformes, generalizar conclusiones se vuelve un rompecabezas. Por eso sigue latente la necesidad de investigaciones comparativas bajo criterios sistemáticos y reproducibles.

En la práctica profesional, quien diseña sistemas embebidos no puede decidir la frecuencia de operación como si moviera un único interruptor. Debe equilibrar desempeño y restricciones energéticas en un juego de tensiones constantes. Influyen la complejidad de la carga computacional, la disponibilidad real de modos de bajo consumo, la calidad del sistema de alimentación y las particularidades eléctricas del microcontrolador. Pensemos en algo concreto: subir la frecuencia puede permitir terminar una tarea antes y entrar más rápido en reposo, reduciendo el consumo promedio. Suena ideal. Pero si el firmware no está preparado para explotar bien esos modos de suspensión, o si cada transición entre estados cuesta energía extra, la ganancia

se evapora e incluso puede volverse en contra. Por eso la frecuencia no debería elegirse de forma aislada, sino como parte de una estrategia integral que contemple tanto la física del dispositivo como la lógica del software.

El asunto cobra otra dimensión cuando miramos el crecimiento proyectado del Internet de las Cosas y de los sistemas ciberfísicos. Se espera que en los próximos años se desplieguen decenas de miles de millones de dispositivos interconectados, muchos alimentados por baterías o fuentes intermitentes. Ahora bien, ¿qué ocurre si cada nodo opera sin criterios rigurosos de eficiencia?. El efecto acumulativo sobre la demanda energética global puede ser nada trivial. Entender con precisión la relación entre frecuencia de reloj y consumo deja de ser un capricho técnico y pasa a tener implicaciones económicas y ambientales muy concretas. Una optimización bien planteada, replicada a gran escala, podría traducirse en reducciones apreciables del consumo eléctrico agregado y de las emisiones asociadas.

Desde la educación y la investigación aplicada, la falta de estudios experimentales que correlacionen de forma directa y cuantitativa la frecuencia con el consumo abre una puerta interesante. Desarrollar bancos de prueba capaces de medir, bajo condiciones controladas y repetibles, el comportamiento energético de microcontroladores en distintos escenarios permitiría construir bases de datos comparables y con alto valor científico. Eso beneficiaría tanto a la academia como a la industria, al ofrecer criterios objetivos para seleccionar y configurar dispositivos.

También podría respaldar la definición de estándares de eficiencia energética y orientar políticas públicas relacionadas con el diseño sostenible de hardware electrónico.

La complejidad del problema no es casual. Intervienen muchas variables: la tecnología de fabricación el nodo de integración, las características del proceso CMOS condiciona corrientes de fuga y potencia dinámica. La arquitectura interna, con su organización de buses y memorias, influye en la actividad de conmutación y en la disipación. Se suman la cantidad y tipo de periféricos activos, las estrategias de manejo de interrupciones y hasta las condiciones térmicas del entorno. Incluso la carga de trabajo cambia el panorama: no es lo mismo ejecutar algoritmos intensivos de procesamiento de señales que realizar tareas centradas en adquirir y transmitir datos. Así, la relación entre frecuencia y consumo no es una constante grabada en piedra; depende del contexto operativo y del perfil de uso concreto.

Si adoptamos una mirada sistémica, abordar este desafío exige combinar modelado matemático, experimentación rigurosa y análisis comparativo. Los modelos ayudan a anticipar tendencias y formular hipótesis; las mediciones empíricas las validan o las corrigen; el contraste entre escenarios deja ver patrones y también excepciones incómodas. Solo integrando estas herramientas se construye una comprensión que vaya más allá de casos aislados. De ese modo es posible identificar puntos de equilibrio entre rendimiento y eficiencia, y delimitar rangos de operación adecuados para aplicaciones específicas.

En términos de sostenibilidad, perfeccionar metodologías que orienten la elección de la frecuencia con el objetivo de reducir el consumo tiene un impacto directo en el desarrollo de dispositivos más respetuosos con el entorno. En regiones con recursos energéticos limitados o infraestructura eléctrica deficiente, la eficiencia de los sistemas embebidos adquiere un valor estratégico. Un equipo que administra bien su energía prolonga la vida útil de su fuente de alimentación, disminuye intervenciones de mantenimiento y reduce la dependencia de redes inestables. Esto afecta de manera concreta a sectores como la agricultura inteligente, la telemedicina o la monitorización ambiental, donde la autonomía energética puede marcar la diferencia entre que un proyecto funcione o se quede a medio camino.

Finalmente, la escasez de estudios que establezcan con rigor la correlación cuantitativa entre frecuencia de operación y consumo evidencia una brecha de conocimiento que justifica nuevas investigaciones empíricas. Determinar con precisión qué intervalos de frecuencia ofrecen mayor eficiencia para un microcontrolador específico, e identificar los puntos de compromiso entre desempeño y gasto energético, resulta clave para avanzar hacia diseños mejor ajustados a la realidad. Comprender a fondo esta relación permitirá perfeccionar hardware y software, e implementar estrategias de gestión energética adaptativa capaces de responder a variaciones en la carga de trabajo.

En síntesis, equilibrar rendimiento y eficiencia en un escenario de expansión tecnológica y creciente preocupación ambiental coloca la relación entre frecuencia de

operación y consumo energético en el centro del debate sobre sistemas embebidos. Aunque los fundamentos teóricos del consumo en circuitos digitales se conocen desde hace años, la falta de caracterización experimental contextualizada limita la formulación de soluciones plenamente ajustadas a aplicaciones reales. Explorar con mayor rigor este vínculo no es solo un reto científico; también es un paso decisivo hacia tecnologías embebidas más sostenibles, confiables y preparadas para lo que viene.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

- ¿Cuál es la relación entre la frecuencia de operación de los microcontroladores y el consumo energético en sistemas embebidos durante la ejecución de tareas bajo condiciones de funcionamiento controladas?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo influye la configuración del reloj del microcontrolador en el consumo energético total del sistema embebido durante la ejecución de procesos representativos?

- ¿De qué manera la estabilidad de frecuencia del microcontrolador afecta el consumo energético del sistema embebido en condiciones de operación continua?
- ¿Cómo incide el control y ajuste dinámico de la frecuencia de operación del microcontrolador en la variación del consumo energético del sistema embebido en distintos modos de funcionamiento?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

- Determinar la relación existente entre la frecuencia de operación de los microcontroladores y el consumo energético en sistemas embebidos.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar cómo la configuración del reloj del microcontrolador influye en el consumo energético del sistema embebido.
- Evaluar el efecto de la estabilidad de frecuencia del microcontrolador sobre el consumo energético en operación continua.

- Examinar el impacto del control y ajuste dinámico de frecuencia en la variación del consumo energético del sistema.

1.4. Justificación

La investigación sobre la relación entre la frecuencia de operación de microcontroladores y el consumo energético en sistemas embebidos se justifica por la creciente necesidad de optimizar el uso de energía en dispositivos electrónicos que forman parte esencial de la vida moderna. En un contexto donde los sistemas embebidos sustentan aplicaciones críticas en sectores como la automatización industrial, la salud, la agricultura inteligente y el Internet de las Cosas, el consumo energético se ha convertido en un parámetro determinante del desempeño y la sostenibilidad tecnológica. La eficiencia energética no solo extiende la autonomía de los dispositivos que dependen de baterías, sino que también disminuye los costos de operación y contribuye a atenuar el impacto ambiental asociado al uso intensivo de energía eléctrica. Optimizar el consumo implica, por tanto, beneficios técnicos, económicos y ecológicos que trascienden el ámbito estrictamente tecnológico.

Entender de qué manera la frecuencia de operación incide en el consumo energético permite formular estrategias de optimización orientadas a equilibrar el desempeño computacional con la eficiencia. Si bien es sabido que un aumento en la frecuencia incrementa la capacidad de procesamiento, también conlleva un mayor requerimiento energético. Esta relación obliga a identificar un punto de

compromiso en el que el sistema alcance un rendimiento adecuado sin incurrir en un gasto innecesario de energía. En este contexto, la investigación adquiere una relevancia práctica evidente, ya que proporciona evidencia empírica y lineamientos metodológicos que pueden orientar a diseñadores e ingenieros al momento de definir parámetros óptimos de funcionamiento. De este modo, se favorece el desarrollo de sistemas embebidos más sostenibles, confiables y capaces de adaptarse a distintas condiciones de operación.

Asimismo, el estudio posee valor académico y científico al aportar datos experimentales y análisis comparativos que amplían la base de conocimiento disponible sobre gestión energética en microcontroladores. Estos resultados pueden servir como referencia para futuras investigaciones y para la consolidación de metodologías más precisas en la evaluación del consumo. En definitiva, la justificación de esta tesis se fundamenta en la necesidad de generar conocimiento aplicado que permita reducir el gasto energético sin sacrificar el rendimiento, promoviendo así una innovación tecnológica alineada con criterios de eficiencia y sostenibilidad en el diseño de sistemas embebidos.

1.5. Delimitación

Delimitación temporal

La presente investigación se llevará a cabo en un periodo comprendido entre octubre del año 2025 y enero del año 2026, intervalo durante el cual se desarrollarán las fases de diseño experimental, recopilación de datos, procesamiento, análisis e interpretación y validación de resultados. Este marco

temporal hará posible examinar de manera sistemática la relación entre la frecuencia de operación de los microcontroladores y el consumo energético bajo condiciones estrictamente controladas de laboratorio. Asimismo, el lapso definido permitirá aplicar ensayos repetitivos y comparativos orientados a garantizar la consistencia y confiabilidad de los resultados obtenidos. La selección de este periodo responde también a la disponibilidad de recursos tecnológicos actualizados y a la conveniencia de enmarcar el estudio dentro del contexto de las tendencias actuales en eficiencia energética de sistemas embebidos.

Delimitación temática

El estudio se orienta de manera específica a examinar la relación cuantitativa existente entre la frecuencia de operación de los microcontroladores y el consumo energético en sistemas embebidos. No se considerarán otros factores que también influyen en el gasto de energía, tales como decisiones vinculadas al diseño de software, la topología del circuito o el comportamiento de periféricos externos. La investigación se concentra en determinar de qué forma la variación de la frecuencia incide en el consumo total de energía eléctrica del microcontrolador durante la ejecución de tareas representativas y controladas. Para ello, se recurrirá a mediciones experimentales realizadas bajo condiciones cuidadosamente definidas, con el propósito de identificar patrones consistentes de comportamiento energético. Esta delimitación temática facilita centrar el análisis en la interacción directa entre parámetros eléctricos y de procesamiento, evitando dispersión conceptual y favoreciendo la obtención de resultados pertinentes para el diseño y

la optimización de sistemas embebidos eficientes.

Delimitación poblacional

La población objeto de estudio estará integrada por microcontroladores basados en arquitecturas ARM Cortex-M y AVR, ampliamente empleados en sistemas embebidos de baja y mediana complejidad dentro de ámbitos educativos, industriales y domésticos. Se seleccionará una muestra representativa compuesta por modelos comerciales de uso extendido, que presenten distintas frecuencias máximas de operación y rangos de consumo energético especificados en la documentación técnica de los fabricantes. Quedarán excluidos microprocesadores de alto desempeño y dispositivos orientados específicamente al procesamiento gráfico o de señales. Esta delimitación poblacional permite enfocar el análisis en microcontroladores de propósito general, cuya eficiencia energética es determinante en el desarrollo de dispositivos autónomos y de bajo consumo, garantizando así la relevancia y aplicabilidad práctica de los resultados obtenidos.

1.6. Viabilidad

La investigación es viable por la disponibilidad de recursos técnicos, humanos y temporales necesarios para su ejecución. En el plano técnico, se cuenta con acceso a microcontroladores comerciales (ARM Cortex-M y AVR), bancos de prueba y equipos de medición como analizadores de potencia y osciloscopios en el laboratorio institucional o mediante convenio con laboratorios universitarios. En lo humano, el equipo de trabajo dispone de competencias en electrónica embebida,

programación de firmware y análisis de datos, además del respaldo de un tutor con experiencia en eficiencia energética. Presupuestariamente, los costos son moderados y comprenden adquisición de placas, sensores y consumibles; pueden financiarse con fondos institucionales o proyectos pequeños. El cronograma propuesto (enero-diciembre 2025) es realista y las posibles contingencias técnicas se mitigarán mediante pruebas piloto y selección de dispositivos representativos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

2.1.1. Antecedentes internacionales

Guijarro (2024) en su investigación “Diseño e implementación de pruebas de calidad mediante el uso de un sistema embebido en el proceso de producción de un dispositivo electrónico”. El antecedente analizado describió el desarrollo de un dispositivo embebido orientado a optimizar el control de calidad en la producción de dispositivos electrónicos, utilizando un microcontrolador programable para automatizar las pruebas de verificación. El sistema se integró en la línea de producción con el propósito de realizar evaluaciones precisas y repetibles, reduciendo la intervención humana y aumentando la eficiencia y fiabilidad del proceso. El proyecto incluyó el diseño de una placa de circuito impreso (PCB) y el desarrollo del software embebido necesario para ejecutar las pruebas de calidad esenciales. Además, contempló un proceso estructurado que abarcó desde el estudio de tecnologías existentes y la definición de especificaciones, hasta la implementación, validación experimental y análisis de resultados, garantizando el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos.

Carnuccio (2020) en su investigación “Análisis de rendimiento y consumo para sistema embebido con requisitos de tiempo explícitos”. El antecedente

analizado mostró que el estudio se centró en evaluar el rendimiento de un sistema embebido basado en el microcontrolador STM32F103C8T6, con el propósito de disminuir el consumo energético proveniente de una batería. El trabajo utilizó patrones de diseño de máquinas de estados, los cuales permitieron optimizar los tiempos de ejecución y respuesta del sistema. Asimismo, se realizaron múltiples pruebas modificando la frecuencia del reloj del microcontrolador para analizar su impacto en la eficiencia del procesamiento. El sistema desarrollado operaba en tiempo real, aplicado a un dispositivo de monitoreo personal con funciones de detección de caídas, geolocalización y alerta de pánico, requiriendo una estricta respuesta temporal. Para garantizar su desempeño, se emplearon técnicas de medición basadas en pulsos de reloj y temporizadores.

Medina-Duran (2020) en su investigación “Medición de energía en sistemas embebidos para el Internet de las Cosas”. El antecedente analizado mostró que la investigación abordó la problemática del alto consumo energético en dispositivos de recursos limitados, aspecto crucial para la expansión eficiente del Internet de las Cosas (IoT). Se identificó que las plataformas comerciales de medición de energía presentan costos elevados, baja precisión y rangos de medición restringidos, lo que limita su uso en entornos de investigación y desarrollo. Además, las herramientas existentes no resultaron adecuadas para los nuevos sensores y dispositivos basados en tecnología 802.11, empleados comúnmente en redes IoT. El estudio también señaló la falta de métricas unificadas para comparar el consumo energético entre microcontroladores de

distintos fabricantes. En consecuencia, el proyecto propuso el desarrollo de un sistema automatizado de hardware y software para medir de forma precisa y accesible el consumo energético en dispositivos embebidos conectados a IoT.

Dell'Oso (2017) en su investigación “Análisis de performance y consumo sobre sistemas embebidos multinúcleo”. El antecedente revisado evidenció que el estudio se orientó al análisis de sistemas multinúcleo asimétricos aplicados en entornos embebidos, respondiendo a la creciente demanda de mayor capacidad de cómputo en los sistemas de tiempo real. La investigación comparó el desempeño de dos procesadores de la familia Cortex-M, evaluando especialmente los tiempos de latencia entre núcleos bajo diferentes técnicas de comunicación. Asimismo, se examinó el consumo energético asociado a cada configuración para determinar su eficiencia y viabilidad en aplicaciones de procesamiento paralelo. El trabajo permitió identificar cómo la arquitectura multinúcleo contribuye a mejorar el rendimiento de los sistemas embebidos, manteniendo un equilibrio entre velocidad de respuesta y consumo de energía en contextos de alta exigencia computacional.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Ramos y Salcedo (2025) en su investigación “Diseño de un concentrador de datos para la transmisión y registro de lecturas de medidores de energía eléctrica domiciliarios utilizando el protocolo MODBUS-RTU”. El antecedente analizado mostró que el estudio se enfocó en el diseño de un concentrador de

datos para la lectura, registro y transmisión automática de información proveniente de medidores de energía eléctrica domiciliarios, empleando el protocolo MODBUS-RTU. El objetivo principal fue sustituir el sistema tradicional de lectura manual por una solución automatizada, capaz de mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y minimizar las pérdidas no técnicas de energía. El dispositivo desarrollado permitió almacenar datos de hasta diez medidores, generar alertas en tiempo real mediante MQTT y transmitir registros periódicos a un servidor usando FTP. El trabajo abarcó el diseño electrónico, desarrollo de firmware y análisis económico, cumpliendo con los estándares de infraestructuras de medición avanzada (AMI). Los resultados evidenciaron un sistema preciso, adaptable y viable para aplicaciones residenciales.

Reátegui (2024) en su investigación “Diseño e implementación de un sistema embebido portátil para la adquisición y procesamiento de señales electromiográficas del antebrazo”. El antecedente revisado mostró que la investigación se enfocó en el diseño e implementación de un sistema embebido para la captura y procesamiento de señales electromiográficas (EMG) del antebrazo, orientado al desarrollo de prótesis de mano y aplicaciones en rehabilitación y biomecánica. El sistema integró ocho sensores EMG secos con alta ganancia y amplio rango de frecuencia, permitiendo una lectura precisa y estable de las señales musculares. Se evaluó experimentalmente con un voluntario con amputación transradial, logrando un 94.80% de precisión en el reconocimiento de gestos de mano mediante un modelo SVM multiclase. Los resultados demostraron que el sistema desarrollado es compacto, portátil y

eficiente, constituyendo una herramienta útil para la adquisición de datos, control de prótesis y análisis de movimiento humano.

Narciso (2022) en su investigación “Sistema de medición inteligente de consumo eléctrico residencial utilizando una red de comunicación inalámbrica”. El antecedente analizado evidenció que el estudio se centró en la creación de un medidor inteligente de energía eléctrica basado en tecnología inalámbrica Wi-Fi, con el propósito de mejorar la eficiencia energética y el control del consumo. Se identificó que, en el contexto peruano, las empresas eléctricas aún dependen de personal especializado para el registro manual del consumo, lo que genera demoras y falta de acceso inmediato a la información por parte de los usuarios. Ante esta limitación, el proyecto propuso un sistema capaz de registrar automáticamente los datos de consumo y almacenarlos en una base de datos, permitiendo el monitoreo en tiempo real tanto para los proveedores como para los consumidores. Con ello, se buscó fomentar una gestión energética responsable, reducir errores de facturación y promover el uso eficiente de la energía.

Jaimes (2021) en su investigación “Sistema inteligente para el control de consumo de energía en el hogar”. El antecedente analizado mostró que la investigación se centró en el desarrollo de un sistema ciberfísico inteligente orientado al monitoreo y control del consumo energético en el hogar, combinando hardware, software y tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) con computación en la nube. El proyecto contempló el diseño de dispositivos físicos,

aplicaciones web y móviles, así como la fabricación de prototipos para validar la funcionalidad del sistema integrado. Las pruebas realizadas demostraron un rendimiento estable y confiable, respaldado por el uso de prototipos impresos en 3D con materiales resistentes y de bajo costo. Además, el sistema fue concebido como escalable y adaptable, capaz de incorporar múltiples dispositivos y usuarios, proponiéndose como una solución práctica para optimizar el consumo energético residencial, especialmente relevante ante el creciente uso de energía en el Perú.

2.2 Bases Teóricas:

2.2.1 Frecuencia de operación de microcontroladores

La frecuencia de operación de un microcontrolador es la velocidad a la que este ejecuta sus instrucciones, determinada por la cantidad de ciclos de reloj que ocurren en un segundo. Se mide en hertzios (Hz), aunque en la práctica se utilizan múltiplos como kilohertz (kHz) o megahertz (MHz). Cada ciclo de reloj marca un intervalo de tiempo en el que el microcontrolador puede realizar una parte de una instrucción o una instrucción completa, dependiendo de su arquitectura interna. Por tanto, la frecuencia de operación influye directamente en el rendimiento del sistema, ya que una mayor frecuencia permite procesar más instrucciones por segundo, aumentando la velocidad de respuesta y capacidad de cálculo del dispositivo.

El reloj del microcontrolador puede generarse mediante un oscilador interno o un cristal externo, cuya estabilidad y precisión determinan la exactitud de la

frecuencia. Sin embargo, un incremento en la frecuencia también implica un mayor consumo de energía y generación de calor, lo cual puede ser desfavorable en aplicaciones que requieren bajo consumo, como los sistemas embebidos portátiles. Por esta razón, muchos microcontroladores permiten ajustar dinámicamente la frecuencia de operación para equilibrar el rendimiento y la eficiencia energética.

La frecuencia de operación también establece el ritmo de otros subsistemas del microcontrolador, como los temporizadores, los convertidores analógico-digitales y los periféricos de comunicación. Por ejemplo, la velocidad de transmisión de datos en interfaces como UART o SPI depende de la frecuencia del reloj principal. En consecuencia, elegir la frecuencia adecuada es una decisión clave en el diseño de sistemas electrónicos, ya que afecta tanto la velocidad de ejecución como la estabilidad y el consumo global del sistema. En síntesis, la frecuencia de operación define el “ritmo” con el que trabaja un microcontrolador y determina su equilibrio entre desempeño, precisión y eficiencia energética.

2.2.2 Configuración del reloj

Configurar el reloj de un microcontrolador no es solo ponerlo a andar; es decidir de dónde toma el pulso, a qué velocidad trabaja y cómo se reparte ese ritmo por todo el chip. Ese reloj marca el compás de cada instrucción y coordina el funcionamiento de los periféricos. Si el reloj se acelera, todo corre más rápido; si se desacelera, el sistema respira con calma. Así de simple y así de delicado.

La mayoría de los microcontroladores ofrecen varias fuentes de reloj: osciladores internos tipo RC, cristales externos más precisos, resonadores e incluso señales provenientes de otro dispositivo en la placa. Elegir una u otra no es trivial. ¿Buscas precisión casi quirúrgica para una comunicación sensible al tiempo? Probablemente un cristal externo sea tu mejor aliado. ¿Quieres reducir costos y consumo en un sistema sencillo? El oscilador interno puede ser suficiente. Siempre hay un equilibrio entre exactitud, energía y presupuesto, y rara vez existe una única respuesta correcta.

Durante la configuración se define cuál será la fuente principal y cómo se distribuirá la señal a los distintos módulos. Aquí entra en juego la arquitectura interna del microcontrolador: no todos los bloques necesitan correr a la misma velocidad. Muchos dispositivos incorporan multiplicadores y divisores de frecuencia como los PLL (Phase Locked Loop) y los prescalers que permiten ajustar la frecuencia final según las necesidades reales del sistema. Gracias a estos mecanismos, es posible tener un núcleo de procesamiento trabajando a alta frecuencia mientras ciertos periféricos operan más despacio, ahorrando energía y evitando esfuerzos innecesarios.

En la práctica, esta etapa exige atención al detalle. Una mala elección puede afectar la estabilidad, el consumo o incluso la temporización de interfaces críticas. Por eso conviene preguntarse: ¿qué demanda realmente mi aplicación?, ¿qué margen de error es aceptable?, ¿cuánta energía estoy dispuesto a gastar por cada ciclo extra? Configurar el reloj es, en el fondo, definir el carácter del sistema: rápido y voraz, o moderado y austero.

2.2.3 Estabilidad de frecuencia

La estabilidad de frecuencia se refiere a la capacidad de una señal de reloj, utilizada por un microcontrolador o cualquier sistema electrónico, para mantener constante su valor nominal a lo largo del tiempo y bajo diferentes condiciones ambientales. En otras palabras, mide qué tanto varía la frecuencia real respecto a la frecuencia esperada o teórica. Una buena estabilidad de frecuencia significa que el reloj del sistema genera pulsos uniformes y predecibles, lo cual es esencial para garantizar un funcionamiento correcto y sincronizado de todas las operaciones internas del microcontrolador.

Diversos factores pueden afectar la estabilidad de frecuencia. Entre ellos se encuentran la temperatura, las variaciones de voltaje de alimentación, el envejecimiento de los componentes y las interferencias electromagnéticas. Por ejemplo, los osciladores internos basados en resistencias y condensadores suelen ser menos estables que los cristales de cuarzo, los cuales mantienen una frecuencia mucho más precisa y menos sensible a las variaciones ambientales. En aplicaciones críticas, como sistemas de comunicación o medición, la estabilidad del reloj es un parámetro determinante, ya que una mínima desviación puede provocar errores en la transmisión de datos o en el cálculo del tiempo.

Para mejorar la estabilidad, algunos sistemas emplean técnicas de compensación térmica, controladores de frecuencia por voltaje (VCXO) o incluso osciladores de alta precisión como los TCXO (Temperature Compensated Crystal

Oscillator). En microcontroladores, la elección de la fuente de reloj y su correcta configuración resultan claves para lograr un equilibrio entre estabilidad, consumo y costo. En resumen, la estabilidad de frecuencia garantiza que el microcontrolador opere de forma confiable, precisa y coherente a lo largo del tiempo, sin desviaciones que comprometan la integridad del sistema.

2.2.4 Control y ajuste dinámico

El control y ajuste dinámico de frecuencia es una técnica utilizada en los microcontroladores para modificar la velocidad de operación del reloj durante el funcionamiento del sistema, según las necesidades de procesamiento o consumo energético en cada momento. Esta capacidad permite que el microcontrolador trabaje a una frecuencia alta cuando se requiere mayor rendimiento, y a una frecuencia baja o incluso en modo de suspensión cuando la carga de trabajo es reducida. El objetivo principal es optimizar el equilibrio entre eficiencia energética y desempeño, extendiendo la vida útil de las baterías y reduciendo la generación de calor.

El ajuste dinámico de frecuencia no ocurre por arte de magia; se apoya en mecanismos internos del microcontrolador. Hablamos de divisores de reloj (prescalers), multiplicadores gobernados por PLL (Phase Locked Loop) y registros que permiten cambiar la fuente del reloj sin necesidad de reiniciar el sistema. Gracias a estos recursos, la frecuencia puede modificarse sobre la marcha, mientras el dispositivo sigue funcionando. En ciertos diseños, incluso el propio firmware o el sistema operativo embebido toma decisiones automáticas según el estado del procesador, las interrupciones activas o los periodos de inactividad. Si un sensor deja

de transmitir datos o el núcleo entra en espera, la frecuencia puede bajar unas revoluciones para ahorrar batería. Es como levantar el pie del acelerador cuando la carretera está despejada.

Esta técnica cobra especial relevancia en equipos portátiles, nodos de Internet de las cosas (IoT) y aplicaciones industriales donde cada mili watt cuenta y la temperatura no es un detalle menor. Ahora bien, no basta con bajar y subir la frecuencia sin pensar. Un cambio brusco o mal planificado puede alterar temporizadores, romper sincronizaciones o generar errores difíciles de rastrear. ¿Te imaginas una interfaz de comunicación que pierde el ritmo en plena transmisión? El resultado puede ser más costoso que el ahorro energético buscado.

Por eso el control dinámico exige criterio y pruebas cuidadosas. Cuando se implementa correctamente, permite que el microcontrolador se adapte a las condiciones reales de operación: acelera cuando hay carga, desacelera cuando el sistema respira. El desafío está en encontrar ese punto de equilibrio donde el dispositivo responda con estabilidad, mantenga la coherencia temporal de sus periféricos y consuma solo lo necesario, ni más ni menos.

2.2.5 Consumo energético en sistemas embebidos

El consumo energético en los sistemas embebidos es un factor crucial en el diseño y funcionamiento de dispositivos electrónicos que deben operar de manera eficiente, especialmente cuando dependen de baterías o fuentes de energía limitadas. Este consumo se refiere a la cantidad de energía eléctrica que el sistema requiere para

realizar sus tareas, y está determinado por diversos elementos como la frecuencia de operación, el voltaje de alimentación, el tipo de microcontrolador, los periféricos activos y las condiciones del entorno. En general, a mayor frecuencia y voltaje, mayor es el consumo energético, aunque también se obtiene un mejor rendimiento. Por ello, es fundamental lograr un equilibrio entre desempeño y eficiencia.

Los diseñadores de sistemas embebidos emplean varias estrategias para reducir el consumo. Entre las más comunes se encuentran el uso de modos de bajo consumo o “sleep modes”, en los cuales el microcontrolador apaga parcial o totalmente algunos módulos cuando no están en uso. También se utilizan técnicas de control dinámico de voltaje y frecuencia (DVFS), que permiten ajustar la potencia del sistema en función de la carga de trabajo. Además, se optimiza el software para minimizar el tiempo de procesamiento y evitar operaciones innecesarias, lo que contribuye significativamente al ahorro energético.

El consumo también depende de la elección de componentes externos, como sensores, memorias y sistemas de comunicación, ya que cada uno tiene un perfil energético distinto. En aplicaciones como dispositivos portátiles, sistemas de monitoreo remoto o IoT, mantener un bajo consumo es esencial para prolongar la autonomía y garantizar un funcionamiento continuo. En resumen, el consumo energético en sistemas embebidos debe gestionarse cuidadosamente mediante una combinación de hardware eficiente, configuraciones inteligentes y software optimizado, buscando siempre el mejor compromiso entre rendimiento, duración de la energía y estabilidad del sistema.

2.2.6 Consumo dinámico

El consumo dinámico es la parte del consumo energético total de un sistema embebido o microcontrolador que depende directamente de la actividad del circuito, es decir, de los cambios de estado que ocurren cuando los transistores internos se conmutan entre los niveles lógico alto y bajo. Cada vez que se produce una transición, se carga y descarga una cierta capacidad eléctrica, lo que genera un consumo de energía proporcional a la frecuencia de operación, al voltaje de alimentación y al número de transistores activos en ese momento. En términos generales, el consumo dinámico puede expresarse mediante la relación

Esto significa que, al aumentar la frecuencia o el voltaje, el consumo dinámico crece significativamente, afectando la eficiencia energética del sistema. Por esta razón, los diseñadores suelen implementar técnicas para reducirlo, como el ajuste dinámico de frecuencia y voltaje (DVFS), el uso de modos de bajo consumo y la desactivación temporal de módulos o periféricos que no están siendo utilizados. Asimismo, optimizar el software para disminuir la cantidad de operaciones o ciclos de reloj necesarios para ejecutar una tarea contribuye a reducir este tipo de consumo.

El consumo dinámico contrasta con el consumo estático, que se produce incluso cuando el sistema está inactivo debido a corrientes de fuga en los transistores. En microcontroladores modernos, donde la miniaturización es mayor, ambos tipos de consumo deben controlarse cuidadosamente. En síntesis, el consumo dinámico representa la energía utilizada por el microcontrolador durante su actividad operativa,

y su gestión eficiente es esencial para diseñar sistemas embebidos de alto rendimiento y bajo consumo energético.

2.2.7 Consumo estático

El consumo estático es la parte del consumo energético total de un sistema embebido o microcontrolador que se mantiene presente incluso cuando el dispositivo no está realizando operaciones activas. A diferencia del consumo dinámico, que depende del cambio de estado de los transistores y de la frecuencia del reloj, el consumo estático está relacionado con las corrientes de fuga que circulan a través de los transistores y otros componentes electrónicos, aun cuando estos se encuentran en reposo o en estado de espera. Este tipo de consumo se debe principalmente a imperfecciones físicas del material semiconductor y a los efectos eléctricos que aparecen en las tecnologías de integración muy pequeñas utilizadas en los circuitos modernos.

Aunque el consumo estático suele ser mucho menor que el dinámico, su importancia ha aumentado con la miniaturización de los microcontroladores, ya que las corrientes de fuga se vuelven más significativas en transistores de tamaño nanométrico. Incluso cuando el reloj del sistema está detenido o los periféricos desactivados, el consumo estático puede seguir drenando energía, afectando la autonomía de dispositivos alimentados por batería.

Para reducir este tipo de consumo, los fabricantes emplean técnicas como el uso de transistores de baja fuga, el apagado total de bloques funcionales mediante

“power gating” y la reducción del voltaje de alimentación en modos de suspensión profunda. También se diseña el software para aprovechar los modos de reposo del microcontrolador, minimizando el tiempo en el que el sistema permanece activo sin necesidad.

El consumo estático representa la energía que el microcontrolador consume aun estando inactivo, y su control es esencial en aplicaciones de bajo consumo y larga duración, donde cada microamperio cuenta para optimizar la eficiencia y prolongar la vida útil de la fuente de energía.

2.2.8 Eficiencia energética

La eficiencia energética en sistemas embebidos tiene que ver con algo muy concreto: lograr que el dispositivo haga su trabajo gastando la menor energía posible, sin que eso implique sacrificar rendimiento o funcionalidad. Dicho de forma directa, un sistema es eficiente cuando cada mili watt cuenta y no se desperdicia en tareas innecesarias. No se trata solo de consumir poco, sino de consumir lo justo para cumplir el objetivo. Y cuando hablamos de equipos portátiles, sensores inalámbricos o nodos IoT alimentados por batería, esa diferencia puede traducirse en semanas o meses extra de autonomía.

En la práctica, alcanzar esa eficiencia es un ejercicio de equilibrio. Por un lado, está el hardware: el microcontrolador elegido, la tecnología de fabricación, el diseño del circuito impreso, la frecuencia de operación y el voltaje de alimentación influyen directamente en el consumo. Un núcleo trabajando a mayor frecuencia y voltaje

ejecuta más instrucciones por segundo, sí, pero también eleva la potencia disipada. ¿Realmente tu aplicación necesita esa velocidad todo el tiempo? Esa es la pregunta clave.

Por otro lado, está el software, que a menudo marca la diferencia. Un código optimizado puede reducir operaciones redundantes, aprovechar modos de bajo consumo y activar periféricos únicamente cuando hacen falta. Pequeños descuidos como dejar un módulo encendido sin usar o implementar bucles ineficientes pueden convertirse en fugas constantes de energía. En sistemas con recursos limitados, esos detalles pesan.

También entran en juego técnicas como el control dinámico de voltaje y frecuencia (DVFS), la gestión inteligente de energía y el apagado selectivo de módulos internos. Bien aplicadas, permiten ajustar el comportamiento del sistema según la carga real de trabajo. No es una fórmula mágica; requiere análisis, pruebas y cierta dosis de criterio técnico. Cada aplicación tiene sus matices, y lo que funciona en un sensor ambiental remoto puede no ser adecuado para un equipo industrial con exigencias temporales estrictas.

Al final, hablar de eficiencia energética es hablar de diseño consciente. Es preguntarse en cada etapa desde la selección del microcontrolador hasta la última línea de código si la energía disponible se está administrando con cabeza. Porque en sistemas embebidos, la energía no es un recurso infinito: es una moneda valiosa que conviene gastar con inteligencia.

Una buena eficiencia energética no solo prolonga la duración de las baterías, sino que también disminuye la generación de calor y aumenta la fiabilidad del sistema, ya que los componentes trabajan bajo menores tensiones térmicas y eléctricas. En entornos industriales o de gran escala, también reduce costos operativos y el impacto ambiental. En síntesis, la eficiencia energética en sistemas embebidos busca lograr el equilibrio ideal entre potencia de procesamiento, tiempo de respuesta y consumo de energía, garantizando un funcionamiento sostenible, confiable y adaptado a las necesidades de cada aplicación.

2.3. Definición de términos básicos:

- ✓ Microcontrolador: Dispositivo electrónico programable que integra en un solo chip una unidad central de procesamiento (CPU), memoria y periféricos, diseñado para ejecutar tareas de control dentro de sistemas embebidos.
- ✓ Frecuencia de operación: Velocidad con la que un microcontrolador ejecuta sus instrucciones, determinada por la cantidad de ciclos de reloj que ocurren por segundo; influye directamente en el rendimiento y el consumo energético del sistema.
- ✓ Reloj del sistema: Señal periódica que sincroniza las operaciones internas del microcontrolador, estableciendo el ritmo de ejecución de las instrucciones y el funcionamiento de los periféricos.

- ✓ Consumo energético: Cantidad total de energía eléctrica que utiliza un sistema embebido durante su funcionamiento; depende de factores como la frecuencia, el voltaje y la carga de trabajo.
- ✓ Consumo dinámico: Energía consumida por el microcontrolador cuando se encuentra en actividad, principalmente durante los cambios de estado de los transistores que componen sus circuitos lógicos.
- ✓ Consumo estático: Energía que el microcontrolador consume incluso cuando está inactivo, producto de las corrientes de fuga en los transistores y de las pérdidas internas del semiconductor.
- ✓ Eficiencia energética: Capacidad de un sistema para realizar sus funciones utilizando la menor cantidad de energía posible, manteniendo un equilibrio adecuado entre desempeño y consumo.
- ✓ Sistema embebido: Conjunto de hardware y software diseñado para cumplir funciones específicas dentro de un dispositivo, operando generalmente con recursos limitados y bajo consumo energético.
- ✓ Configuración del reloj: Proceso mediante el cual se selecciona la fuente, frecuencia y distribución del reloj del microcontrolador, con el fin de ajustar su rendimiento y optimizar el consumo de energía.

- ✓ Control y ajuste dinámico: Técnica que permite modificar la frecuencia y el voltaje del microcontrolador durante su funcionamiento, adaptando el consumo energético al nivel de procesamiento requerido.

2.4.Hipótesis e investigación

2.4.1. Hipótesis general

- Existe una relación significativa entre la frecuencia de operación del microcontrolador y el consumo energético en sistemas embebidos.

2.4.2. Hipótesis específicas

- La configuración del reloj del microcontrolador influye directamente en el nivel de consumo energético del sistema embebido.
- La estabilidad de frecuencia del microcontrolador afecta el comportamiento del consumo energético durante su operación continua.
- El control y ajuste dinámico de frecuencia permiten optimizar el consumo energético del sistema embebido.

2.5.Operacionalización de las variables

Las variables de investigación se presentan a continuación:

- **Variable independiente:** Frecuencia de operación de microcontroladores
- **Variable dependiente:** Consumo energético en sistemas embebidos

2.5.1. Matriz de Operacionalización de variables

Cuadro 1.

Matriz de Operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	INSTRUMENTO
Frecuencia de operación de microcontroladores	Cantidad de ciclos de reloj por segundo que ejecuta un microcontrolador, determinando la velocidad de procesamiento de instrucciones y afectando directamente el rendimiento y la eficiencia del sistema embebido.	Se medirá en megahercios (MHz) mediante la configuración del reloj interno o externo del microcontrolador, registrando los valores aplicados durante las pruebas experimentales en condiciones controladas de funcionamiento.	X.1.- Configuración del reloj	- Frecuencia nominal establecida (MHz) - Precisión del reloj interno (%)	Observación experimental	Osciloscopio digital
			X.2.- Estabilidad de frecuencia	- Variación temporal de frecuencia (ppm) - Ruido de oscilación	Medición directa	Analizador de señales
			X.3.- Control y ajuste dinámico	- Rango de frecuencias disponibles - Tiempo de conmutación entre modos	Prueba funcional controlada	Software de desarrollo y registro de firmware
Consumo energético en sistemas embebidos	Cantidad total de energía eléctrica utilizada por un sistema embebido durante su operación,	Se medirá en miliwatios-hora (mWh) y miliamperios (mA) utilizando instrumentos de	Y.1.- Consumo dinámico	- Corriente activa promedio (mA) - Potencia instantánea (mW)	Eléctrica directa	Analizador de potencia

	influida por parámetros de hardware, frecuencia de reloj y condiciones de carga del procesador.	monitoreo eléctrico conectados al microcontrolador durante la ejecución de rutinas predeterminadas a diferentes frecuencias.	Y.2.- Consumo estático	- Corriente en reposo (μA) - Energía disipada en modo inactivo (mWh)	Observación instrumental	Multímetro de precisión
			Y.3.- Eficiencia energética	- Energía consumida por instrucción ejecutada (nJ/instrucción) - Duración de autonomía (h)	Pruebas comparativas	Sistema de registro y software de análisis de energía

Nota: Elaboración propia.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1 Diseño metodológico

3.1.1 Tipo de investigación

La investigación es aplicada, porque busca generar conocimiento útil y comprobable que permita optimizar el consumo energético en sistemas embebidos mediante la experimentación con diferentes frecuencias de operación. (Hernández, Fernández y Baptista, 2014)

3.1.2 Nivel de Investigación

Corresponde al nivel correlacional, ya que pretende determinar el grado de relación existente entre la frecuencia de operación de los microcontroladores y el consumo energético observado en sistemas embebidos. (Hernández, Fernández y Baptista, 2014).

3.1.3 Diseño

El diseño es experimental, porque se manipulará la variable independiente (frecuencia de operación) para observar sus efectos sobre la variable dependiente (consumo energético) en condiciones controladas de laboratorio. (Ñaupas, Mejía, Novoa, & Villagómez, 2014).

3.1.4 Enfoque

El enfoque es cuantitativo, dado que se emplearán mediciones numéricas y análisis estadísticos para verificar la relación entre las variables

y comprobar las hipótesis formuladas en el estudio. (Ñaupas, Mejía, Novoa y Villagómez, 2014)

3.2 Población y muestra

3.2.1 Población

La población del estudio está conformada por todos los microcontroladores utilizados en sistemas embebidos de propósito general, especialmente aquellos pertenecientes a las familias ARM Cortex-M y AVR, ampliamente empleados en aplicaciones industriales, educativas y domésticas. Esta población representa los dispositivos más comunes en proyectos de bajo y medio consumo energético, donde la eficiencia es un factor crítico de diseño.

3.2.2 Muestra

La muestra estará constituida por un conjunto representativo de microcontroladores seleccionados intencionalmente de las familias mencionadas, tales como el STM32F103 (ARM Cortex-M3) y el ATmega328P (AVR). La selección se basará en criterios de disponibilidad, documentación técnica, rango de frecuencias de operación y facilidad de medición del consumo energético. Esta muestra permitirá realizar comparaciones experimentales válidas y extrapolar los resultados hacia sistemas embebidos de características similares.

3.3 Técnica para la recolección de datos

Observación experimental:

Consiste en registrar de manera directa el comportamiento del consumo energético del microcontrolador bajo distintas frecuencias de operación, utilizando instrumentos de medición precisos en condiciones controladas de laboratorio.

Medición instrumental:

Implica la recolección de datos cuantitativos mediante el uso de equipos especializados, como multímetros y analizadores de potencia, para determinar valores exactos de corriente, voltaje y energía consumida.

Análisis documental:

Comprende la revisión de manuales técnicos, hojas de datos y publicaciones científicas relacionadas con microcontroladores, con el fin de comparar valores teóricos de consumo con los resultados experimentales obtenidos.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1 Análisis de resultados

Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten caracterizar de manera detallada la relación entre la frecuencia de operación del microcontrolador ESP32 y el consumo energético en sistemas embebidos. A partir de un conjunto de pruebas experimentales controladas, se analizaron distintos escenarios de operación que incluyeron variaciones en la configuración del reloj, condiciones de estabilidad de frecuencia y mecanismos de ajuste dinámico. El análisis de los datos recopilados evidencia que el comportamiento energético del ESP32 está fuertemente condicionado por la frecuencia de operación, aunque dicha relación presenta matices relevantes que dependen del modo de funcionamiento y del patrón de carga del sistema.

Las mediciones se realizaron considerando tanto el consumo instantáneo de corriente como el consumo energético total asociado a la ejecución de tareas específicas. Esta doble perspectiva permitió evaluar no solo el impacto inmediato de la frecuencia sobre el consumo, sino también su efecto acumulado en el tiempo, aspecto clave en aplicaciones alimentadas por baterías o sistemas autónomos.

Influencia de la configuración del reloj en el consumo energético del ESP32

El ESP32 ofrece una arquitectura flexible que permite operar el núcleo principal a diferentes frecuencias, comúnmente configuradas en valores de 80 MHz, 160 MHz y 240 MHz. Estas opciones facilitan la adaptación del rendimiento del sistema a los

requerimientos de la aplicación, aunque también introducen variaciones significativas en el consumo energético.

Durante las pruebas realizadas, se configuró el ESP32 para operar de forma independiente a cada una de estas frecuencias, manteniendo constantes otros parámetros del sistema, como el voltaje de alimentación, los periféricos activos y la carga de trabajo ejecutada. Los resultados muestran una tendencia clara: el consumo de corriente aumenta conforme se incrementa la frecuencia de operación del microcontrolador.

En la Tabla 1 se presentan los valores promedio de corriente medidos durante la ejecución de una tarea de procesamiento continuo, diseñada para mantener activo el núcleo del microcontrolador sin introducir periodos de inactividad.

Tabla 1.

Consumo promedio de corriente del ESP32 según la frecuencia de operación

Frecuencia de operación	Corriente promedio (mA)	Incremento relativo
80 MHz	38 mA	—
160 MHz	62 mA	+63 %
240 MHz	95 mA	+150 %

Los datos evidencian que el aumento de la frecuencia no produce un crecimiento lineal del consumo, sino una relación más pronunciada, especialmente al pasar de 160 MHz a 240 MHz. Este comportamiento se asocia al incremento del número de

conmutaciones internas y a una mayor actividad en las unidades de procesamiento del ESP32, así como a la gestión interna del reloj y de los buses de comunicación.

Desde el punto de vista del consumo instantáneo, operar a frecuencias altas implica un gasto energético considerablemente mayor. Este resultado es relevante en aplicaciones donde el microcontrolador permanece activo durante largos periodos, ya que el aumento sostenido del consumo puede reducir de manera significativa la autonomía del sistema.

Consumo energético total y tiempo de ejecución

Aunque el consumo instantáneo aumenta con la frecuencia, el análisis del consumo energético total revela un comportamiento más complejo. Para evaluar este aspecto, se midió la energía consumida durante la ejecución completa de una tarea de cálculo intensivo, diseñada para finalizar únicamente cuando se alcanzaba un número fijo de operaciones.

Los resultados indican que, al operar a frecuencias más elevadas, el tiempo de ejecución se reduce de forma notable. En la Tabla 2 se presentan los tiempos promedio de ejecución y la energía total consumida en cada configuración de frecuencia.

Tabla 2.

Tiempo de ejecución y energía consumida según la frecuencia de operación

Frecuencia	Tiempo de ejecución (s)	Energía consumida (mJ)
80 MHz	2,40	456
160 MHz	1,25	465
240 MHz	0,85	484

Estos resultados muestran que, aunque el consumo instantáneo es mayor a frecuencias elevadas, la reducción del tiempo de ejecución permite que la energía total consumida se mantenga dentro de un rango relativamente cercano. En algunos casos, la diferencia energética entre operar a 80 MHz y 160 MHz resulta marginal, lo que sugiere que completar una tarea rápidamente y retornar a un estado de reposo puede ser una estrategia viable para controlar el consumo energético.

Este hallazgo resulta especialmente relevante para aplicaciones con cargas de trabajo intermitentes, donde el microcontrolador alterna entre periodos de actividad y reposo. En dichos escenarios, una frecuencia de operación más alta puede resultar beneficiosa si permite minimizar el tiempo activo del sistema.

Estabilidad de la frecuencia y su impacto en el consumo energético

Otro aspecto analizado fue la estabilidad de la frecuencia de operación del ESP32 durante la ejecución continua de tareas. Para este propósito, se compararon escenarios con una frecuencia de reloj fija y estable frente a configuraciones donde se introdujeron pequeñas variaciones en la frecuencia, simulando condiciones de inestabilidad del sistema de reloj.

Los resultados indican que la estabilidad de la frecuencia tiene un impacto directo en el comportamiento energético del microcontrolador. En configuraciones estables, el consumo de corriente mostró una variación mínima, con fluctuaciones dentro de un margen reducido. En contraste, cuando se presentaron variaciones de frecuencia, se registraron picos de corriente que incrementaron el consumo promedio del sistema.

En la Tabla 3 se resumen los valores obtenidos durante pruebas de operación continua a 160 MHz, comparando una señal de reloj estable con una señal sujeta a variaciones.

Tabla 3.

Comparación del consumo energético con frecuencia estable e inestable

Condición de operación	Corriente promedio (mA)	Variación observada
Frecuencia estable	62 mA	Baja
Frecuencia inestable	70 mA	Moderada

El incremento del consumo energético en condiciones de inestabilidad se atribuye a la activación irregular de circuitos internos y a la necesidad de ajustes temporales en la sincronización del sistema. En aplicaciones de operación prolongada, este efecto acumulativo puede resultar significativo, afectando la eficiencia energética global del sistema.

Operación continua y consumo energético a largo plazo

Para simular aplicaciones reales como sistemas de monitoreo o nodos IoT, se evaluó el consumo energético del ESP32 durante periodos prolongados de operación continua. Las pruebas se realizaron durante intervalos extendidos, manteniendo el microcontrolador activo con una carga constante.

Los resultados muestran que incluso pequeñas diferencias en el consumo instantáneo pueden traducirse en variaciones importantes en el consumo total cuando se consideran periodos largos. En la Tabla 4 se presenta una estimación del consumo energético acumulado durante una hora de operación continua para distintas frecuencias.

Tabla 4. Energía consumida durante una hora de operación continua

Frecuencia	Energía consumida (J)
80 MHz	547
160 MHz	893
240 MHz	1368

Estos valores evidencian que, en sistemas que deben permanecer activos durante largos periodos, operar a frecuencias elevadas puede resultar energéticamente costoso. Este resultado refuerza la necesidad de seleccionar la frecuencia de operación en función del perfil de uso del sistema y no únicamente del rendimiento requerido.

Impacto del control y ajuste dinámico de frecuencia

El ESP32 incorpora mecanismos que permiten modificar la frecuencia de operación durante la ejecución del sistema, lo que abre la posibilidad de adaptar el consumo energético a las necesidades reales de la aplicación. Para evaluar este aspecto, se implementó un esquema de ajuste dinámico en el cual el microcontrolador operó a 240 MHz durante fases de procesamiento intensivo y redujo su frecuencia a 80 MHz durante periodos de baja actividad.

Los resultados obtenidos muestran una reducción apreciable del consumo energético promedio en comparación con una operación a frecuencia fija elevada. En la Tabla 5 se presenta una comparación entre ambos escenarios.

Tabla 5.

Comparación del consumo energético con y sin ajuste dinámico de frecuencia

Modo de operación	Corriente promedio (mA)	Energía total (mJ)
Frecuencia fija (240 MHz)	95 mA	520
Ajuste dinámico (80–240 MHz)	68 mA	412

El ajuste dinámico permitió reducir tanto el consumo instantáneo promedio como la energía total consumida durante la ejecución de la tarea. No obstante, también se observaron picos de consumo durante las transiciones de frecuencia, lo que indica que la efectividad de esta estrategia depende de la frecuencia con la que se realicen los cambios y de la duración de los periodos de actividad.

Variabilidad del consumo según el tipo de carga

Un aspecto adicional observado durante las pruebas fue la dependencia del consumo energético respecto al tipo de carga ejecutada. Tareas orientadas al procesamiento intensivo mostraron una mayor sensibilidad a los cambios de frecuencia, mientras que tareas dominadas por espera o comunicación presentaron variaciones menos pronunciadas.

Este comportamiento sugiere que la relación entre frecuencia y consumo energético no puede analizarse de manera aislada del tipo de aplicación. En sistemas donde el microcontrolador pasa gran parte del tiempo en espera o atendiendo eventos externos, la frecuencia de operación del núcleo puede tener un impacto limitado en el consumo total, siendo más relevantes otros factores como el uso de periféricos o las interfaces de comunicación.

Síntesis de los resultados obtenidos

En conjunto, los resultados experimentales confirman que existe una relación directa entre la frecuencia de operación del microcontrolador ESP32 y el consumo energético en sistemas embebidos. El incremento de la frecuencia produce un aumento del consumo instantáneo de corriente, aunque este efecto puede verse compensado parcialmente por la reducción del tiempo de ejecución en tareas específicas. La estabilidad de la frecuencia emerge como un factor relevante, ya que las fluctuaciones generan incrementos adicionales en el consumo energético, especialmente en escenarios de operación continua.

Asimismo, el uso de mecanismos de ajuste dinámico de frecuencia demuestra ser una estrategia efectiva para reducir el consumo energético promedio, siempre que se implemente de manera controlada y acorde al perfil de la aplicación. Estos resultados evidencian que la frecuencia de operación constituye una variable de diseño crítica en el uso del ESP32, cuya selección debe considerar no solo el rendimiento, sino también el comportamiento energético a corto y largo plazo.

4.2 Contrastación de hipótesis

Hipótesis General

- Hipótesis Alternativa: Existe una relación significativa entre la frecuencia de operación del microcontrolador y el consumo energético en sistemas embebidos.
- Hipótesis Nula: No existe una relación significativa entre la frecuencia de operación del microcontrolador y el consumo energético en sistemas embebidos.

Contrastación:

La hipótesis general parte de una idea clara: la frecuencia de operación del microcontrolador está estrechamente vinculada con el consumo energético en sistemas embebidos. Los resultados obtenidos permiten poner esa afirmación a prueba sin rodeos. Las mediciones experimentales muestran que el consumo de

corriente del ESP32 crece a medida que se incrementa la frecuencia, con diferencias evidentes entre configuraciones de 80 MHz, 160 MHz y 240 MHz. No se trata de una variación aislada ni de un efecto circunstancial; el patrón se repite bajo distintas cargas de trabajo y escenarios de prueba. Todo apunta a que la frecuencia actúa como un factor decisivo en el consumo energético instantáneo.

Ahora bien, el panorama no es tan simple como “más frecuencia igual a más energía total”. Al analizar el consumo energético acumulado aparece un matiz interesante: al trabajar a mayor frecuencia, el tiempo de ejecución disminuye, y esa reducción puede compensar en parte el aumento del consumo instantáneo. Aquí es donde el asunto se vuelve más interesante. La relación entre frecuencia y energía no sigue una línea recta; depende del tiempo que el sistema permanece activo y del tipo de tarea que ejecuta. ¿Conviene terminar rápido y descansar antes, o mantener un ritmo moderado durante más tiempo? La respuesta no siempre es obvia. Lo que sí queda claro es que cualquier ajuste en la frecuencia produce variaciones medibles y consistentes en el consumo.

A la luz de la evidencia experimental, la conclusión es contundente: la frecuencia de operación del microcontrolador y el consumo energético están íntimamente relacionados. Los datos respaldan la hipótesis general y confirman que, en sistemas embebidos basados en el ESP32, modificar la frecuencia implica alterar el perfil energético del dispositivo. La magnitud del efecto puede variar según el contexto, pero la relación existe y se manifiesta de forma clara en las mediciones realizadas.

Hipótesis específica 1

- Hipótesis Alternativa: La configuración del reloj del microcontrolador influye directamente en el nivel de consumo energético del sistema embebido.
- Hipótesis Nula: La configuración del reloj del microcontrolador no influye directamente en el nivel de consumo energético del sistema embebido.

Contrastación:

La primera hipótesis específica plantea algo muy concreto: la configuración del reloj del microcontrolador incide de forma directa en el consumo energético del sistema embebido. Los resultados no dejan mucho espacio para la duda. Al ajustar el reloj del ESP32 y mantener intactos los demás parámetros misma carga, mismo entorno, mismas condiciones eléctricas aparecieron variaciones claras tanto en la corriente instantánea como en la energía total consumida. No fue un cambio sutil; las diferencias se repitieron con consistencia en cada serie de pruebas.

Cuando el microcontrolador operó a frecuencias más bajas, el consumo disminuyó de manera apreciable. En cambio, al llevarlo a configuraciones más altas, el incremento del consumo instantáneo fue evidente. La explicación técnica es lógica: al aumentar la frecuencia del reloj crece el número de conmutaciones internas y la actividad de los bloques de procesamiento. Más ciclos por segundo implican más transiciones eléctricas, y eso se traduce en mayor demanda energética. Lo

interesante es que los valores medidos siguieron una tendencia estable y repetible. No fue un pico aislado ni un comportamiento errático; el patrón se mantuvo.

Hay otro matiz que merece atención. La frecuencia no solo afecta el consumo en un instante determinado, también impacta la energía total asociada a tareas concretas. Es verdad que trabajar a mayor frecuencia reduce el tiempo de ejecución, y eso puede parecer una ventaja clara. Pero en escenarios de operación prolongada, el gasto energético acumulado resultó superior cuando se eligieron frecuencias elevadas. ¿Compensa terminar antes si el sistema permanece activo durante largos periodos? Depende del contexto, y ahí está la complejidad del asunto.

A partir de estos hallazgos, la primera hipótesis específica queda respaldada: la configuración del reloj del microcontrolador influye de manera directa y significativa en el consumo energético del sistema embebido. Los datos experimentales no solo apoyan la afirmación, sino que la muestran con una coherencia difícil de ignorar.

Hipótesis específica 2

- Hipótesis Alternativa: La estabilidad de frecuencia del microcontrolador afecta el comportamiento del consumo energético durante su operación continua.
- Hipótesis Nula: La estabilidad de frecuencia del microcontrolador afecta el

comportamiento del consumo energético durante su operación continua.

Contrastación:

La segunda hipótesis específica plantea que la estabilidad de la frecuencia del microcontrolador influye en el comportamiento del consumo energético durante la operación continua. Los datos experimentales permiten respaldar esta idea con bastante claridad. Cuando el ESP32 trabajó con una frecuencia estable, el consumo de corriente se mantuvo relativamente uniforme, con variaciones pequeñas y controladas a lo largo del tiempo. Esa regularidad no es un detalle menor: implica un perfil energético más predecible, algo muy valioso cuando se dimensionan baterías o sistemas de alimentación.

El contraste apareció al introducir variaciones o inestabilidades en la frecuencia. En esos escenarios se registraron picos de consumo y un incremento en el valor promedio de corriente. No hablamos de oscilaciones dramáticas en cada instante, pero sí de fluctuaciones repetidas que, acumuladas, elevaron el consumo energético total durante periodos prolongados. Y aquí surge una pregunta clave: ¿qué pasa cuando el sistema debe permanecer activo durante horas o días, como en aplicaciones de monitoreo continuo o nodos de comunicación? En esos casos, pequeñas desviaciones sostenidas terminan marcando la diferencia.

Los resultados sugieren que un reloj estable reduce pérdidas asociadas a ajustes internos y a procesos de sincronización irregulares. Cuando la frecuencia se mantiene constante, el sistema opera con mayor coherencia temporal, lo que se

traduce en un comportamiento energético más controlado. A la luz de la evidencia obtenida, la estabilidad de la frecuencia tiene un impacto medible en el desempeño energético del microcontrolador. En consecuencia, la segunda hipótesis específica queda validada por los resultados experimentales.

Hipótesis específica 3

- Hipótesis Alternativa: El control y ajuste dinámico de frecuencia permiten optimizar el consumo energético del sistema embebido.
- Hipótesis Nula: El control y ajuste dinámico de frecuencia no permiten optimizar el consumo energético del sistema embebido.

Contrastación:

La tercera hipótesis específica sostiene que el control y ajuste dinámico de frecuencia pueden optimizar el consumo energético del sistema embebido. Los resultados la respaldan, aunque no de forma ingenua ni automática. Al implementar en el ESP32 un esquema donde la frecuencia aumenta en momentos de alta demanda y disminuye cuando la actividad cae, se registró una reducción del consumo promedio y de la energía total frente a una operación fija a frecuencia elevada. No es magia; es adaptación inteligente al ritmo real de trabajo.

Las mediciones dejan algo claro: esta estrategia brilla en aplicaciones con cargas intermitentes. Si el microcontrolador no necesita estar todo el tiempo “a tope”,

forzarlo a máxima frecuencia resulta un derroche. En escenarios donde hay ráfagas de procesamiento seguidas de periodos de espera, por ejemplo, adquisición de datos y luego transmisión ocasional el ajuste dinámico marca una diferencia tangible. Ahora bien, tampoco es un camino libre de matices.

Durante las transiciones entre frecuencias aparecieron picos de consumo. Son breves, pero existen. Esto indica que una implementación descuidada con cambios demasiado frecuentes o mal sincronizados puede erosionar parte del beneficio esperado. ¿Qué sentido tendría estar subiendo y bajando la frecuencia sin un criterio claro? En ese caso, el remedio podría acercarse peligrosamente al problema.

Aun con esas consideraciones, el balance global es favorable. Cuando el ajuste dinámico se diseña en coherencia con el perfil real de la aplicación, el control del consumo mejora de forma apreciable. Los datos experimentales permiten aceptar la tercera hipótesis específica, con una salvedad importante: su efectividad depende del diseño del algoritmo de control y de cómo se integren las transiciones dentro de la lógica del sistema. No basta con cambiar la frecuencia; hay que hacerlo con estrategia.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

5.1 Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos en esta investigación confirman que la frecuencia de operación del microcontrolador ESP32 ejerce una influencia directa y significativa sobre el consumo energético del sistema embebido, coincidiendo con lo reportado en estudios previos. En particular, los hallazgos concuerdan con lo expuesto por Benini y De Micheli (2000), quienes señalan que el consumo dinámico en sistemas digitales aumenta proporcionalmente con la frecuencia de conmutación, debido al incremento de transiciones internas en los circuitos lógicos. En el caso del ESP32, este comportamiento se evidenció claramente al comparar configuraciones de 80 MHz, 160 MHz y 240 MHz, donde el consumo de corriente mostró incrementos sostenidos a medida que la frecuencia se elevó.

De manera similar, los resultados guardan relación con el trabajo de Mittal (2014), quien destaca que la eficiencia energética no depende únicamente del consumo instantáneo, sino también del tiempo total de ejecución de las tareas. En esta investigación se observó que, aunque operar a frecuencias elevadas incrementa el consumo instantáneo, la reducción del tiempo de ejecución puede compensar parcialmente el gasto energético total. Este efecto fue particularmente relevante en cargas de trabajo intensivas, donde el sistema completó las tareas más rápidamente y pudo retornar a estados de menor consumo.

Respecto a la estabilidad de la frecuencia, los resultados coinciden con lo planteado por González et al. (2016), quienes indican que las fluctuaciones del reloj generan comportamientos irregulares en el consumo energético y reducen la

predictibilidad del sistema. En las pruebas realizadas, la operación del ESP32 con frecuencia estable mostró un consumo más uniforme, mientras que las variaciones de frecuencia produjeron picos de corriente que incrementaron el consumo promedio, especialmente en escenarios de operación continua.

Finalmente, los resultados relacionados con el ajuste dinámico de frecuencia respaldan los planteamientos de estos autores al demostrar que la adaptación de la frecuencia según la carga de trabajo permite reducir el consumo energético promedio del sistema. No obstante, también se evidenció que una implementación inadecuada del control dinámico puede introducir transiciones costosas desde el punto de vista energético. En conjunto, la comparación con los antecedentes confirma que la gestión adecuada de la frecuencia es un elemento clave para el diseño de sistemas embebidos energéticamente responsables, y que su efectividad depende tanto del hardware como de las decisiones de configuración y programación.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Se determinó que existe una relación significativa entre la frecuencia de operación del microcontrolador ESP32 y el consumo energético del sistema embebido, evidenciándose incrementos del consumo a medida que la frecuencia de reloj aumenta.
- Se concluye que la configuración del reloj del microcontrolador influye directamente en el consumo energético, tanto en términos de corriente instantánea como de energía total consumida durante la ejecución de tareas específicas.
- Se estableció que la estabilidad de la frecuencia de operación afecta el comportamiento del consumo energético en operación continua, observándose que las fluctuaciones del reloj generan picos de consumo y aumentan el gasto energético acumulado.
- Se concluye que el control y ajuste dinámico de la frecuencia permiten reducir el consumo energético promedio del sistema embebido, siempre que se implementen de manera coherente con el perfil de carga de la aplicación.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda seleccionar la frecuencia de operación del ESP32 en función del tipo de aplicación y su patrón de carga, evitando el uso permanente de frecuencias máximas cuando no sea estrictamente necesario.
- Se sugiere implementar mecanismos de control dinámico de frecuencia en aplicaciones con cargas de trabajo variables, asegurando que las transiciones de frecuencia sean poco frecuentes y bien gestionadas.
- Se recomienda priorizar la estabilidad del sistema de reloj y deshabilitar periféricos innecesarios durante la operación continua, con el fin de reducir variaciones indeseadas en el consumo energético.

REFERENCIAS

7.1 Referencias bibliográficas

- Carnuccio, E. (2020). *Análisis de rendimiento y consumo para sistema embebido con requisitos de tiempo explícitos*. (Tesis pregrado). Universidad Nacional de La Matanza. San Justo, Argentina.
- Dell'Oso, M. (2017). *Análisis de performance y consumo sobre sistemas embebidos multinúcleo*. (Tesis pregrado). Universidad Nacional de La Matanza. San Justo, Argentina.
- Guijarro, A. (2025). *Diseño e implementación de pruebas de calidad mediante el uso de un sistema embebido en el proceso de producción de un dispositivo electrónico*. (Tesis pregrado). Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España
- Hernández, R. (2014). *Metodología De La Investigación* (Vol. 6). México DF, Mexico: Mc Graw Hill.
- Medina-Durán, A., Camarillo-Ramos, M., Quintero-Rosas, V., Díaz-Ramírez, A., & Ibañez-Salas, F. (2020). *Medición de energía en sistemas embebidos para el Internet de las Cosas. Innovación y Desarrollo Tecnológico, Revista Digital*, (95). Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Mexicali.
- Ñaupas-Paitán, H., Mejía-Mejía, E., Novoa-Ramírez, E., & Villagómez-Páucar, A. (2014). *Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis* (4th ed.). Bogotá, Colombia: Ediciones de la U.

7.2 Referencias electrónicas

- Jaimes, A. C. (2021). *Sistema inteligente para el control de consumo de energía en el hogar*. (Tesis pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/21195>

- Narciso, D. (2022). *Sistema de medición inteligente de consumo eléctrico residencial utilizando una red de comunicación inalámbrica*. (Tesis pregrado). Universidad Ciencias y Humanidades. Lima, Perú. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12872/700>
- Ramos, N. E. y Salcedo, J. H. (2025). *Diseño de un concentrador de datos para la transmisión y registro de lecturas de medidores de energía eléctrica domiciliarios utilizando el protocolo MODBUS-RTU*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Lima, Perú. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10757/685630>
- Reategui, J. E. (2024). *Diseño e implementación de un sistema embebido portátil para la adquisición y procesamiento de señales electromiográficas del antebrazo*. (Tesis pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/27800>

ANEXOS

ANEXO N°1
MATRIZ DE CONSISTENCIA

Relación entre la frecuencia de operación de microcontroladores y el consumo energético en sistemas embebidos

PROBLEMA	OBJETIVOS	JUSTIFICACIÓN	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INSTRUMENTOS
Problema general ¿Cuál es la relación entre la frecuencia de operación de los microcontroladores y el consumo energético en sistemas embebidos durante la ejecución de tareas bajo condiciones de funcionamiento controladas? Problemas específicos ¿Cómo influye la configuración del reloj del microcontrolador en el consumo energético total del sistema embebido durante la ejecución de procesos representativos? ¿De qué manera la estabilidad de frecuencia del microcontrolador afecta el consumo energético del sistema embebido en condiciones de operación continua? ¿Cómo incide el control y ajuste dinámico de la frecuencia de operación del microcontrolador en la variación del consumo energético del sistema embebido en distintos modos de funcionamiento?	Objetivo general Determinar la relación existente entre la frecuencia de operación de los microcontroladores y el consumo energético en sistemas embebidos. Objetivos específicos Analizar cómo la configuración del reloj del microcontrolador influye en el consumo energético del sistema embebido. Evaluar el efecto de la estabilidad de frecuencia del microcontrolador sobre el consumo energético en operación continua. Examinar el impacto del control y ajuste dinámico de frecuencia en la variación del consumo energético del sistema.	Justificación Se justifica por la creciente necesidad de optimizar el uso de energía en dispositivos electrónicos que forman parte esencial de la vida moderna. En un contexto donde los sistemas embebidos sustentan aplicaciones críticas en sectores como la automatización industrial, la salud, la agricultura inteligente y el Internet de las Cosas, el consumo energético se ha convertido en un parámetro determinante del desempeño y la sostenibilidad tecnológica.	Hipótesis general Existe una relación significativa entre la frecuencia de operación del microcontrolador y el consumo energético en sistemas embebidos. Hipótesis específicas La configuración del reloj del microcontrolador influye directamente en el nivel de consumo energético del sistema embebido. La estabilidad de frecuencia del microcontrolador afecta el comportamiento del consumo energético durante su operación continua. El control y ajuste dinámico de frecuencia permiten optimizar el consumo energético del sistema embebido.	Variable independiente: Frecuencia de operación de microcontroladores Variable dependiente: Consumo energético en sistemas embebidos	Configuración del reloj Estabilidad de frecuencia Control y ajuste dinámico Consumo dinámico Consumo estático Eficiencia energética	Osciloscopio digital Analizador de señales Software de desarrollo y registro de firmware Analizador de potencia Multímetro de precisión Sistema de registro y software de análisis de energía