

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN



DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA RED
INALÁMBRICA DE SENSORES PARA EL
MONITOREO DE UN SISTEMA DE RIEGO
AGRÍCOLA

PRESENTA

Manuel Aguilar Rodriguez

Tesis para obtener el título de Licenciado en Ingeniería en Ciencias de la
Computación

Dirigida por:

Asesor

Dr. José Italo Cortez

Asesor Externo

M.I. Ernest Cortez

Puebla, Pue., Abril, 2016

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN



DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA RED
INALÁMBRICA DE SENSORES PARA EL
MONITOREO DE UN SISTEMA DE RIEGO
AGRÍCOLA

PRESENTA

Manuel Aguilar Rodriguez

Tesis para obtener el título de Licenciado en Ingeniería en Ciencias de la
Computación

Comisión:

Presidente

Dr. Pedro Garcia Juarez

Secretario

M.C. Gregorio Trinidad García

Vocal

M.I. Carlos Armando Rios Acevedo

Puebla, Pue., Abril, 2016

Agradecimientos

A mis padres Yolanda Rodríguez López y Manuel Aguilar Gutierrez gracias por darme la vida, enseñarme y darme educación, por brindarme su apoyo incondicional y porque siempre están allí para escucharme y apoyarme, por todo el amor que me han dado a mi y a mis hermanos y por todo el sacrificio que han hecho, gracias por todo.

Índice general

Lista de Figuras	III
Justificación	1
Objetivos	3
1. Red Inalámbrica de Sensores	4
1.1. Introducción	4
1.2. Dispositivo programable	7
1.3. Módulo de comunicación inalámbrica	11
1.4. Protocolo de enrutamiento	13
1.4.1. Protocolo LEACH	15
1.4.2. Protocolo MECDA	16
2. Sistema de Riego Agrícola	18
2.1. Producción agrícola.....	18
2.2. Producción agrícola de Tecamachalco.....	21
2.3. Sistema de Riego.....	23
3. Métodos de optimización	26
3.1. Métodos de optimización	26
3.2. Metodología de métodos de optimización	27
3.2.1. Definición del problema	28
3.2.2. Construcción de un modelo matemático.....	28
3.2.3. Obtención de una solución a partir del modelo	29
3.2.4. Prueba del modelo	30

3.2.5. Establecimientos de controles de solución	30
3.3. Clasificación de los problemas de optimización.....	31
4. Diseño de la red inalámbrica de sensores	32
4.1. Análisis de la red de distribución	32
4.2. Módulo Wi-Fi	33
4.3. Diseño del nodo	36
4.3.1. Diseño del Firmware de los nodos	37
4.4. Formulación del problema de optimización.....	39
4.5. Algoritmo de ruteo	43
4.6. Diseño de software	48
Conclusiones	52
Referencias.....	53

Lista de Figuras

1.1. Topología estrella	5
1.2. Topología árbol.....	6
1.3. Topología malla	6
1.4. Estructura de un microcontrolador	8
1.5. Estructura de un CPU en un microcontrolador	8
1.6. Arquitectura Harvard en un microcontrolador	9
1.7. Módulos de un microcontrolador	10
1.8. Tipos de redes inalámbricas	11
1.9. Esquema unicast.....	14
1.10. Esquema multicast.....	14
1.11. Esquema broadcast.....	14
2.1. Porcentajes de productos agrícolas cíclicos	19
2.2. División de Municipios de acuerdo a las Hectáreas de siembra.....	22
2.3. Distrito de Riego 030 Valsequillo	24
3.1. Metodología de investigación de operaciones	28
3.2. Clasificación de los métodos de optimización	31

4.1. Zona delimitada para la WSN	32
4.2. Diagrama esquemático del ESP8266	34
4.3. Administración de energía de ESP8266	35
4.4. PIC18F2550.....	36
4.5. Firmware del nodo coordinador	38
4.6. Firmware del nodo sensor	39
4.7. Modelo-Vista-Controlador	49
4.8. Software	50

Justificación

La economía del país se caracteriza por dedicarse al sector primario de la producción, debido a la riqueza natural que posee el territorio Mexicano. La agricultura es una de las principales actividades económicas, siendo el cultivo de maíz el producto agrícola con mayor aportación a la agricultura, representando el 33.5% del total de la producción agrícola cíclica del país en el año 2010 [1].

El estado de Puebla se sitúa como el segundo estado de la República con mayor superficie cosechada de cultivo de maíz, con 568,059 Ha. En producción de maíz Puebla se ubicó a nivel nacional como el séptimo estado con 1,080,462 Ton y se encuentra posicionado en sexto lugar en valor de la producción con 3,628,594 miles de pesos [2].

De acuerdo a datos del INEGI en el año 2011, el estado de Puebla destinó una superficie total de 589,087Ha para la siembra del grano de maíz, considerando que cada uno de sus 217 municipios en promedio aporta 2,714.7Ha para el cultivo del maíz, el municipio de Tecamachalco dedicó 7,120Ha para la siembra de grano de maíz, el equivalente a la aportación de 3 municipios [3, 4].

El municipio de Tecamachalco se encuentra en la 11va posición de municipios dentro del estado con mayor número de hectáreas dedicadas a la agricultura. Posee 7,120Ha sembradas con grano de maíz. Con un volumen de producción de maíz de 18,066Ton y un valor de 90,332 miles de pesos [5, 6, 7].

Para el riego de los cultivos, el municipio de Tecamachalco posee un extenso y complejo sistema de canales de riego y acueductos que corren el territorio. La distribución del agua se realiza mediante compuertas que son controladas en forma manual. A pesar de que el municipio de Tecamachalco es uno de los principales productores agrícolas, el sistema de distribución que emplea presenta múltiples deficiencias, generando diversos daños al cultivo

Actualmente, no existe un sistema que permita el monitoreo de las compuertas, por ello, no es posible detectar si existen fugas y/o pérdidas en la presión de agua. Provocando que diversos cultivos no sean irrigados, causando la pérdida de hectáreas completas de siembra, mermando el desarrollo productivo de la región [8].

Para dar solución al problema, se ha desarrollado un sistema que permita el monitoreo de compuertas de riego mediante una red inalámbrica de sensores enfocada al sistema de distribución de agua del municipio de Tecamachalco. El sistema permitirá el aprovechamiento de agua para el riego de múltiples terrenos de siembra, evitando la pérdida de cultivos y fomentando el desarrollo productivo del municipio de Tecamachalco.

El presente proyecto consiste en diseñar una red inalámbrica de sensores (*Wireless Sensor Network, WSN*), que consta de un sistema base, un protocolo de enrutamiento y múltiples nodos. El diseño de la red se formulará como un problema de optimización matemática. Además se procederá a realizar el modelado matemático de la función objetivo y las restricciones con la finalidad de minimizar el consumo de energía en los nodos que pertenecen a una *WSN*, mediante el balanceo de carga de información.

Se realizará la implementación de un nodo de la *WSN*, para ello se desarrollará un sistema embebido que consistirá de un dispositivo programable, un módulo de comunicación inalámbrica, un sistema de almacenamiento de energía y una etapa de acoplamiento de señal para los diversos sensores.

El nodo podrá ser repicado de acuerdo a las necesidades y estructura del área de despliegue de la *WSN*. También, se desarrollará un software que permita monitorear la *WSN*, conocer los paquetes de información de cada nodo, que incluyen los datos que han sido obtenidos a través de los sensores y el estado del sistema de almacenamiento de energía [9].

El diseño de la *WSN* será enfocado al monitoreo de compuertas de riego agrícola en una red de distribución de agua. La *WSN* podrá ser implementada en un futuro próximo en el municipio de Tecamachalco. El desarrollo del presente trabajo permitirá establecer una metodología enfocada al diseño óptimo de una *WSN*, para múltiples aplicaciones que requieran del censado y monitoreo de diversos parámetros.

Objetivo General

Realizar el diseño óptimo de una red inalámbrica de sensores enfocado al monitoreo de un sistema de riego agrícola en el municipio de Tecamachalco.

Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica de las redes inalámbricas de sensores.
- Realizar el diseño de una red inalámbrica de sensores para una red de distribución de agua.
- El diseño de la red se formulará como un problema de optimización matemática con el objetivo de minimizar el consumo de energía de la WSN.
- Analizar el estado del arte de los métodos de optimización que permitan resolver el problema de consumo de energía de la red.
- Diseñar un sistema embebido para implementar un nodo de la red inalámbrica de sensores, que sea escalable a múltiples nodos.
- Desarrollar un software para el monitoreo de la red inalámbrica de sensores enfocado al sistema de riego agrícola.

1.1 Introducción

Actualmente, existen múltiples aplicaciones que requieren de sistemas de monitoreo y/o control, que posean un elevado rango de alcance y cuenten con la capacidad de operar con un mínimo consumo de energía. Gracias a los avances en la tecnología de sensores y a la fabricación de circuitos integrados ha permitido el desarrollo de redes de sensores inalámbricos (Wireless Sensors Network, WSN).

Una red de sensores inalámbricos o WSN, es una red autónoma y de naturaleza distribuida, generalmente en patrones irregulares. Debido a ello, las WSN han influido significativamente en los sistemas de monitoreo tradicionales por su flexibilidad y redundancia [10].

Las redes de sensores son capaces de recoger, almacenar y transmitir información relacionada con un parámetro ambiental. La WSN ha revolucionado la forma de recopilar información, especialmente donde la información es difícil de obtener.

La WSN ha sido utilizada en zonas donde las redes tradicionales fallan o son insuficientes, también ha sido aplicado en diversas áreas como seguridad nacional, operaciones de rescate, monitoreo climático, uso militar, industria, entre otros [11].

La WSN se encuentra conformada por múltiples dispositivos, denominados nodos, que emplean diversos sensores para monitorear condiciones físicas o ambientales en un área específica [12]. Cada nodo en una WSN posee un dispositivo programable, un módulo de comunicación inalámbrica, un sistema de almacenamiento de energía, sensores y/o actuadores. .

La principal característica de una WSN es la facilidad de despliegue de los nodos en diversos ambientes. La investigación en redes de sensores comenzó con el proyecto Distributed Sensor Networks (DSN) de la agencia militar de investigación avanzada de Estados Unidos (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) en 1980, [12].

Cada nodo de la WSN se encuentra en configuración ad-hoc, esto quiere decir que no existe un nodo central sino que todos los nodos se encuentran en condiciones iguales. Sin embargo cada nodo puede enviar datos censados a otros nodos cercanos hasta que la información llegue a su destino. Debido a ello los nodos de una WSN se encuentran típicamente organizados en tres tipos de topologías de red: estrella, árbol y malla [13].

En la topología de estrella cada nodo se conecta directamente a una puerta de enlace o Gateway encargado de comunicarse con una estación base, debido a ello, en una WSN los nodos son categorizados como nodos sensores y nodos ruteadores, Fig. 1.1.

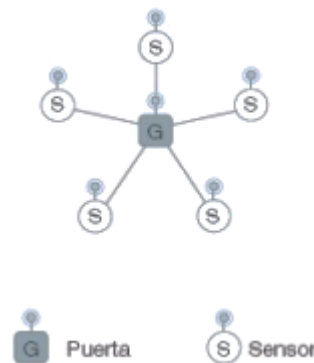


Fig. 1.1 Topología estrella

La topología de árbol se caracteriza por el manejo de jerarquías, es decir, cada nodo se conecta a un nodo de mayor jerarquía en el árbol y posteriormente al Gateway. En esta topología los datos de la WSN son ruteados desde el nodo que posee menor jerarquía en el árbol hasta llegar al Gateway, Fig. 1.2.

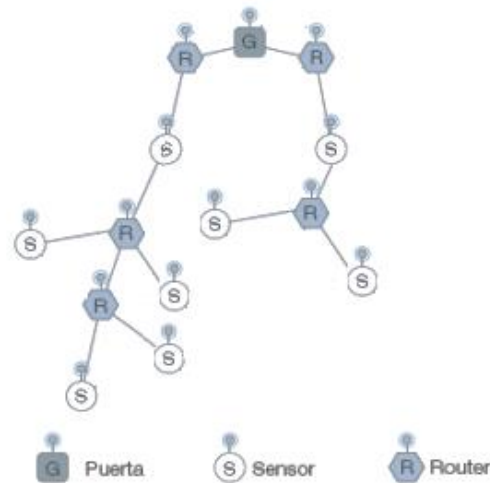


Fig. 1.2 Topología árbol

Finalmente, la topología tipo malla ofrece una mayor estabilidad a la red, en una WSN con topología tipo malla, los nodos se pueden conectar a múltiples nodos en el sistema y funcionar como nodos sensores y nodos ruteadores para transmitir la información por una ruta disponible, Fig. 1.3 [14].

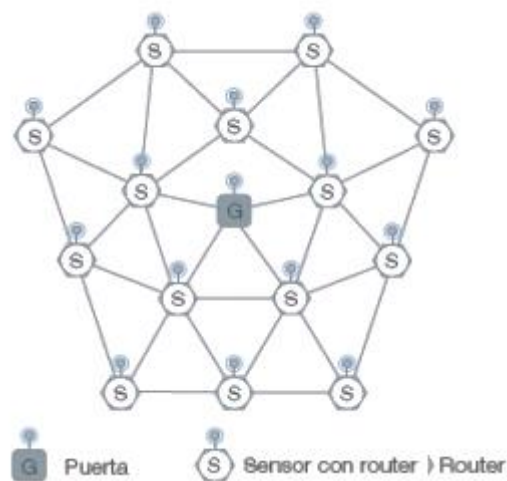


Fig. 1.3 Topología malla

Una de las mayores preocupaciones que enfrenta una WSN consiste en emplear de manera eficiente la energía que provee el sistema de almacenamiento de energía, debido a ello, el tiempo de procesamiento y comunicación de la WSN se encuentra limitado, por el alto consumo de energía que requiere un periodo largo de operación.

El problema de energía en una WSN se ha convertido en uno de los retos de investigación más importantes en los últimos años. Actualmente, una WSN emplea principalmente el protocolo IEEE 802.15.4 o el IEEE 802.11 y es implementada en tecnologías ZigBee o WiFi debido al bajo consumo de potencia que representan los sistemas basados en esas tecnologías [15].

El consumo de energía en una WSN se ve afectado principalmente por el uso de protocolos de enrutamiento de datos que no son eficientes para este tipo de redes. Por ello, se han desarrollado diversas propuestas de protocolos de enrutamiento para tratar de resolver el consumo de energía.

1.2 Dispositivo programable

Un nodo de la WSN cuenta con un dispositivo programable capaz de operar de manera eficiente en diversas condiciones y con las limitantes energéticas del nodo. Un dispositivo lógico programable es un circuito integrado, que puede ser configurado mediante software para implementar una amplia variedad de funciones lógicas para el desarrollo de un determinado sistema.

Entre los dispositivos más comunes se encuentra el microcontrolador, el cual provee de un sistema mínimo formado por procesador, memoria, puertos de entrada/salida (E/S) y periféricos, todo encapsulado en un circuito integrado. Entre los fabricantes se encuentran Microchip, Atmel y Freescale [16].

Un microcontrolador es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar instrucciones almacenadas en memoria, conformado principalmente por la unidad de procesamiento (CPU), memoria y periféricos de entrada/salida, Fig. 1.4.

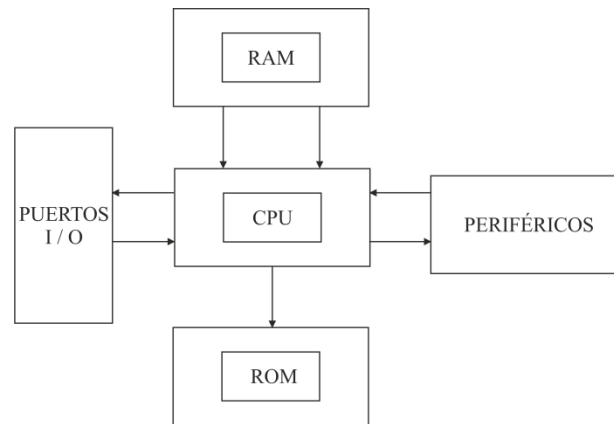


Fig. 1.4 Estructura de un microcontrolador

La Unidad de Procesamiento Central (Central Processing Unit, CPU) se encarga de procesar datos y ejecutar instrucciones, mediante la realización de operaciones aritméticas, lógicas y de entrada/salida. La CPU está compuesta principalmente por 2 partes la unidad de control y el camino de datos o datapath, Fig. 1.5 [17].

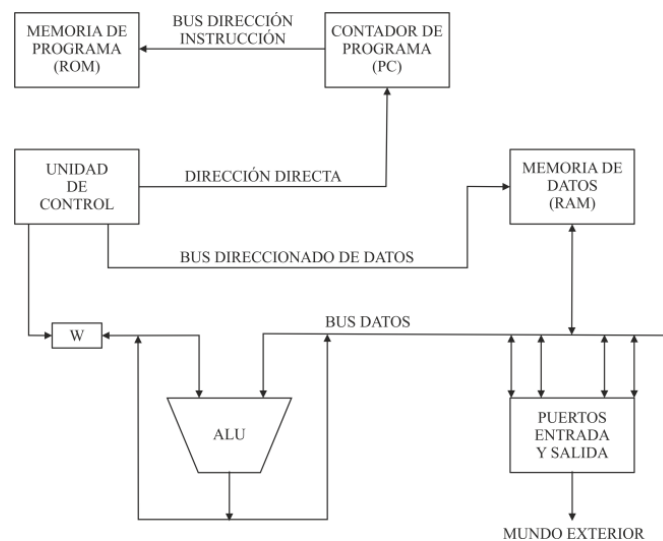


Fig. 1.5 Estructura de un CPU en un microcontrolador

Los microcontroladores con arquitectura Harvard tienen una memoria para el programa tipo memoria flash y una memoria de datos tipo SRAM, esta característica permite reducir el tiempo de lectura y escritura a la memoria incrementando el rendimiento del sistema. La arquitectura empleada permite diseñar dispositivos con distintos tamaños de direccionamiento para el acceso a las instrucciones y a los datos, lo que permite reducir los costos de fabricación, Fig. 1.6 [18].

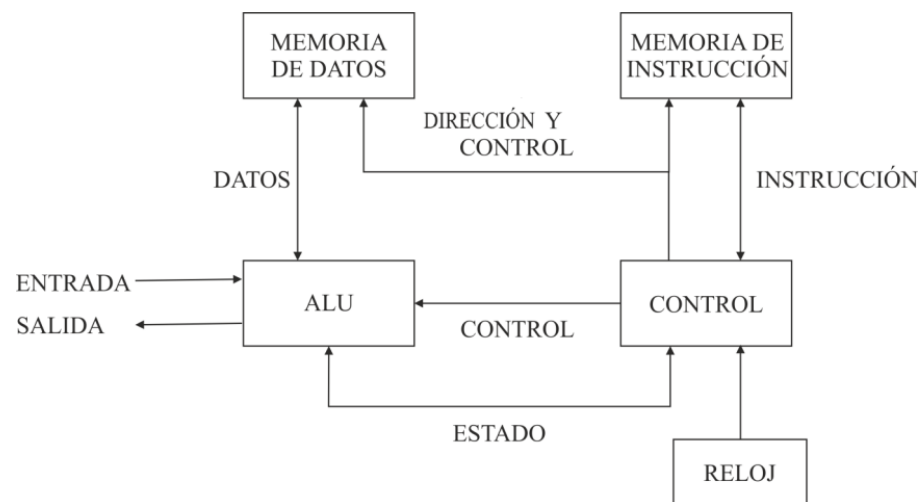


Fig. 1.6 Arquitectura Harvard en un microcontrolador

Un microcontrolador está conformado por un reloj interno, Memoria de Acceso Aleatorio (Random-Access Memory, RAM), Memoria de Solo Lectura (Read-Only Memory, ROM) y puertos de entrada/salida. Algunos dispositivos poseen módulos adicionales para cumplir con funciones específicas, Fig. 1.7.

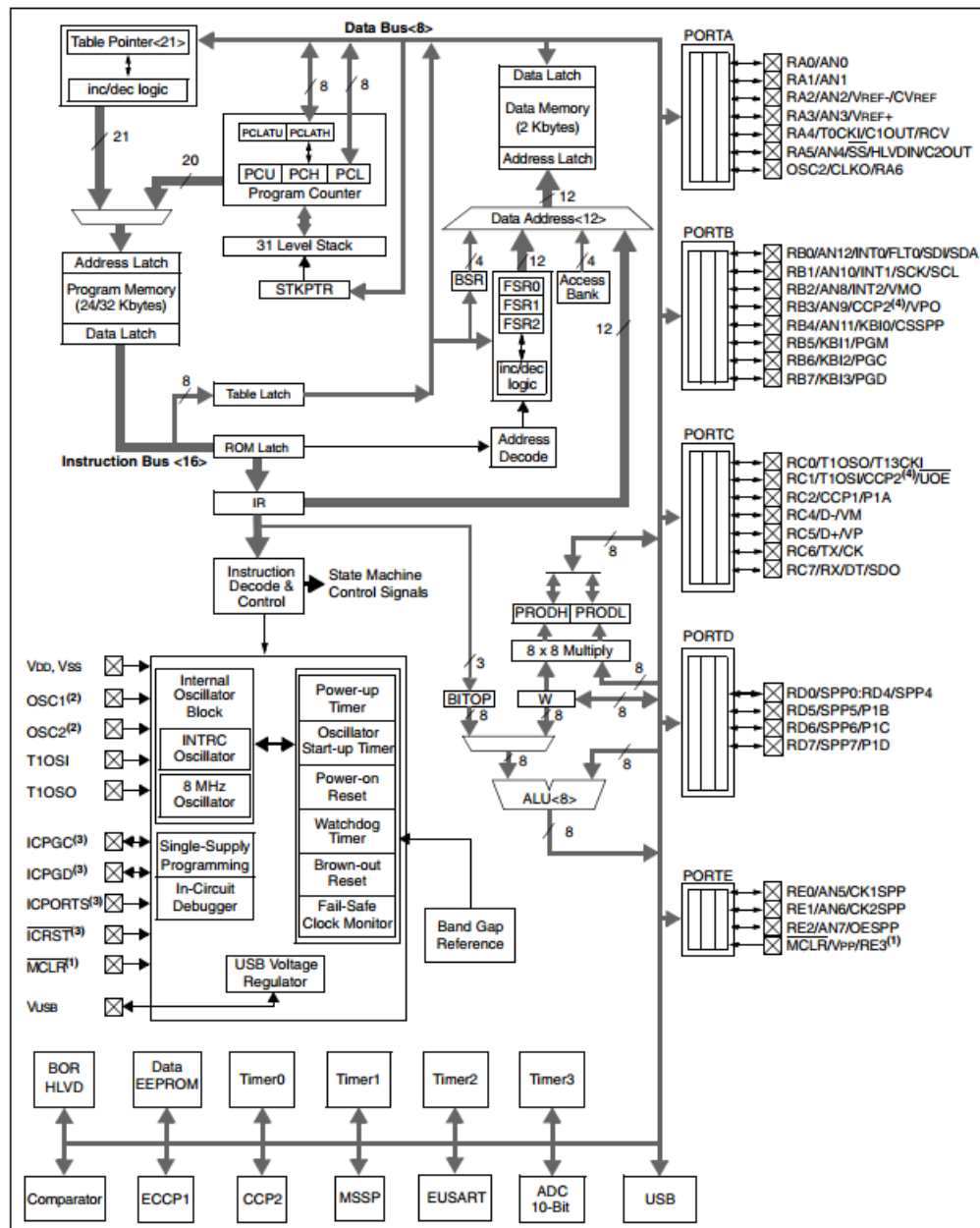


Fig. 1.7 Módulos de un microcontrolador

1.3 Módulo de comunicación inalámbrica

Un nodo sensor cuenta con un módulo que le provea comunicación inalámbrica con los demás nodos, el protocolo inalámbrico empleado se encuentra en dependencia de los requerimientos de la aplicación.

Los nodos usan las bandas de radio Industrial, Científica and Medica, ISM. Son las bandas de radio o porciones del espectro radioeléctrico empleados internacionalmente por el uso de energía de radiofrecuencia para fines industriales, científicos y médicos que no sean de telecomunicaciones [19].

Las ISM son bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia, empleados en áreas tales como la industria, científica y médica. El uso de estas bandas de frecuencia está abierto para su uso sin necesidad de licencia, Fig. 1.8.

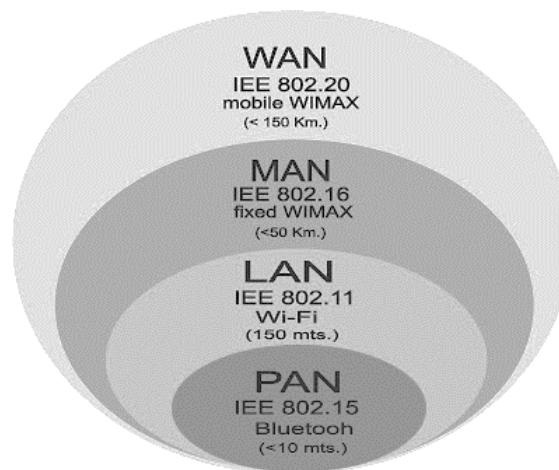


Fig. 1.8 Tipos de redes inalámbricas

Los tipos de redes inalámbricas principalmente usados son la Red Inalámbrica de Área Personal (Wireless Personal Área Network, WPAN) de corto alcance con tecnologías como

Bluetooth y ZigBee, ambos basados en el estándar IEEE 802.15.4 que opera en la frecuencia alrededor de 2.4GHz [20].

También, la Red Inalámbrica de Área Local (Wireless Local Área Network, WLAN) empleando la tecnología Wireless Fidelity, Wi-Fi, el cual se encuentra basado en el estándar IEEE 802.11, opera tanto en la frecuencia de 2.4GHz como en la de 5GHz.

Las Redes Inalámbricas de Área Metropolitana (Wireless Metropolitan Área Network, WMAN), la tecnología usada es Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX, basada en el estándar IEEE 802.16, opera en las frecuencias de 2.5 a 5.8GHz [21].

Los dispositivos electrónicos que emplean la tecnología Wi-Fi son capaces de conectarse a una WLAN, principalmente a las bandas ISM mediante las bandas de radio de 2.4GHz y 5GHz. Una WLAN es generalmente protegida por contraseña, pero puede estar abierta, lo que permite que cualquier dispositivo dentro de su rango pueda acceder a los recursos de la WLAN [22].

La tecnología Wi-Fi se encuentra basada en el estándar Institute of Electrical and Electronics Engineers 802.11, IEEE 802.11. Wi-Fi se refiere al grupo colectivo de especificaciones 802.11, la familia 802.11 consiste en una serie de técnicas de modulación semidúplex que utilizan el mismo protocolo básico.

El protocolo 802.11-1997 fue el primer estándar de red inalámbrica en la familia, pero 802.11b fue el primero ampliamente aceptado, seguido de 802.11a, 802.11g, 802.11n, y 802.11ac. Otras normas en la familia (c-f, h, j) son modificaciones de servicios que se utilizan para ampliar el alcance actual de la norma existente, también incluyen correcciones a una especificación anterior [23].

El alcance de la señal Wi-Fi depende de la banda de frecuencia, potencia de salida de radio, ganancia de la antena y el tipo de antena, así como también, de la técnica de modulación. Un punto de acceso compatible con el protocolo 802.11b o 802.11g, utilizan generalmente una antena de stock podría tener un alcance de 100 m.

1.4 Protocolo de enrutamiento

El encaminamiento, enrutamiento o ruteo, se encarga de buscar un camino entre todos los posibles en una red de paquetes para realizar el envío de información. El ruteo es realizado mediante un concepto denominado vector-distancia.

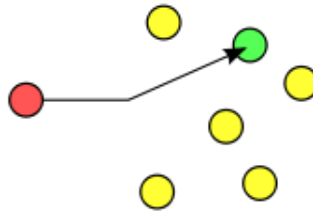
Se contabiliza un salto cada vez que los datos atraviesan un router, esto se considera equivalente a un salto. Una ruta que tiene un número de saltos igual a 4 indica que los datos que se transportan por la ruta deben atravesar cuatro routers antes de llegar a su destino final en la red. Si hay múltiples rutas hacia un destino, la ruta con el menor número de saltos es la ruta seleccionada por el router [24].

Existen protocolos de enrutamiento estático y dinámicos, un protocolo de enrutamiento estático es generado por el propio administrador, todas las rutas estáticas que se le ingresen son las que el router *conocerá*, por lo tanto sabrá enrutar paquetes hacia esas rutas.

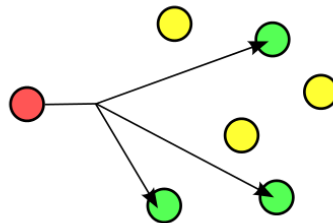
Los protocolos de enrutamiento dinámico emplean un protocolo de enrutamiento dinámico, donde el administrador sólo se encarga de configurar el protocolo de enrutamiento mediante comandos, en todos los routers de la red y estos automáticamente intercambiarán sus tablas de enrutamiento con sus routers vecinos, por lo tanto cada router conoce la red gracias a las publicaciones de las otras redes que recibe de otros routers [24].

El ruteo es realizado mediante diversos esquemas de encaminamiento o difusión, también llamado *cast*. Los principales esquemas de difusión son [25]:

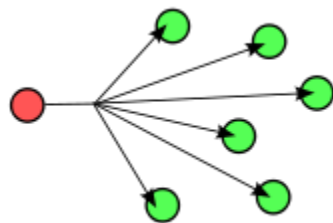
Unicast: es el envío de información desde un único emisor a un único receptor. El método *unicast* es utilizado en Internet, y se aplica tanto para transmisiones en vivo y bajo demanda, Fig. 1.9.

Fig. 1.9 Esquema *unicast*

Multicast: es el envío de información en múltiples redes a múltiples destinos simultáneamente. Antes del envío de información, deben establecerse una serie de parámetros para poder recibirla, Fig. 1.10.

Fig. 1.10 Esquema *multicast*

Broadcast: un nodo emisor envía información a una multitud de nodos receptores de manera simultánea, sin necesidad de reproducir la misma transmisión nodo por nodo, Fig. 1.11.

Fig. 1.11 Esquema *broadcast*

En una WSN los nodos no tienen conocimiento de la topología de la red, deben descubrirla. La idea básica consiste en que cuando un nuevo nodo aparece en una red anuncia su presencia y escucha los anuncios *broadcast* de sus vecinos.

El nodo se informa acerca de los nuevos nodos a su alcance y de la manera de encaminarse a través de ellos, a su vez, anunciar al resto de nodos que pueden acceder a él. Transcurrido un tiempo, cada nodo sabrá que nodos tiene alrededor y una o diversas formas de alcanzarlos.

Los algoritmos de enrutamiento en redes de sensores inalámbricas tienen que cumplir las siguientes normas:

- Mantener una tabla de enrutamiento razonablemente pequeña

- Elegir la mejor ruta para un destino dado

- Mantener la tabla regularmente para actualizar la caída de nodos, su cambio de posición o su aparición

- Requerir una pequeña cantidad de mensajes y tiempo para converger

1.4.1 Protocolo LEACH

El protocolo Low-energy adaptive clustering hierarchy LEACH es ampliamente aplicado. Consiste en formar clústeres de nodos basados en la energía almacenada. Cada clúster tiene un coordinador (CH) que tiene el deber de transmitir los datos, mientras que otros nodos del cluster recogen los datos. Un CH se puede comunicar con otra CH o con la estación base. Para equilibrar la disipación de energía del nodo CH presenta una rotación después de un número específico de comunicaciones.

1.4.2 Protocolo MECDA

El protocolo de minimum energy compressed data aggregation (MECDA), el algoritmo consiste en mantener dos listas, A y F , el agregador fijo y el reenviador. Se denota a $MST(A)$ el MST inducido por A y por $SPF(F, A)$ el camino más corto (SPF) que conecta cada $i \in F$ a través de la ruta más corta a su agregador cercano $j = \arg \min_{j \in A} (SP_{ij})$.

Mientras que A se calcula fácilmente por el algoritmo de Prim, el último se puede obtener simplemente al realizar búsquedas lineales en una mesa de pares de todos los caminos más cortos, obtenido de previamente por el algoritmo de Floyd-Warshall.

El costo incurrido por una cierta partición A y F es la suma de $cost_{MST}$ y $cost_{SPF}$. A partir de una asignación que $A = \{s\}$ y $F = V \setminus \{s\}$, el algoritmo procede de iteraciones. Se denota por $B(A) = \{i \in F \mid \exists j \in R: (i, j) \in E\}$ la vecindad de nodos de A , algoritmo 1 MECDA

Algorithm 1: MECDA_Greedy**Input:** $G(V, E)$, s , k **Output:** T , A

```

1  $A = \{s\}$ ;  $F = V \setminus \{s\}$ ;  $\text{cost} = \infty$ 
2 repeat
3   forall the  $i \in B(A)$  do
4      $A_{\text{test}} = A \cup \{i\}$ ;  $F_{\text{test}} = F \setminus \{i\}$ 
5      $\{\text{cost}_{\text{MST}}, L\} \leftarrow \text{MST}(A_{\text{test}})$ 
6      $\{\text{cost}_{\text{SPF}}, t\} \leftarrow \text{SPF}(F_{\text{test}}, A_{\text{test}})$ 
7     if  $\text{cost}_{\text{MST}} + \text{cost}_{\text{SPF}} \leq \text{cost}$  AND
        $\min_{l \in L} t_l \geq k - 1$  then
8        $\text{cost} = \text{cost}_{\text{MST}} + \text{cost}_{\text{SPF}}$ 
9        $A_{\text{cand}} = A_{\text{test}}$ ;  $F_{\text{cand}} = F_{\text{test}}$ 
10    end
11  end
12   $A = A_{\text{cand}}$ ;  $F = F_{\text{cand}}$ 
13 until  $A$  unchanged;
14  $T = \text{MST}(A) \cup \text{SPF}(F, A)$ 
15 return  $T$ ,  $A$ 

```

En cada ronda, el algoritmo mueve un nodo de $B(a)$ a A mediante uno de los siguientes dos criterios:

- 1) Caracterización de optimalidad para A se cumple, es decir, cada hoja nodo en $\text{MST}(A)$ no tiene menos descendientes de $k-1$
- 2) La acción conduce a la mayor reducción de costes. En consecuencia, el núcleo sigue creciendo y el algoritmo termina permitiendo la expansión del núcleo.

2.1 Producción agrícola

La economía del país se caracteriza por dedicarse al sector primario de la producción, debido a la riqueza natural que posee el territorio Mexicano. Actualmente, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (*Food and Agriculture Organization, FAO*), ubica a México como [25]:

- 1^{er} productor de Aguacate, Cebolla, Chayote, Limón, Limas y Semilla de Cártamo.
- 2^{do} productor de Papaya, Chile Fresco y Frutos Secos.
- 3^{er} productor del Anís, Naranja y Frijol sin desgranar.
- 4^{to} productor de Espárrago, maíz y Mango.

La producción del cultivo de maíz representó en el año 2009 el 33.5% del total de la producción agrícola cíclica del país, siendo el producto con mayor aportación al valor de la producción agrícola nacional, seguido del sorgo que representa el 8%, mientras que el jitomate aporta el 7.6% y el frijol el 5.2% de la producción, Fig. 2.1.

Estructura del valor de la producción agrícola nacional de cultivos seleccionados
Año agrícola 2010
(Por ciento)

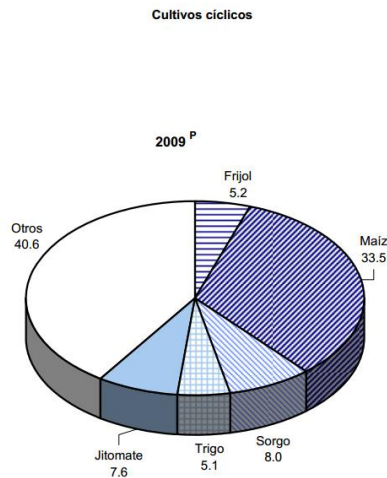


Fig. 2.1 Porcentajes de productos agrícolas cíclicos

De acuerdo a datos del *INEGI*, en 2010 el cultivo de maíz tubo una superficie total cosechada de 7,148,046 *Ha*, donde se obtuvo una producción de 23,301,879 *Ton* con un valor de 65,629,388 miles de pesos. El estado de Puebla se sitúa como el segundo estado de la República con mayor superficie cosechada de cultivo de maíz, con 568,059 *Ha*. En producción de maíz Puebla se ubicó a nivel nacional como el séptimo estado con 1,080,462 *Ton* y se encuentra posicionado en sexto lugar en valor de la producción con 3,628,594 miles de pesos, Tabla 1.

Tabla 1 Superficie cosechada y producción de maíz por entidad federativa 2010

Entidad Federativa	Superficie Cosechada (Ha)	Producción (T)	Valor (miles de pesos)
Estados Unidos Mexicanos	7,148,046	23,301,879	65,629,388
Aguascalientes	19,822	51,630	151,700
Baja California	0	0	0
Baja California Sur	2,793	17,095	45,026
Campeche	151,678	384,582	1,127,613
Coahuila de Zaragoza	33,025	39,278	114,493
Colima	12,611	38,141	106,936
Chiapas	686,547	1,394,496	4,358,957
Chihuahua	242,634	1,068,689	2,724,508
Distrito Federal	5,497	8,829	35,930
Durango	167,882	249,437	728,460
Guanajuato	284,201	1,185,172	3,356,279
Guerrero	466,451	1,413,973	3,934,978
Hidalgo	216,036	613,320	1,932,213
Jalisco	565,895	3,395,072	9,537,188
México	544,357	1,549,545	4,799,118
Michoacán de Ocampo	463,566	1,526,484	4,288,469
Morelos	29,296	94,008	365,472
Nayarit	43,369	176,224	509,108
Nuevo León	26,328	60,735	193,372
Oaxaca	542,593	645,531	2,558,170
Puebla	568,059	1,080,462	3,628,594
Querétaro	104,334	282,427	787,109
Quintana Roo	66,843	55,779	166,184
San Luis Potosí	161,852	165,768	488,703
Sinaloa	525,142	5,227,872	12,086,414
Sonora	43,149	240,954	561,918
Tabasco	66,843	104,467	365,283
Tamaulipas	147,316	540,170	1,276,030
Tlaxcala	119,685	305,544	852,913
Veracruz de Ignacio de la Llave	506,990	973,458	3,286,125
Yucatán	147,559	120,542	413,631
Zacatecas	185,718	292,195	848,497

2.2 Producción agrícola de Tecamachalco

El INEGI en el año 2010, dividió a los 217 municipios del estado de Puebla en 5 grupos de acuerdo a las hectáreas destinadas para la agricultura:

- 167 municipios que poseen más de 90 Ha y menos de 5,846.8 Ha
- 30 municipios que poseen más de 5,846.8 Ha y menos 11,603.6 Ha
- 15 municipios que poseen más de 11,603.6 Ha y menos de 17,360.4 Ha
- 3 municipios que poseen más de 17,360.4 Ha y menos de 23,117.2 Ha
- 2 municipios que poseen más de 23,117.2 Ha y menos de 28,874 Ha

El municipio de Tecamachalco posee una superficie de 14,137 Ha destinada a la agricultura, siendo una superficie mayor que la designada por 206 municipios del estado de Puebla, posicionándolo como el 11vo municipio del estado de Puebla con mayor superficie destinada a la agricultura, Fig. 2.2.

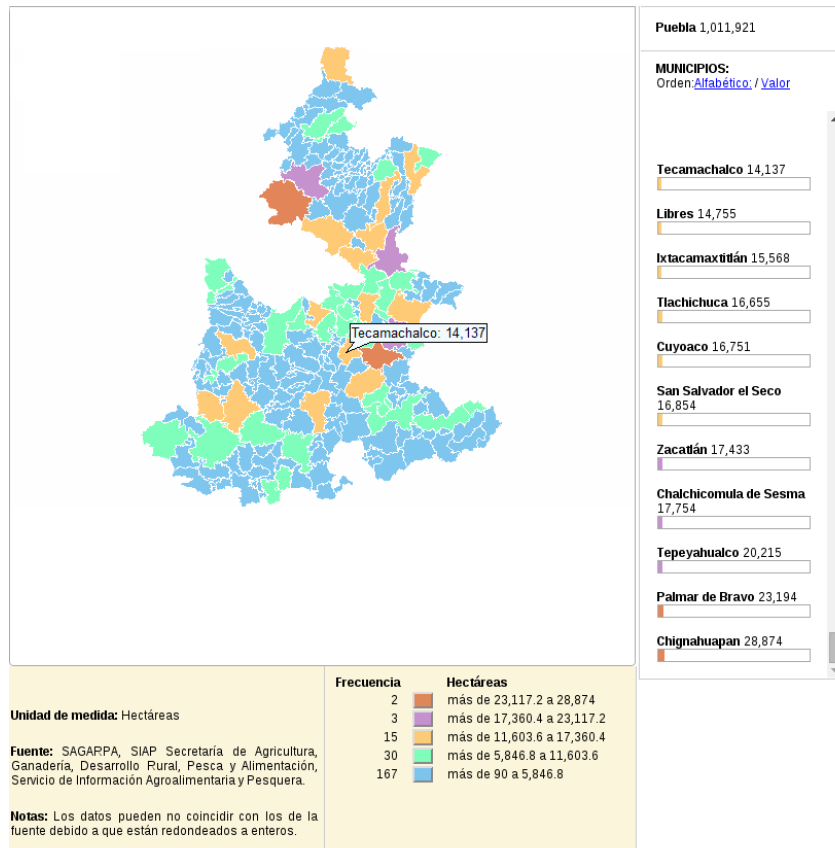


Fig. 2.2 División de Municipios de acuerdo a las Hectáreas de siembra

De acuerdo a datos del INEGI en el año 2011, el municipio de Tecamachalco destinó 7,120 Ha para la siembra de grano de maíz, mientras que el estado de Puebla destinó una superficie total de 589,087 Ha para la siembra del grano de maíz, suponiendo que cada uno de los 217 municipios en promedio aportara 2,714.7 Ha para el cultivo del maíz, la superficie de Tecamachalco estaría contribuyendo con el equivalente a 3 municipios. El valor de la producción del grano de maíz en el municipio de Tecamachalco fue de 90,332 miles de pesos, mientras que el estado de Puebla el total fue de 2,655,187 miles de pesos. Suponiendo que en promedio cada municipio contribuyera con 12,235.8 miles de pesos, el municipio de Tecamachalco aportaría lo equivalente a 7 municipios, Tabla 2.

Tabla 2. Actividad agrícola en Tecamachalco

	Tecamachalco	Puebla
Superficie sembrada total (Hectáreas), 2011	14,137	1,011,921
Superficie sembrada de maíz grano (Hectáreas), 2011	7,120	589,087
Superficie cosechada total (Hectáreas), 2011	11,042	829,994
Superficie cosechada del resto de cultivos nacionales (Hectáreas), 2011	1,547	235,633
Volumen de la producción de maíz grano (Toneladas), 2011	18,066	611,805
Valor de la producción agrícola total (Miles de pesos), 2011	260,995	10,966,389
Valor de la producción de maíz grano (Miles de pesos), 2011	90,332	2,655,187

2.3 Sistema de Riego

Las diferentes fases de crecimiento y maduración del grano de maíz, requiere del abastecimiento de agua. De acuerdo a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el suministro de agua destinada al riego del estado de Puebla proviene del Distrito de Riego 030 Valsequillo, siendo la presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo) la principal fuente de abastecimiento.

El agua de la presa es destinada para el riego de cultivos en 19 municipios que abarcan 33,085 Ha, comprendidos por los valles de Tecamachalco, Tlacotepec, Tepanco y Tehuacán, Fig. 2.3, [26, 27, 28].

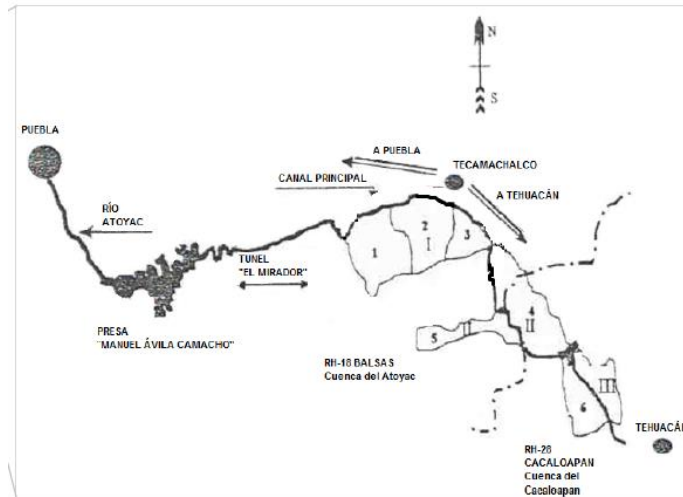


Fig. 2.3 Distrito de Riego 030 Valsequillo

Durante tres periodos al año el agua de la Presa Manuel Ávila Camacho es distribuida para la irrigación de cultivos. La apertura de la presa beneficia a más de 18 mil usuarios que siembran principalmente grano de maíz con miles de litros cúbicos que transporta el canal de Valsequillo durante aproximadamente 22 días de operación por cada periodo, [29, 30].

El municipio de Tecamachalco riega más de 7 mil hectáreas de cultivo, para ello posee un extenso y complejo sistema de canales de riego y acueductos que corren el territorio. La distribución del agua se realiza mediante compuertas que son controladas en forma manual.

A pesar de que el municipio de Tecamachalco es uno de los principales productores agrícolas, el sistema de distribución que emplea presenta múltiples deficiencias, generando diversos daños al cultivo.

La falta de administración equitativa de horas-agua en cada terreno de siembra provoca que el grano de maíz no complete correctamente su maduración. Además, el inexistente control de compuertas provoca que diversos cultivos no sean regados, ocasionando la pérdida de hectáreas completas de siembra, mermando el desarrollo productivo de la región.

Además, el área donde se encuentran las compuertas carece de seguridad, dando lugar a conflictos entre ejidatarios que manipulan las compuertas a su conveniencia y que no cumplen con el horario asignado para el riego, provocando enfrentamientos violentos.

Debido a la preocupante problemática que presenta actualmente el sistema de distribución de agua, surge la necesidad de diseñar un sistema que permita la administración y control de las compuertas, para la planeación y manipulación de la circulación de agua para el riego de múltiples cultivos.

Lo que permitirá una distribución equitativa de horas-agua a cada uno de los terrenos de riego evitando la pérdida de cultivos y conflictos entre ejidatarios, fomentando el desarrollo productivo del municipio de Tecamachalco.

3.1 Métodos de optimización

Los métodos de optimización o investigación de operaciones son una rama de las matemáticas que consiste en el uso de modelos matemáticos, estadísticos y algoritmos con objetivo de realizar una toma de decisiones. Un método de optimización se centra en el estudio de sistemas complejos, con la finalidad de mejorar su funcionamiento [31].

La investigación de operaciones permite el análisis de la toma de decisiones teniendo en cuenta recursos limitados, para determinar cómo se puede optimizar un objetivo definido, como la maximización de los beneficios o la minimización de costos.

En matemáticas, estadísticas, ciencias de la computación y economía, la optimización matemática es la selección del mejor elemento de un conjunto de elementos disponibles, con respecto a algún criterio.

Un problema de optimización consiste en maximizar o minimizar una función real eligiendo sistemáticamente valores de entrada, tomados de un conjunto permitido y establecido. La generalización de la teoría de la optimización y técnicas para otras formulaciones comprende un área de las matemáticas aplicadas [32].

De forma general, la optimización incluye el descubrimiento de los *mejores valores* de alguna función objetivo dado un dominio definido, incluyendo una variedad de diferentes tipos de funciones objetivo y diferentes tipos de dominios.

El problema de optimización trata de tomar una decisión óptima para maximizar ganancias, velocidad, eficiencia o para minimizar un criterio determinado ya sea costos, tiempo, riesgo, error, entre otros. Las restricciones significan que no cualquier decisión es posible.

Un problema de optimización está compuesto de los siguientes elementos:

- *Función Objetivo*: Medida de la efectividad buscada expresada en función de las variables de decisión. Es lo que se minimiza o se maximiza.
- *Variables de decisión*: Decisiones cuantificables sobre las que se ejerce control. Por ejemplo: calibre de un conductor eléctrico que se usará en un diseño.
- *Restricciones*: Factores que limitan los valores que pueden asumir las variables de decisión. Por ejemplo: corriente máxima del conductor.
- *Parámetros*: Datos o recursos que asumen valores constantes y que forman los coeficientes de las variables. Por ejemplo: resistencia del conductor por unidad de longitud.

3.2 Metodología de métodos de optimización

La investigación de operaciones no es una colección de fórmulas o algoritmos aplicables sistemáticamente a situaciones determinadas. El objetivo y finalidad de la investigación de operaciones es encontrar la solución óptima para un determinado problema ya sea de ámbito militar, económico, de infraestructura, logístico, entre otros, Fig. 3.1 [33].

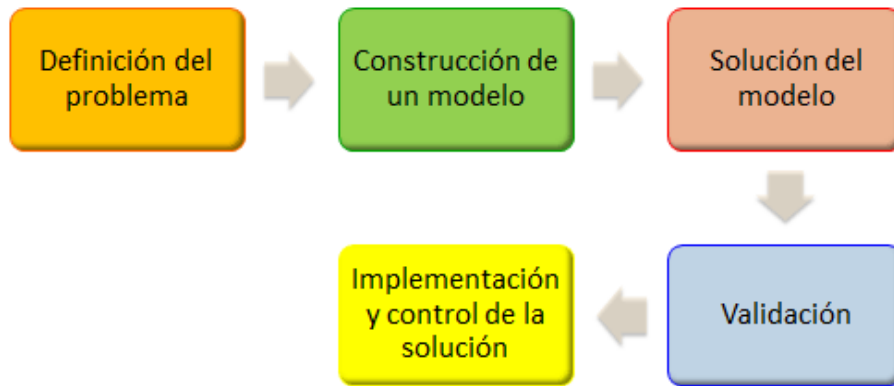


Fig. 3.1 Metodología de investigación de operaciones

3.2.1 Definición del problema

Para una mayor exactitud en la toma de decisiones debe identificarse primero el problema que afecta a la organización. Aterrizando todo esto en un marco teórico, delimitando alcances y objetivos, realizando el cuestionamiento de cuál sería la mejor solución y que método debe aplicar [34].

Una vez definido el problema, se debe proceder a recabar datos que interfieren en el problema planteado, identificando las variables, creando hipótesis para la solución del problema, concluyendo con la aplicación del modelo matemático para aplicar un método de optimización.

3.2.2 Construcción de un modelo matemático

Una vez definido el problema se debe formular un modelo matemático de acuerdo a las variables localizadas de cada problema, diseñando ecuaciones que permitan ver el panorama general del problema.

Un modelo siempre debe ser menos complejo que el problema real, es una aproximación abstracta de la realidad con consideraciones y simplificaciones que hacen más manejable el problema y permiten evaluar eficientemente las alternativas de solución [35].

Existe software que ya tienen diseñados las ecuaciones de acuerdo a los problemas a plantear. Únicamente se necesita saber utilizarlos y sobre todo desarrollarlos manualmente para verificar que estos paquetes son plenamente confiables.

3.2.3 Obtención de una solución a partir del modelo

Mediante la definición del problema se identifican las variables dependientes y para solucionarlo debe resolverse un modelo que consiste en encontrar los valores de las variables mejorando la eficiencia y la efectividad del sistema dentro del marco de referencias que fijan los objetivos y restricciones del problema [36, 37].

Los procedimientos de solución pueden ser clasificados de tres tipos:

Analíticos: que utilizan procesos de deducción matemáticas.

Numéricos: que son de carácter inductivo y funcionan en base de operaciones de prueba y error.

Simulación: que utiliza métodos que imitan o, emulan al sistema real, en base a un modelo.

Se dice que estos modelos son iterativos, ya que, buscan la solución en base a la repetición de la misma regla analítica hasta llegar a ella, o a alguna una aproximación.

3.2.4 Prueba del modelo

Para la validación del modelo matemático es empleado software de simulación que permita correr algoritmos de resolución mediante el uso de paquetes de software. Este software no es 100% confiable, mantienen un margen de error mínimo que no puede ser detectable [38].

Pero conforme se van desarrollando nuevas tecnologías computacionales estos errores se van minimizando. Este proceso de prueba y mejoramiento de un modelo para incrementar su validez se conoce como *validación del modelo*.

3.2.5 Establecimientos de controles de solución

Una vez verificada la solución se procede a su implementación. Esto da lugar a actualizaciones del modelo de optimización tanto en términos del modelo como el valor de los parámetros estimados. Por ejemplo, si el modelo de optimización corresponde a un Plan Maestro de la Producción (PMP) y se genera un cambio en el valor de la hora hombre de los trabajadores, será necesario actualizar el valor del parámetro que representa dicho costo para posteriores instancias de resolución [39, 40].

En la actualidad el uso de modelos de optimización es cada vez más frecuente en la toma de decisiones. Principalmente, en la inclusión de esta metodología en las diferentes disciplinas, la creciente complejidad de los problemas que se desea resolver, así como el desarrollo de nuevos algoritmos de solución.

3.3 Clasificación de los problemas de optimización

De acuerdo a su naturaleza, existen diversas formas de clasificar un problema de optimización. El analizar en qué categoría pertenece es importante para definir el método de solución a emplear, debido a que no hay un método único para todos los posibles problemas, Fig. 3.2 [41, 42].

La investigación de operaciones agrupa los métodos de solución en dos categorías básicas:

Problemas determinísticos: son aquellos en que la información necesaria se conoce para obtener una solución con certeza.

Problemas estocásticos: son aquellos en los que parte de la información necesaria no se conoce con certeza, lo que sí ocurre en el caso de los determinísticos, sino que más bien se comporta de una manera probabilística.

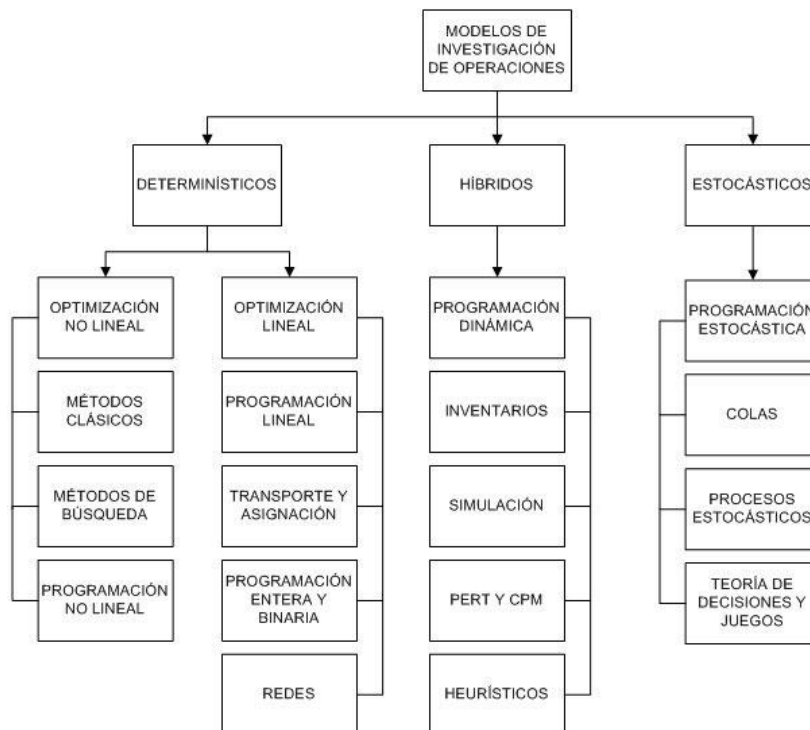


Fig. 3.2 Clasificación de los métodos de optimización

Debido a la distancia de Para la WSN propuesta se consideraron 30 nodos distribuidos a través de la red de distribución marcada con verde. Los nodos posee un módulo de comunicación Wi-Fi y se considera un sensor. Los nodos se encuentran divididos en dos grupos con comunicación hacia dos nodos coordinadores.

4.2 Módulo Wi-Fi

De acuerdo a la estructura de la red de distribución, se emplearon módulos de comunicación inalámbrica Wi-Fi. Se utilizó el módulo ESP8266 que es una Plataforma de Conectividad Inteligente Espressif Systems (ESCP) inalámbrica de alto rendimiento, proporciona la capacidad de implementar capacidades Wi-Fi dentro de otros sistemas. Las características del módulo ESP8266 se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Características del ESP8266

Características del ESP8266
Protocolo 802.11 b / g / n
Wi-Fi Direct (P2P), Soft-AP
Pila integrada de protocolos TCP / IP
Unidades de administración de energía
Potencia de salida en el modo 802.11b de +19.5dBm
Compactible con diversas antenas
CPU de baja potencia integrado CPU de 32 bits
SPI, UART
Alimentación de 3.3V
Wake-up y transmisión de paquetes <2 ms

El ESP8266 tiene capacidades de procesamiento y almacenamiento que permite la integración con sensores y otros dispositivos de aplicación específica a través de sus pines de propósito general (GPIOs). El Chip posee un alto grado de integración que incluye la antena balun interruptor, convertidores de administración de energía, se requiere un mínimo de circuito externo para toda la funcionalidad que ofrece el módulo, Fig. 4.2.

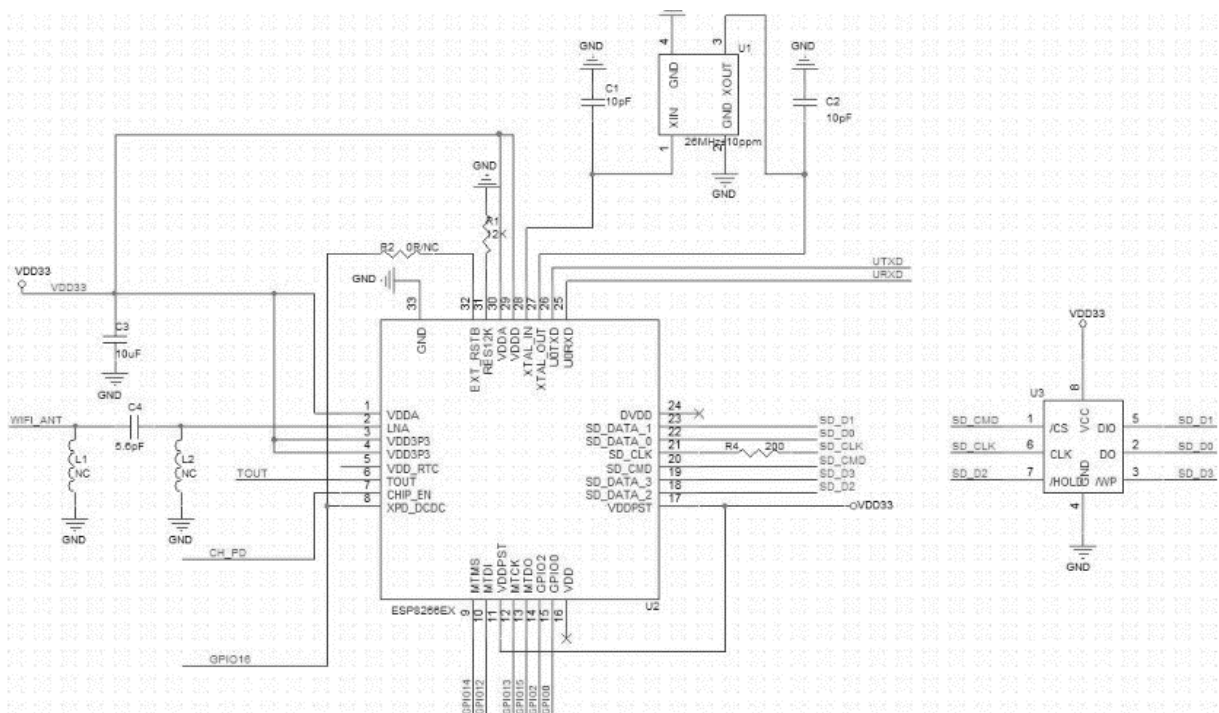


Fig. 4.2 Diagrama esquemático del ESP8266

El módulo ESP8266 posee 4 modos de administración de energía, DEEP_SLEEP, SLEEP, WAKEUP, ON_state, Fig. 4.3:

En el modo DEEP_SLEEP: Sólo RTC está encendido, el resto del chip está apagado. La recuperación de la memoria RTC puede mantener una conexión básica de Wi-Fi.

SLEEP: Sólo el RTC está funcionando. Los cristales osciladores están deshabilitados. Cualquier evento de activación como MAC, host, timer RTC, interrupciones externas) activan el chip en el Estado de WAKEUP.

WAKEUP: En este estado, el sistema entra del estado de reposos al estado de PWR. El cristal oscilador y los PLL están habilitados.

ON_state: el reloj de alta velocidad esta operado, el sistema está encendido.

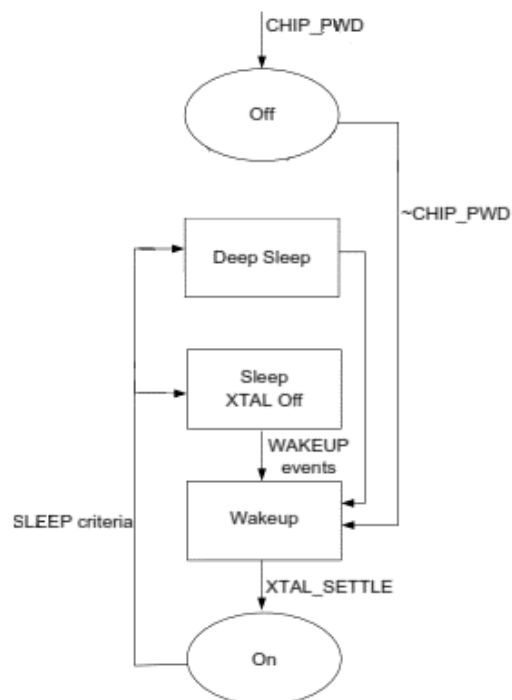


Fig. 4.3 Administración de energía de ESP8266

4.3 Diseño del nodo

Para el diseño de los nodos se empleó un microcontrolador de la empresa Microchip ®. El microcontrolador seleccionado es de 8 bits de la familia 18F2550. Posee cuatro modos de manejo de energía, RUN, Idle, Sleep y Watchdog Timer, Fig. 4.4.

28-Pin PDIP, SOIC

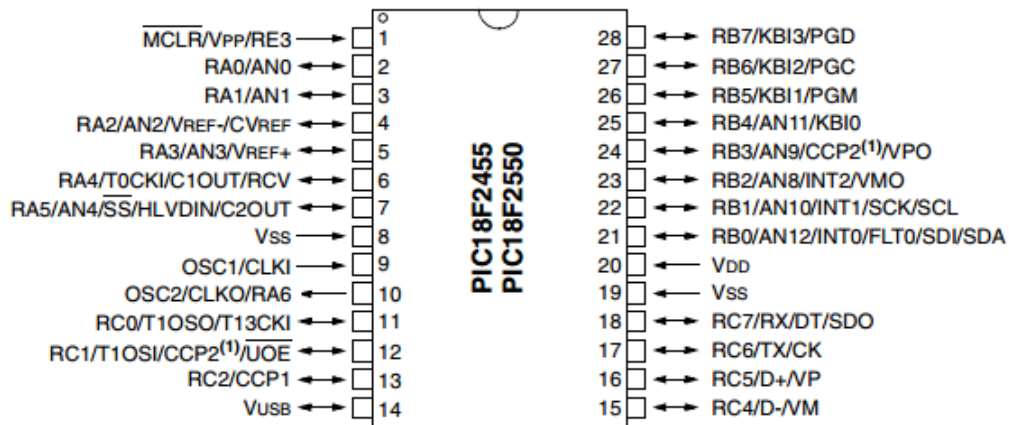


Fig. 4.4 PIC18F2550

Además permite la configuración de 4 modos de cristales, dos modos de cristal externo hasta 48MHz y un bloque de cristal interno con 8 frecuencias seleccionables desde 31KHz hasta 8MHz.

Posee un módulo convertidor analógico digital (Analog-to-Digital Converter, ADC) de 13 canales con resolución de 10 bits. Además, comparadores duales analógicos con entrada multiplexada.

Posee un módulo de comunicación Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (USART) y un módulo de Master Synchronous Serial Port (MSSP) que soporta comunicación Serial Peripheral Interface Bus (SPI) y comunicación Inter-Integrated Circuit (I2C).

4.3.1 Diseño del Firmware de los nodos

El Firmware que el nodo coordinador tendrá primero analizará en busca de los nodos sensores y si se inicializa el correcto nodo, se establecerá un enlace de conexión entre ellos, a continuación, si se tienen datos de los nodos sensores, se recogen los datos y los reenvía a la capa superior.

Cuando se envía toda la información por completo, se comprueba si hay nuevos datos, si no hay más datos, entra en el modo de reposo y espera hasta la siguiente interrupción que provenga de un nodo sensor.

Si no encuentra datos, puede existir el caso donde el enlace de conexión no se ha establecido correctamente, así que trata de encontrar el nodo y establecer la conexión, Fig. 4.5.

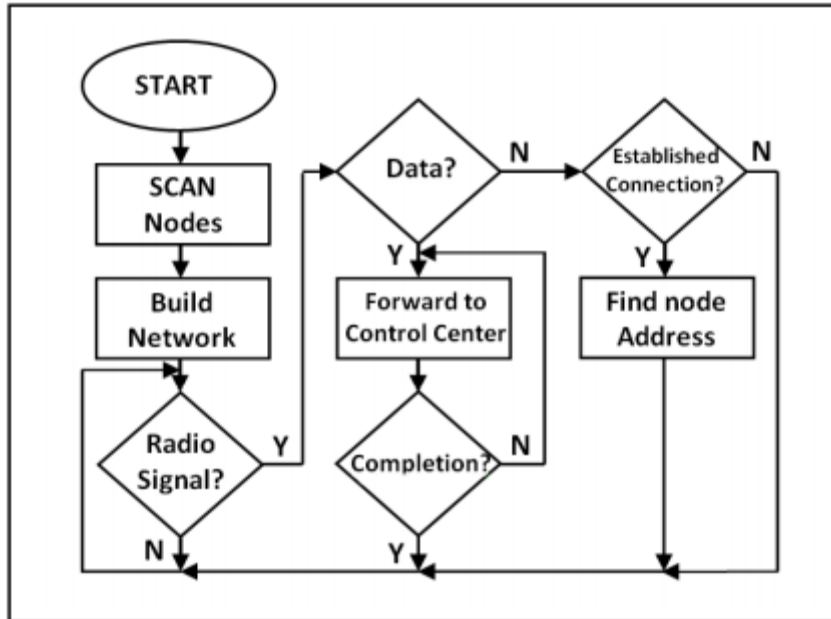


Fig. 4.5 Firmware del nodo coordinador

Posteriormente, el firmware del nodo sensor en el modo de arranque entra en modo de suspensión hasta una interrupción externa que lo despierte. Si no hay interrupción, se entra en modo de reposo de nuevo.

Después de 15 minutos, un temporizador en el MCU configurado, despierta al nodo y comprueba si hay nuevos datos y si se detecta cualquier dato, los recoge y luego transmite los datos procesados al coordinador. Entonces el sensor se pasa al modo de reposo y se apaga, Fig. 4.6.

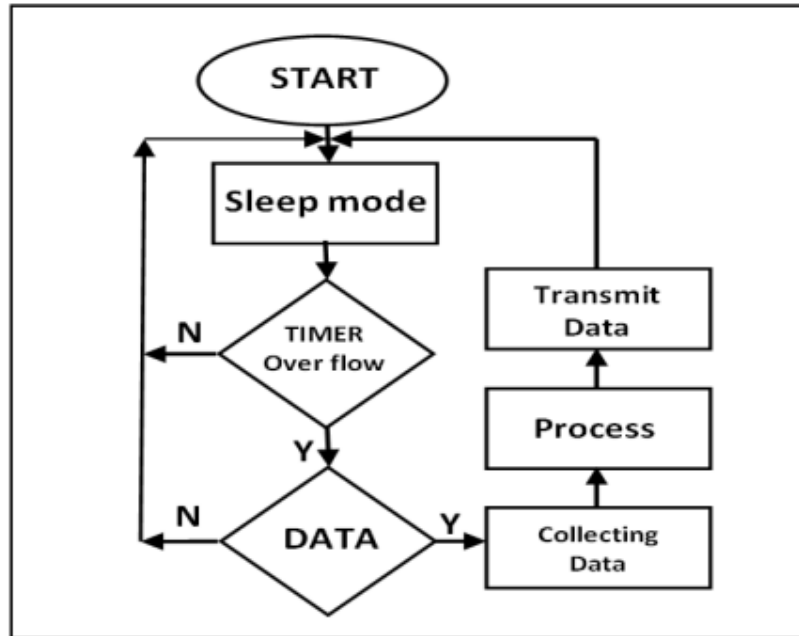


Fig. 4.6 Firmware del nodo sensor

4.4 Formulación del problema de optimización

Se considera una red de distribución de agua que se controla por dos niveles de nodos. El primer nivel consiste en los nodos sensores que se implementan densamente en red de distribución. Sus tareas son de detección, procesamiento de datos simple y la retransmisión a un conjunto de nodos.

Los nodos sensores de primer nivel formar una ruta de comunicación multi-hop hasta un nodo receptor. Tales dos niveles jerárquicos se desempeñan bien en términos de escalabilidad, el segundo nivel consiste en nodos coordinadores, que se despliegan en las uniones de las redes de distribución.

Uno nodo coordinador se implementa en cada unión. Ellos son responsables para la recopilación de datos, el almacenamiento de datos y la transmisión de datos a un centro de control remoto.

Teniendo en cuenta que la comunicación entre los nodos de sensores situados en diferentes subredes no es posible, tenemos en cuenta la activación problema por separado en cada subred. Por lo tanto, cada tubería la red puede ser representada por un gráfico de comunicación $G = (V, E)$, donde el conjunto de vértices V representa los nodos de la red, es decir, los nodos sensores N y un nodo receptor en cada extremo y el conjunto E representa los enlaces entre nodos.

Sea s_l el enlace del nodo más a la izquierda, s_r el enlace del nodo más a la derecha y v_1, v_2, \dots, v_N los nodos sensores de izquierda a derecha. Sea r_i el rango de transmisión del nodo v_i y $d(v_i, v_j)$ la distancia entre nodos v_i y v_j . Entonces, para cualquier par de nodos $v_i, v_j \in V, (v_i, v_j) \in E$ si y sólo si $d(v_i, v_j) \leq r_i$.

El tiempo está dividido y en cada división t , un nodo sensor se activa ya sea para detectar y transmitir los datos detectados o para entrar al modo sleep para ahorro de energía. Se asume que el volumen de los datos transmitidos es el mismo para cada nodo sensor. También, el consumo de energía, incluyendo detección y transmisión, de un nodo sensor es activado normalizado a una unidad de energía por intervalo de tiempo y 0 para el modo sleep. Cada nodo sensor se caracteriza por una reserva de energía E_i .

Sea $x_i(t)$ una variable binaria que denota si el nodo sensor i es activado en la ranura de tiempo t , $x_i(t)$ es 1 si el nodo sensor v_i está activo y 0 en caso contrario. Entonces, el vector $x(t) = [x_1(t), \dots, x_N(t)]^T$ es la programación de activación correspondiente a t . $VA(t)$ denota el conjunto de nodos de sensores a activar junto con los dos nodos receptores y $G(VA(t))$ el grafo inducido que contiene sólo los nodos en $VA(t)$.

La siguiente restricción de conectividad garantiza que los datos medidos por los nodos sensores activados pueden alcanzar centro de monitoreo. Los nodos activados en la división de tiempo t satisface la restricción de tiempo si y solo si el grafo inducido $G(VA(t))$ está conectado.

El sensor activado satisface la restricción de cardinalidad si y sólo si para el número de nodos sensores activados $M(t)$ tiene: $M(t) = x_i(t) \geq c k \log N M_{cs}$, donde c es una constante positiva y k es la escasez de datos.

En resumen, en cada ranura de tiempo, una programación de activación es factible si y sólo si tanto la restricción de conectividad y la restricción de cardinalidad están satisfechas. Entonces, supongamos que el consumo de energía de cada nodo sensor en cada intervalo de tiempo es 1 si se activa el nodo sensor y 0 si el nodo sensor está inactivo. Supongamos que en cada intervalo de tiempo, los nodos sensores activados satisfacen tanto la conectividad y la restricción de cardinalidad. Entonces, una cota superior de vida de la red es $T = \sum_i E_i / M_{cs}$.

Supongamos que el número de nodos de sensores que deben estar activados en el intervalo de tiempo t por $m(t)$, determinado por el número de nodos de sensores requeridos para la conectividad $M_c(t)$ y por el requisito de cardinalidad M_{cs} . Entonces, tenemos que $m \geq (t) \max \{M_c(t), M_{cs}\}$ tal que, tanto la restricción de la conectividad y la restricción de cardinalidad están satisfechos.

La relajación $m(t) \geq M_{cs}$ asegura que en cada intervalo de tiempo, por lo menos los nodos de sensores M_{cs} son activados. Esto conduce a una reducción de energía total de la red por MCS. A medida que la energía total de la red es $\sum_i E_i$, un límite superior de la vida de la red es $T = \sum_i E_i / M_{cs}$.

En cada intervalo de tiempo se busca reducir al mínimo el consumo de energía y equilibrar la energía residual de los nodos sensores. Dado que todos los nodos sensores son idénticos en términos de consumo de energía, se traduce en la activación de un número mínimo de nodos de sensores que puedan garantizar tanto la conectividad y el rendimiento de detección.

Sin embargo, dado el número de nodos de sensores que se active se tiene que encontrar un vector de activación que equilibre el residuo de energía de los nodos de sensores.

Sea $E_i(t)$ la energía residual del nodo sensor v_i en el intervalo de tiempo t . Entonces la energía residual normalizada es $p_i(t) = E_i(t) / e_i$, donde recordemos que E_i es la energía inicial del sensor de v_i nodo. Si un nodo sensor con energía residual menor de 1 no puede ser activado

Sea $V(t) = \{v_i \in V \mid E_i(t) \geq 1\}$ el conjunto de nodos de sensores que tiene suficiente energía residual para participar en la detección y transmisión de datos. Para equilibrar la energía, entre los nodos sensores, los de máxima energía residual normalizada tienen que ser activados. En consecuencia, se plantea el siguiente problema de optimización:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{x}} \quad & \sum_{i \in \mathcal{V}} x_i p_i & (1a) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i \in \mathcal{V}_A} x_i = \max\{M_{cs}, M_c\}, & (1b) \\ & G(\mathcal{V}_A) \text{ is connected,} & (1c) \\ & x_i \in \{0, 1\}, \forall i \in \mathcal{V}, & (1d) \end{aligned}$$

Donde M_c es el número mínimo de nodos sensores que deben ser activado para satisfacer la restricción de la conectividad y $M_{cs} = \log_{ck} N$ es un valor conocido. Para el problema de optimización se descarta el índice de tiempo t para facilidad del modelo.

Las variables de decisión del problema se recogen en el vector \mathbf{x} . Si la solución óptima es tal que, en el tiempo t que tenemos $x_i(t) = 1$, entonces el nodo sensor v_i se activa. De lo contrario, si $x_i(t) = 0$, no está activado.

El objetivo de Problema es activar el número mínimo posible de los nodos de sensores en cada intervalo de tiempo y la suma normalizada de la energía residual de estos nodos sensores debe ser tan grande como sea posible.

4.5 Algoritmo de ruteo

El algoritmo propuesto tiene que ser ejecutado en cada intervalo de tiempo para cada red de distribución. Para simplificar la notación, se toma una red específica y una división de tiempo específica.

Se denota el conjunto de vecinos del nodo v_i por $N(v_i) = \{v_j | (v_i, v_j) \in E\}$, el conjunto de vecinos ascendente (UNS) de v_i por $N^+(v_i) = \{v_j | v_j \in N(v_i) \wedge j < i\}$ y el conjunto de vecinos descendente (DNS) del v_i por $N^-(v_i) = \{v_j | v_j \in N(v_i) \wedge j > i\}$.

El algoritmo propuesto se compone de dos subrutinas. En primer lugar, el número mínimo de nodos sensor M_c que garantiza la conectividad y una programación dinámica que determina los nodos sensores para ser activados.

Las dos subrutinas se describen en detalle en las siguientes subsecciones:

Primero se calcula el número mínimo de nodos sensores para ser activados. El número óptimo de nodos sensores para la activación se determina por M_c , el número mínimo de nodos sensores que garantiza la conectividad.

Para calcular M_c , proponemos la búsqueda basada en codicioso Greedy-based search (GBS), en cada iteración, el más alejado nodo v_i que pertenece a la DNS del nodo actual v_k . Si en cualquier iteración, el DNS de nodo actual está vacía, la red se desconecta y el algoritmo GBS vuelve a $+\infty$. Esto indica que no es factible encontrar una solución y la red ha expirado, Algoritmo 1.

Algorithm 1. Greedy-based search (GBS) algorithm

Input: The adjacency matrix of nodes A .

Output: Minimum number of sensor nodes that ensures connectivity M_c .

```

1: Set  $M_c \leftarrow 0, k \leftarrow 0, v_0 \leftarrow s_l$ .
2: while  $s_r \notin \mathcal{N}_-(v_k)$  do
3:   if  $\mathcal{N}_-(v_k) \neq \emptyset$  then
4:      $k \leftarrow \max\{i : v_i \in \mathcal{N}_-(v_k)\}, M_c \leftarrow M_c + 1$ 
5:   else
6:      $M_c \leftarrow +\infty$  // No feasible solution
7:   return  $M_c$ 
8:   end if
9: end while
10: return  $M_c$ 

```

La segunda parte consiste en encontrar el subconjunto máximo de nodos conectados: Se plantea este problema como un ejemplo de programación dinámica. Se supone que en un determinado estado, v_i ha sido seleccionado para ser activado y k nodos adicionales han sido activados fuera de v_{i+1} a V_N tal que el sensor k seleccionado y v_i están conectados.

Sea $g(v_i, k)$ el volumen total máximo de la energía residual de todos los posibles subconjuntos de k nodos activados. Entonces:

$$g(v_i, k) = \begin{cases} \max_{v_j \in \mathcal{N}'_-(v_i)} \{g(v_j, k-1) + p_j\} & \text{if } \mathcal{N}'_-(v_i) \neq \emptyset, \\ -\infty & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2)$$

Donde p_j es la energía residual normalizada del nodo v_j y $\mathcal{N}'_-(v_i) = \mathcal{N}_-(v_i) \setminus \{s_r\}$ es el conjunto de nodos en el DNS de v_i excepto por el nodo receptor s_r .

Para $k = 1$, el nodo seleccionado tiene que ser un vecino del nodo s_r receptor. En consecuencia, para cualquier nodo $v \in V$ se establece que:

$$g(v_i, 0) = \begin{cases} 0 & \text{if } s_r \in \mathcal{N}_-(v_i), \\ -\infty & \text{otherwise .} \end{cases} \quad (3)$$

Basado en función recursiva definida por (2) y (3), se propone el algoritmo 2. Donde $A(N+2) \times (N+2)$ es la matriz de adyacencia de la red con $a_{ij} = 1$ si y sólo si v_i y v_j están conectados. El vector $p = [p_1, p_2, \dots, p_N]^T$ captura la energía residual normalizada de los nodos sensores

Algorithm 2. Sensor node activation on edge (SAE) algorithm

Input: A , p and the number of sensor nodes m to be activated.

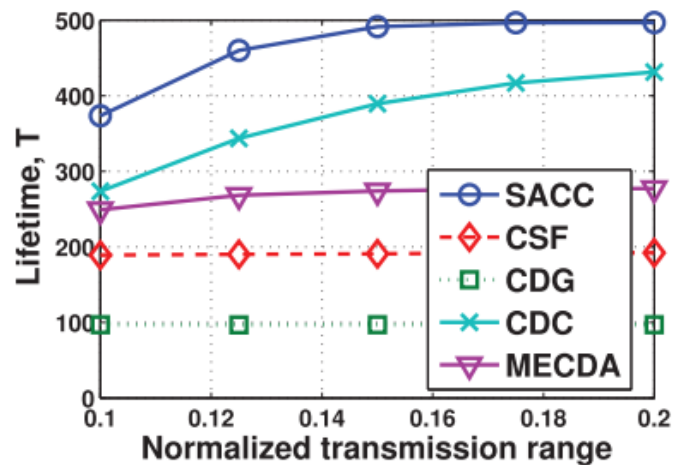
Output: The set of sensor nodes \mathcal{V}_A to be activated.

- 1: Construct a matrix $\mathbf{G} = \{g_{ij}\}$ of size $(N + 1) \times (m + 1)$, where all its elements are set to $-\infty$ initially.
 - 2: Construct a node matrix $\mathbf{H} = \{h_{ij}\}$ of size $(N + 1) \times (m + 1)$ where all its elements are set to -1 initially.
 - 3: **for** $\forall v_k : s_r \in \mathcal{N}_-(v_k)$ **do**
 - 4: $g(v_k, 0) = 0$ and set $g_{k1} = g(v_k, 0)$
 - 5: $h_{k1} = N + 1$
 - 6: **end for**
 - 7: **for** $i = 2$ to m **do**
 - 8: **for** $k = N$ to m **do**
 - 9: $g_{ki} \leftarrow \max_{j:v_k \in \mathcal{N}_-(v_j)} \{g_{j(i-1)} + p_k\}$
 - 10: $h_{ki} \leftarrow \operatorname{argmax}_{j:v_k \in \mathcal{N}_-(v_j)} \{g_{j(i-1)} + p_k\}$
 - 11: **end for**
 - 12: **end for**
 - 13: $g_{1(m+1)} \leftarrow \max_{v_j \in \mathcal{N}_-(s_l)} \{g_{jm}\}$
 - 14: $h_{1(m+1)} \leftarrow \operatorname{argmax}_{v_j \in \mathcal{N}_-(s_l)} \{g_{jm}\}$
 - 15: $c \leftarrow 1$
 - 16: Construct a set $\mathcal{S} = \emptyset$ whose elements are the subscripts of the sensor nodes that need to be activated.
 - 17: **for** $k = m + 1$ to 2 **do**
 - 18: $\mathcal{S} = \mathcal{S} \cup \{h_{ck}\}$
 - 19: $k \leftarrow h_{ck}$
 - 20: **end for**
 - 21: $\mathcal{V}_A = \{v_i | i \in \mathcal{S}\}$
 - 22: **return** \mathcal{V}_A
-

Dado que el problema de la red puede ser descompuesto a problemas independientes por subredes, se consideró una sola subred. Dos nodos coordinadores están desplegados en los puntos finales de la subred.

En la inicialización de la simulación el sensor N nodos son i.i.d. uniformemente distribuidos en la subred dentro de $(0, 1)$ y todos los nodos se caracterizan por el mismo radio de transmisión. En primer lugar, se compara el rendimiento de la red con el algoritmo propuesto y del algoritmo de la red sin optimizar usando el algoritmo MECDA. Consideramos un escenario de $N = 100$ nodos uniformemente desplegados en la subred. El número mínimo de nodos de sensores activos está dispuesto a ser $M_{cs} = 20$.

Para la simulación se empleó el software MATLAB® donde se escribieron dos archivos .m con el algoritmo propuesto y el algoritmo MECDA para realizar una comparativa de ejecución



Esto demuestra que la vida de la red es más larga mediante el algoritmo propuesto que el tiempo de vida de la red logrado por el algoritmo MECDA. Esto demuestra los beneficios de poner nodos sensores en el modo sleep. Por otro lado, el algoritmo MECDA tiene por objeto hallar la ruta con el consumo de energía más pequeño de cada intervalo de tiempo.

Por lo tanto, los nodos sensores en el consumo de energía más pequeña el camino siempre será activo hasta que uno de los nodos expire y por lo tanto la energía residual de los nodos se vuelve extremadamente desequilibrada.

Es muy probable que se desconecta la red, ya que algunos nodos críticos expirarán a pesar de que el resto de los nodos de sensores tiene abundante energía residual. En consecuencia, la vida de la red alcanza por el algoritmo de MECDA es menor que el tiempo de vida alcanzados por el algoritmo propuesto.

La utilización de un método de optimización permitió maximizar el tiempo de vida de la WSN considerando los tiempos de operación, transmisión de los nodos y así cumplir con los objetivos establecidos del presente trabajo de tesis.

4.6 Diseño del software

Para el diseño del software se opto por utilizar el entorno de desarrollo integrado (integrated development environment IDE) Microsoft Visual Studio®. Microsoft Visual Studio es un IDE para sistemas operativos Windows.

Además permite trabajar con múltiples lenguajes de programación tales como C++, C#, Visual Basic .NET, F#, Java, Python, Ruby, PHP; al igual que entornos de desarrollo web como ASP.NET MVC, Django, entre otros. Visual Studio permite crear sitios y aplicaciones web, así como servicios web en cualquier entorno que soporte la plataforma .NET. Lo que permite crear aplicaciones que se comuniquen entre estaciones de trabajo, páginas web, dispositivos móviles, sistemas embebidos, consolas, etc.

Se seleccionó C Sharp (C#) como lenguaje de programación debido a que es orientado a objetos, además es desarrollado y estandarizado por Microsoft como parte de su plataforma .NET, y se encuentra aprobado como un estándar por la ECMA (ECMA-334) e ISO (ISO/IEC 23270).

El lenguaje C# posee su sintaxis básica derivada de C/C++ y utiliza el modelo de objetos de la plataforma .NET, similar al de Java, aunque incluye mejoras derivadas de otros lenguajes. Aunque C# forma parte de la plataforma .NET, ésta es una API, mientras que C# es un lenguaje de programación independiente diseñado para generar programas sobre dicha plataforma.

Para el desarrollo del software se utilizó la rquitectura Modelo-Vista-Controlador (MVC), el cual es un patrón de arquitectura de software que separa los datos de la lógica de negocio de una aplicación de interfaz de usuario y el módulo encargado de gestionar los eventos y las comunicaciones.

El MVC propone la construcción de tres componentes distintos, el modelo, la vista y el controlador, es decir, por un lado define los componenetes para la representación de la información, por otro lado para la interacción con el usuario.

Este patrón de arquitectura de software se basa en las ideas de reutilización de código y la separación de conceptos, características que buscan facilitar la tarea de desarrollo de aplicaciones y su posterior mantenimiento, Fig. 4.7



Fig. 4.7 Modelo-Vista-Controlador

El Modelo: Es la representación de la información con la cual el sistema opera, por lo tanto gestiona todos los accesos a dicha información, tanto consultas como actualizaciones, implementando también los privilegios de acceso que se hayan descrito en las especificaciones de la aplicación.

Envía a la Vista aquella parte de la información que en cada momento se le solicita para que sea mostrada a un usuario. Las peticiones de acceso o manipulación de información llegan al Modelo a través del Controlador.

El Controlador: Responde a eventos y/o acciones del usuario e invoca peticiones al Modelo cuando se hace alguna solicitud sobre la información por ejemplo, editar un documento o un registro en una base de datos. También puede enviar comandos a su Vista asociada si se solicita un cambio en la forma en que se presenta el Modelo por ejemplo, desplazamiento o scroll por un documento o por los diferentes registros de una base de datos, por tanto se podría decir que el Controlador hace de intermediario entre la Vista y el Modelo.

La Vista: Presenta el Modelo en un formato adecuado para interactuar usualmente se trata de la interfaz de usuario por tanto requiere de dicho Modelo la información que debe representar como salida.

El software desarrollado permite visualizar el estado de cada nodo así como el de la red, debido a que la red es fija los nodos son distribuidos y fijados en posiciones a lo largo de la red, Fig 4.8

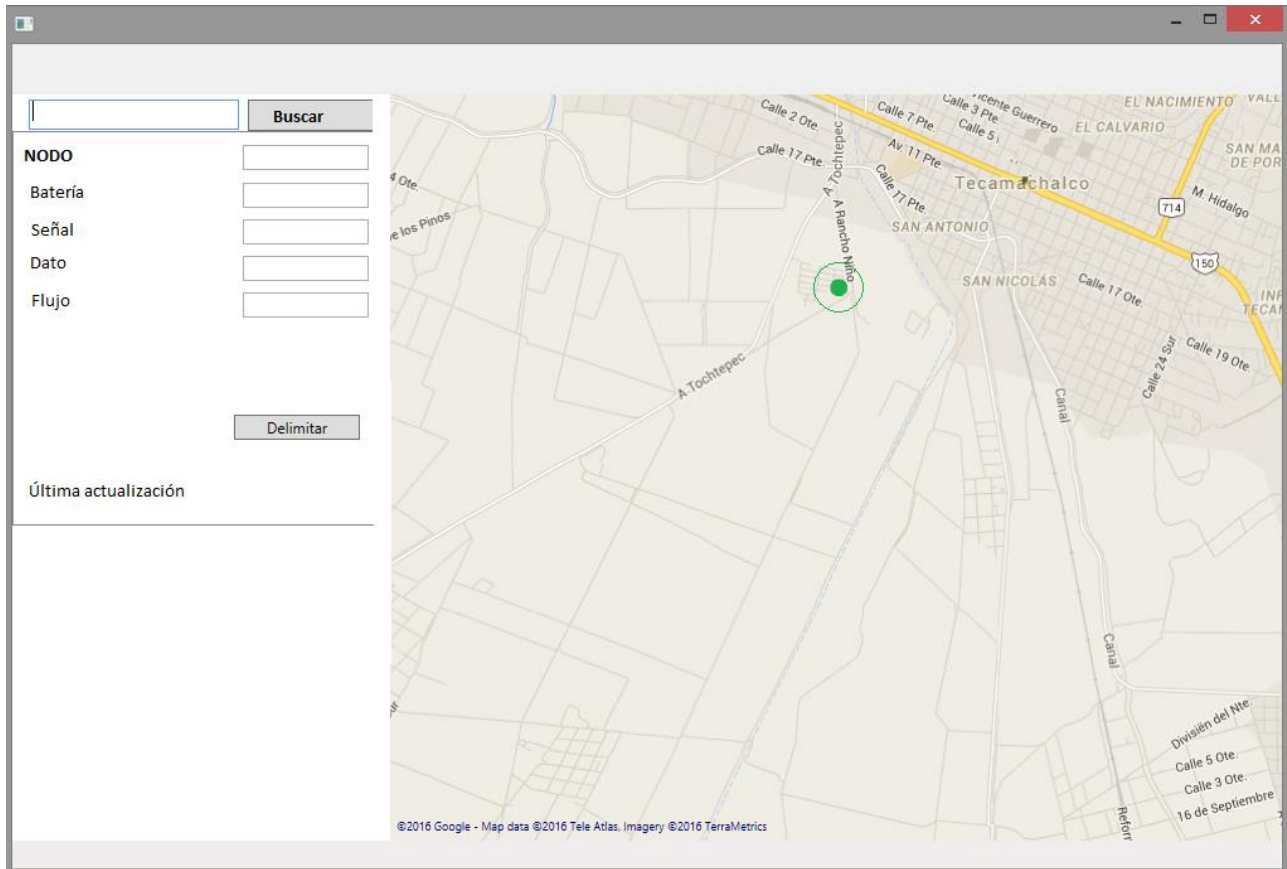


Fig. 4.8 Software para el monitoreo de la WSN

Conclusiones

El presente trabajo de Tesis consistió en el diseño y optimización de una red inalámbrica de sensores para una red de distribución de agua del Municipio de Tecamachalco. Se desarrolló una metodología que permite aplicar métodos de optimización a diversos problemas.

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizó un microcontrolador de 8 bits de la empresa Microchip de la familia 18 que se empleó en el diseño de un prototipo de un nodo de la red inalámbrica de sensores que podrá ser replicado debido al diseño que se utilizó. Además se empleó un módulo de comunicación inalámbrica mediante la tecnología Wi-Fi lo que permitirá aprovechar el sistema embebido para múltiples aplicaciones que requieran de comunicación inalámbrica.

El desarrollo del proyecto permitió establecer una metodología, basada en mejorar la vida de la red inalámbrica de sensores aprovechando los recursos que provee el fabricante del microcontrolador así como también la utilización de un algoritmo que permite manipular los tiempos de operación para así reducir el consumo de energía de los nodos y maximizar la vida de la red.

Se obtuvo mediante la simulación que el algoritmo propuesto permitió maximizar la vida de la red mediante el manejo de tiempos para minimizar el consumo de energía de los nodos de la red inalámbrica.

El diseño de la red permitirá ser escalado para los requerimientos de múltiples aplicaciones en diversas áreas que requieran del censo y monitoreo de diversos parámetros. Además, el diseño del sistema embebido permite que sea replicado a múltiples nodos de acuerdo a las necesidades de la red. El software diseñado enfocado al sistema de riego agrícola del municipio de Tecamachalco, que permite el monitoreo de la red inalámbrica de sensores y conocer paquetes de información de cada nodo.

Referencias

- [1] Bagherinia, A.; TafkikiAlamdari, S.; Daneshyar, B.; Bemana, A., "A novel approach for query optimization in sensor networks," *Electronic Computer Technology (ICECT), 2010 International Conference on*, vol., no., pp.107, 111, 7-10 May 2010.
- [2] Terai, K.; Anzai, D.; Yanagihara, K.; Hara, S., "A Distant Multipath Routing Method for Reliable Wireless Multi-Hop Data Transmission," *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011 IEEE*, vol., no., pp.1, 5, 5-8 Sept. 2011.
- [3] Wichmann, A.; Korkmaz, T.; Tosun, A.S., "Minimum hop and/or minimum distance robot movement with connectivity constraints in WSRNs," *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2014 IEEE*, vol., no., pp.523, 529, 8-12 Dec. 2014.
- [4] Monteiro Santos, I.; Cugnasca, C.E., "Adaptive Strategies for Dynamic Setting of the Data Register Frequency in Wireless Sensor Networks," *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, vol.12, no.7, pp.1284, 1291, Oct. 2014.
- [5] Sobral, J.V.V.; Rabelo, R.A.L.; Araujo, H.S.; Baluz, R.A.R.S.; Holanda Filho, R., "Automated design of fuzzy rule base using ant colony optimization for improving the performance in Wireless Sensor Networks," *Fuzzy Systems (FUZZ), 2013 IEEE International Conference on*, vol., no., pp.1, 8, 7-10 July 2013.
- [6] Dutta, T., "Medical Data Compression and Transmission in Wireless Ad Hoc Networks," *Sensors Journal, IEEE*, vol.15, no.2, pp.778, 786, Feb. 2015.

-
- [7] Monshi, M.M.; Mohammed, O.A., "A study on the efficient wireless sensor networks for operation monitoring and control in smart grid applications," in Southeastcon, 2013 Proceedings of IEEE, vol., no., pp.1-5, 4-7 April 2013.
- [8] Essaddi, N.; Hamdi, M.; Habib, S.; Boudriga, N., "Optimizing area coverage in Wireless Sensor Networks," in Computer Systems and Applications (AICCSA), 2010 IEEE/ACS International Conference on, vol., no., pp.1-6, 16-19 May 2010.
- [9] Kumar, P.; Porambage, P.; Ylianttila, M.; Gurtov, A., "A Mobile Object-Based Secret Key Distribution Scheme for Wireless Sensor Networks," in Ubiquitous Intelligence and Computing, 2013 IEEE 10th International Conference on and 10th International Conference on Autonomic and Trusted Computing (UIC/ATC), vol., no., pp.656-661, 18-21 Dec. 2013.
- [10] Shabani, H.; Ahmed, M.M.; Khan, S.; Hameed, S.A.; Habaebi, M.H., "Smart Zigbee/IEEE 802.15.4 MAC for wireless sensor multi-hop mesh networks," in Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2013 IEEE 7th International, vol., no., pp.282-287, 3-4 June 2013.
- [11] Qing Yan Xie; Yizong Cheng, "K-Centers Mean-shift Reverse Mean-shift clustering algorithm over heterogeneous wireless sensor networks," in Wireless Telecommunications Symposium (WTS), 2014, vol., no., pp.1-6, 9-11 April 2014.
- [12] Burd, R., "Application of network optimisation tools to real time control of water distribution networks," in Water Event, 2005. The 2005 IEE (Ref. No. 2005-11083), vol., no., pp.89-92, 23-24 Nov. 2005.

- [13] Erfu Yang; Barton, N.H.; Arslan, T.; Erdogan, A.T., "A novel shifting balance theory-based approach to optimization of an energy-constrained modulation scheme for wireless sensor networks," in *Evolutionary Computation, 2008. CEC 2008. (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*. IEEE Congress on, vol., no., pp.2749-2756, 1-6 June 2008.
- [14] Bhatte, S.; Majlesein, H.; Zhengmao Ye; Mohamadian, H., "Development of novel wireless sensor networks and potential optimization via Kalman filtering," in *Industrial Electronics and Applications, 2009. ICIEA 2009. 4th IEEE Conference on*, vol., no., pp.3983-3988, 25-27 May 2009
- [15] Wang Yitong; Shi Yunbo; Yu Xiaoyu, "Design of Multi-parameter Wireless Sensor Network Monitoring System in Precision Agriculture," in *Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2014 Fourth International Conference on*, vol., no., pp.721-725, 18-20 Sept. 2014.
- [16] Herbert, S.; Tian-Hong Loh; Wassell, I., "Assessment of a low-profile planar antenna for a wireless sensor network monitoring the local water distribution network," in *Wireless Sensor Systems, IET*, vol.4, no.4, pp.191-195, 12 2014.
- [17] Bahi, J.M.; Haddad, M.; Hakem, M.; Kheddouci, H., "Distributed Lifetime Optimization in Wireless Sensor Networks," in *High Performance Computing and Communications (HPCC), 2011 IEEE 13th International Conference on*, vol., no., pp.432-439, 2-4 Sept. 2011.
- [18] Qi Wang; Granelli, F., "An improved routing algorithm for wireless path selection for the smart grid distribution network," in *Energy Conference (ENERGYCON), 2014 IEEE International*, vol., no., pp.800-804, 13-16 May 2014.
- [19] Jialiang Lv; Huanqing Cui; Ming Yang, "Distribute localization for wireless sensor networks using particle swarm optimization," in *Software Engineering and Service Science (ICSESS), 2012 IEEE 3rd International Conference on*, vol., no., pp.355-358, 22-24 June 2012.

- [20] Saleem, K.; Faisal, N., "Enhanced Ant Colony algorithm for self-optimized data assured routing in wireless sensor networks," in Networks (ICON), 2012 18th IEEE International Conference on, vol., no., pp.422-427, 12-14 Dec. 2012.
- [21]. Mahfoudh, Saoucene, and Pascale Minet. "Energy-aware routing in wireless ad hoc and sensor networks." Proceedings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. ACM, 2010.
- [22] Ye, Wei, John Heidemann, and Deborah Estrin. "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks." INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE. Vol. 3. IEEE, 2002.
- [23] Khajuria, R.; Gupta, S., "Energy optimization and lifetime enhancement techniques in wireless sensor networks: A survey," in Computing, Communication & Automation (ICCCA), 2015 International Conference on, vol., no., pp.396-402, 15-16 May 2015.
- [24] T. T. T. Zan, H. B. Lim, K. J. Wong, A. J. Whittle and B. S. Lee, "Event Detection and Localization in Urban Water Distribution Network," in IEEE Sensors Journal, vol. 14, no. 12, pp. 4134-4142, Dec. 2014.
- [25] B. Aghaei, "Using wireless sensor network in water, electricity and gas industry," Electronics Computer Technology (ICECT), 2011 3rd International Conference on, Kanyakumari, 2011, pp. 14-17.
- [26] G. Ali, Abdul Wahid Shaikh, Aqeel-ur-Rehman and Z. A. Shaikh, "A framework for development of cost-effective irrigation control system based on Wireless Sensor and Actuator Network (WSAN) for efficient water management," Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE), 2010 2nd International Conference on, Kyoto, 2010, pp. V2-378-V2-381.

- [27] J. Wang, X. I. Ren, Y. I. Shen and S. y. Liu, "A Remote Wireless Sensor Networks for Water Quality Monitoring," Innovative Computing & Communication, 2010 Intl Conf on and Information Technology & Ocean Engineering, 2010 Asia-Pacific Conf on (CICC-ITOE), Macao, 2010, pp. 7-12. doi: 10.1109/CICC-ITOE.2010.9
- [28] N. Nasser, A. Ali, L. Karim and S. Belhaouari, "An efficient Wireless Sensor Network-based water quality monitoring system," Computer Systems and Applications (AICCSA), 2013 ACS International Conference on, Ifrane, 2013, pp. 1-4.
- [29] M. JayaLakshmi and V. Gomathi, "An enhanced underground pipeline water leakage monitoring and detection system using Wireless sensor network," Soft-Computing and Networks Security (ICSNS), 2015 International Conference on, Coimbatore, 2015, pp. 1-6.
- [30] A. Zabasta, K. Kondratjevs, N. Kunicina and L. Ribickis, "Wireless sensor networks based control system development for water supply infrastructure," Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS-SWS), 2014 2nd International Symposium on, Offenburg, 2014, pp. 42-47.
- [31] R. Aminzadeh, F. Kashefi and H. Alee, "Hydraulic pressure distribution for pipeline networks by wireless sensor networks," Applied Electromagnetics (APACE), 2010 IEEE Asia-Pacific Conference on, Port Dickson, 2010, pp. 1-5.
- [32] R. Du, L. Gkatzikis, C. Fischione and M. Xiao, "Energy Efficient Sensor Activation for Water Distribution Networks Based on Compressive Sensing," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 33, no. 12, pp. 2997-3010, Dec. 2015.
- [33] A. M. Hassan, "Web-based irrigation management for open canals using Wireless Sensor Networks," Wireless Sensor (ICWISE), 2013 IEEE Conference on, Kuching, 2013, pp. 102-107.

- [34] M. I. Mohamed, W. Y. Wu and M. Moniri, "Power harvesting for smart sensor networks in monitoring water distribution system," Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2011 IEEE International Conference on, Delft, 2011, pp. 393-398.
- [35] S. Herbert, T. H. Loh and I. Wassell, "Assessment of a low-profile planar antenna for a wireless sensor network monitoring the local water distribution network," in IET Wireless Sensor Systems, vol. 4, no. 4, pp. 191-195, 12 2014.
- [36] M. Allen, A. Preis, M. Iqbal and A. J. Whittle, "Water Distribution System Monitoring and Decision Support Using a Wireless Sensor Network," Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD), 2013 14th ACIS International Conference on, Honolulu, HI, 2013, pp. 641-646.
- [37] K. Kondratjevs, A. Zabasta, N. Kunicina and L. Ribickis, "Development of pseudo autonomous wireless sensor monitoring system for water distribution network," 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, 2014, pp. 1454-1458.
- [38] Min Lin, Yan Wu and I. Wassell, "Wireless sensor network: Water distribution monitoring system," 2008 IEEE Radio and Wireless Symposium, Orlando, FL, 2008, pp. 775-778.
- [39] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>
- [40] M. Dhanaraj, B. S. Manoj and C. S. R. Murthy, "A New Energy Efficient Protocol for Minimizing Multi-Hop Latency in Wireless Sensor Networks," Third IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, Kauai Island, HI, 2005, pp. 117-126.
- [41] [https://es.wikipedia.org/wiki/Optimizaci%C3%B3n_\(matem%C3%A1tica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Optimizaci%C3%B3n_(matem%C3%A1tica))
- [42] <http://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el/investigacin-de-operaciones/>

[43] https://es.wikipedia.org/wiki/Investigaci%C3%B3n_de_operaciones

[44] M. Farukh Munir, A. A. Kherani and F. Filali, "Distributed algorithm for minimizing delay in multi-hop wireless sensor networks," Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks, 2009. WiOPT 2009. 7th International Symposium on, Seoul, 2009, pp. 1-9.

[45] E. C. H. Ngai, J. Liu and M. R. Lyu, "An Adaptive Delay-Minimized Route Design for Wireless Sensor-Actuator Networks," 2007 IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, Pisa, 2007, pp. 1-9.