

# UACM

Universidad Autónoma  
de la Ciudad de México

---

*Nada humano me es ajeno*

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS  
ELECTRÓNICOS Y DE TELECOMUNICACIONES

**Sistema inalámbrico para controlar vía remota la captación y filtrado del  
agua de lluvia para uso doméstico**

TRABAJO RECEPCIONAL  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN  
INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS  
Y DE TELECOMUNICACIONES

PRESENTA  
**ALFREDO LÓPEZ ARROYO**

DIRECTOR  
**Mtro. José Ernesto Rojas Lima**

Ciudad de México, mayo de 2018

## SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



## UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

### RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

#### DERECHOS RESERVADOS ©

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.



## **AGRADECIMIENTOS**

- A mi esposa Laura Alicia Avalos Gorocica que tanto amo, por brindarme siempre su apoyo y guiarme con su ejemplo a lo largo de este proceso.
- A mis hijos Fernanda D. López Avalos, Christian A. López Avalos y Erick G. López Avalos, por ser la fuerza que me impulsa cada día.
- A mis padres Guadalupe Franco Arroyo y Roberto López Huidobro, por motivarme siempre a concluir mis metas, apoyarme económicamente en los momentos difíciles, pero sobre todo por estar al lado de mi familia cuando por trabajo he tenido que ausentarme.
- A mis hermanos Roberto López Arroyo y Beatriz A. López Arroyo, por ser siempre un ejemplo para mí.
- A mi director de tesis el Mtro. José Ernesto Rojas Lima, por dedicar gran parte de su tiempo y conocimiento al desarrollo de este proyecto.
- A mis lectores Mtro. Jaime Pedro Abarca Reyna, Dr. Alberto Rosales, Lic. Fernando Cruz Martínez y Lic. Hector Alonso Amenyro Aguilar, por brindarme sus acertados comentarios para incrementar la calidad de este trabajo.
- A la Universidad Autónoma de la Ciudad de México por abrirme las puertas y ofrecerme la oportunidad de desarrollarme académicamente, pero más aún le agradezco por confiarme la honorable tarea de representarla con orgullo ante la sociedad.
- Finalmente agradezco a la Universidad Autónoma de la Ciudad de México por haberme otorgado el apoyo para impresión y empastado de mi trabajo recepcional.



# Sistema inalámbrico para controlar vía remota la captación y filtrado de agua de lluvia para uso doméstico

CONTENIDO.....	I
OBJETIVO.....	II
JUSTIFICACIÓN .....	III
DESARROLLO.....	IV
LISTA DE FIGURAS .....	V
LISTA DE TABLAS.....	VI
SIGLAS Y ACRÓNIMOS .....	VII
OBJETIVOS .....	VIII
VIII.I OBJETIVO GENERAL.....	13
VIII.II OBJETIVOS PARTICULARES .....	13
JUSTIFICACIÓN .....	IX
INTRODUCCIÓN .....	X
Capítulo 1. Captación de agua a nivel mundial y nacional .....	19
1.1 La escasez de agua en la Ciudad de México.....	19
1.2 Principales fuentes de abastecimiento de agua potable para la Ciudad de México.....	20
1.3 Papel actual de la precipitación pluvial en la ciudad de México .....	24
1.4 La captación de agua de lluvia, como posible solución al problema de la escasez de agua potable .....	26
1.5 La captación de agua de lluvia, una solución a nivel mundial.....	28
Capítulo 2. Elementos que constituyen un sistema de filtrado de agua .....	33
2.2 Enfermedades relacionadas con el agua .....	35
2.2.1 Mala calidad del agua .....	35
2.2.2 Por escasez de agua .....	36
2.3 Métodos de filtrado de agua.....	39
2.4 Normatividad existente para garantizar la calidad del agua potable .....	43
2.5 Principales agentes que merman la calidad del agua .....	44
2.6 Proyectos similares que operan en la actualidad.....	46
2.7 Propuesta del sistema de investigación .....	50

Capítulo 3. Características del estándar IEEE 802.11 .....	55
3.1 Introducción a las Redes de Área local (LAN).....	55
3.1.1 Arquitectura LAN y protocolos.....	56
3.1.2 Topologías .....	57
3.2 Redes de Área Local Inalámbricas (WLAN).....	59
3.2.1 Evolución de las WLAN.....	61
3.2.2 Perturbaciones en la Transmisión.....	63
3.2.3 Topologías WLAN .....	68
3.2.5 WiFi: redes LAN inalámbricas 802.11 .....	68
3.2.6 La arquitectura 802.11 .....	73
3.2.7 Canales y asociación de 802.11 .....	75
3.2.8 El protocolo MAC 802.11 .....	76
3.2.9 Enfrentándose al problema de los terminales ocultos: RTS y CTS.....	78
3.2.10 La trama IEEE 802.11 .....	79
3.2.13 Más allá de 802.11: Bluetooth y WiMAX .....	82
Capítulo 4. Desarrollo e implementación del prototipo de captación y filtrado de agua de lluvia controlado inalámbricamente. ....	87
4.1 Seleccionando el sistema mínimo.....	90
4.2 Armado del teclado analógico.....	95
4.3 Etapa de alta potencia .....	97
4.4 Programación de Arduino para la construcción del prototipo.....	102
4.5 Módulo ESP8266 .....	103
4.6 Modelo de pérdida de trayectoria UIT-R 1238 .....	106
4.7 Cálculo del presupuesto de potencias .....	108
4.8 Evaluación del prototipo.....	117
4.9 Presupuesto.....	120
Conclusiones.....	123
Anexo A.....	125
Bibliografía .....	133

## Lista de figuras

Fig.1. Metodología del proyecto .....	18
Fig. 1.1. Principales Cuencas cercanas a la Ciudad de México .....	21
Fig. 1.2. Hundimiento promedio anual.....	23
Fig. 1.3. Porcentaje de contaminación en los cuerpos de agua superficiales .....	25
Fig. 1.4. Tres chultunes y tres pozos ocultos en una aguada.....	27
Fig. 2.1. Enfermedades relacionadas con la mala calidad del agua.....	34
Fig. 2.2. Ciclo natural del agua.....	39
Fig. 2.3. Filtración convencional .....	41
Fig. 2.4. Filtración lenta con arena .....	42
Fig. 2.5. Filtro compuesto.....	45
Fig. 2.6. Kit Oro para captación de lluvia.....	47
Fig. 2.7. Kit Plata para captación de lluvia .....	48
Fig. 2.8. Kit Bronce para captación de lluvia .....	48
Fig. 2.9. Sistema de filtrado para la industria .....	49
Fig. 2.10. Microcontrolador enviando y recibiendo información.....	51
Fig. 2.11. Sistema de filtrado.....	53
Fig. 3.1. Protocolos LAN en contexto .....	57
Fig. 3.2. Topologías LAN.....	59
Fig. 3.3 Absorción atmosférica de las ondas electromagnéticas.....	64
Fig. 3.4 Sistema de comunicación digital con presencia de ruido .....	66
Fig. 3.5 Red inalámbrica .....	68
Fig. 3.6 Capas del modelo OSI definidas por el estándar IEEE 802.11 .....	69
Fig. 3.7 Modulación DSSS .....	70
Fig. 3.8 Ejemplo de espectro disperso usando secuencia directa.....	71
Fig. 3.9 Modulación FHSS .....	71
Fig. 3.10 Ejemplo de Salto de frecuencia usando Modulación 8-ary FSK.....	72
Fig. 3.11 Red LAN inalámbrica 802.11.....	73

Fig. 3.12 Red ad hoc inalámbrica .....	74
Fig. 3.13 Reconocimientos ACK.....	77
Fig. 3.14 Terminales ocultos: H1 está oculto a ojos de H2 y viceversa.....	78
Fig. 3.15 Evitación de colisiones utilizando las tramas RTS y CTS.....	79
Fig. 3.16 Trama 802.11 .....	80
Fig. 3.17 Uso de los campos de dirección en las tramas 802.11: envío de tramas entre H <sub>1</sub> y R <sub>1</sub> .....	81
Fig. 3.18 Picored Bluetooth .....	83
Fig. 3.19 Estructura de marcos TDM 802.16.....	84
Fig. 4.1 Diagrama a bloques del sistema inalámbrico de filtrado .....	88
Fig. 4.2 Diagrama de bloques general de un microcontrolador .....	90
Fig. 4.3 Sistema mínimo Arduino UNO .....	91
Fig. 4.4 Elementos que conforman la tarjeta Arduino Uno .....	92
Fig. 4.5 Microcontrolador PIC16F887.....	93
Fig. 4.6 Tarjeta de desarrollo DIP-PIC40 .....	94
Fig. 4.7 Cálculo del divisor de tensión.....	96
Fig. 4.8 Cerrojo formado por dos transistores .....	98
Fig. 4.9 Transistores de un Cerrojo con disparo de entrada .....	99
Fig. 4.10 Triac .....	99
Fig. 4.11 Diagrama MOC 3022.....	100
Fig. 4.12 Válvula solenoide de 12v.....	101
Fig. 4.13 Sensor de nivel de líquidos .....	102
Fig. 4.14 Diagrama de flujo del programa de control en Arduino .....	103
Fig. 4. 15 Módulo ESP8266.....	103
Fig. 4.16 Densidad de potencia.....	105
Fig. 4.17 Pérdidas en interiores con una pared entre Tx y Rx .....	108
Fig. 4.18 Potencia en el receptor.....	110
Fig. 4.19 Comparación entre el modelo teórico y el empírico.....	111
Fig. 4.20 Búsqueda de redes disponibles con laptop .....	112

Fig. 4.21 Conexión entre Arduino y módulo ESP 8266 .....	113
Fig. 4.22 Búsqueda de redes disponibles con ESP 8266.....	113
Fig. 4.23 Módulo ESP 8266 conectado a la red .....	114
Fig. 4.24 Módulo ESP 8266 como servidor .....	114
Fig. 4.25 Mensaje enviado desde el navegador .....	115
Fig. 4.26 Comunicación con el módulo ESP 8266 desde dispositivo móvil .....	115
Fig. 4.27 Diagrama a bloques del sistema de control.....	116
Fig. 4.28. Prototipo del sistema de filtrado controlado vía remota.....	117
Fig. 4.29. Sistema de filtrado encendido .....	117
Fig. 4.30(a), (b). Función “FILTRAR” y “PARAR” desde teclado .....	118
Fig. 4.31. Módulo ESP8266 conectado a la red como servidor.....	118
Fig. 4.32(a), (b). Función “FILTRAR” desde control inalámbrico .....	118
Fig. 4.33(a), (b). Función “PARAR” desde control inalámbrico.....	119
Fig. A.1 Diagrama de flujo del sistema de filtrado inalámbrico .....	125
Fig. A.2 Parte de la programación del sistema de control .....	126
Fig. A.3 Teclado analógico simulado en Multisim.....	126
Fig. A.4 Teclado analógico botón 1 simulado en Multisim.....	126
Fig. A.5 Teclado analógico botón 2 simulado en Multisim.....	127
Fig. A.6 Teclado analógico botón 3 simulado en Multisim.....	127
Fig. A.7 Teclado analógico botón 4 simulado en Multisim.....	127
Fig. A.8 Teclado analógico circuito físico .....	128
Fig. A.9 Teclado analógico botón 1 .....	128
Fig. A.10 Teclado analógico botón 2 .....	128
Fig. A.11 Teclado analógico botón 3 .....	128
Fig. A.12 Teclado analógico botón 4 .....	128
Fig. A.13 Lectura del monitor serial.....	129
Fig. A.14 Lectura de los Botones 1 al 4 en el pin A0 usando el monitor serial ....	130
Fig. A.15 Algoritmo de la instrucción Filtrar en Arduino.....	130

Fig. A.16 Leer desde ESP 8266 y escribir en monitor serial .....131

# Lista de Tablas

Tabla 2.1 Elementos que componen los paquetes de Isla Urbana .....	47
Tabla 3.1 Características principales de los estándares 802.11b/a/g .....	69
Tabla 4.1 Especificaciones técnicas Arduino uno .....	91
Tabla 4.2 Características técnicas PIC-DIP40 .....	93
Tabla 4.3 Comparativa entre los valores de voltaje que se obtienen de forma teórica y práctica .....	97
Tabla 4.4 Características técnicas del módulo ESP8266 .....	104
Tabla 4.5 Coeficiente de pérdida de potencia $N$ .....	107
Tabla 4.6 Factores de pérdida de penetración .....	107
Tabla 4.7 Estadísticas de desvanecimiento debido a sombras .....	107
Tabla 4.8 Características típicas del modem RB951Ui-2HnD .....	107
Tabla 4.9 Valores empíricos de potencia en el receptor .....	111
Tabla 4.10 Elementos necesarios para la construcción del sistema de filtrado inalámbrico .....	120



# Siglas y Acrónimos

**A** Amper

**AC** Alternating Current (Corriente Alterna)

**ACK** Acknowledgement (Acuse de Recibido)

**ANSI** American National Standards Institute (Instituto Nacional Estadounidense de Estándares)

**AP** Access Point (Punto de Acceso)

**AREF** Referencia analógica

**ARQ** Automatic Repeat Request (Solicitud de Repetición Automática)

**BSS** Business Support Systems (Sistema de Soporte de Negocios)

**CISCO** City Group for Smaller Companies

**CPU** Central Processing Unit (Unidad central de Procesamiento)

**CSMA/CA** Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (Acceso Múltiple por Detección de Portadora y Prevención de Colisiones)

**CTS** Clear to Send (Preparado para Enviar)

**DC** Direct Current (Corriente Directa)

**DHCP** Dynamic Host Configuration Protocol (Protocolo de Configuración Dinámica de Host)

**DiFT** Distributed Inter-frame Space (Espacio Distribuido Entre Tramas)

**DSSS** Direct Sequence Spread Spectrum (Espectro Disperso por Secuencia Directa)

**EEPROM** Electrically Erasable Programmable Read Only Memory (Memoria de Solo Lectura Programable y Borrable Electrónicamente)

**EEUU** Estados Unidos

**ENA** Estudio Nacional del Agua

**EV1** Electroválvula 1

**EV2** Electroválvula 2

**FAA** Federal Aviation Administration (Administración Federal de Aviación)

**FET** Field Effect Transistor (Transistor de Efecto de Campo)

**FHSS** Frequency Hopping Spread Spectrum (Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia)

**IDEAM** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

**IEEE** Intitute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica)

**INEGI** Instituto Nacional de Estadística y Geografía

**IP** Internet Protocol (Protocolo de Internet)

**IR** Infrarrojo

**IRRI** Instituto Internacional de Recursos Renovables

**ISP** Internet Service Provide (Proveedor de Servicios de Internet)

**KDF** Kinetic Degradation Fluxion

**LAN** Local Area Network (Red de Área Local)

**LEC** Local Exchange Carrier (Portadora de Intercambio Local)

**LLC** Logical Link Control (Control de Enlace Lógico)

**MAC** Media Access Control (Control de Acceso al Medio)

**MAN** Metropolitan Area Network (Red de Área Metropolitana)

**Mbps** Megabit por segundo

**MIMO** Multiple-input Multiple-output (Múltiple entrada Múltiple salida)

**NIC** Network Information Center (Red de Información Central)

**NOM** Normas Oficiales Mexicanas

**NTU** Unidades Nefelométricas de Turbidez

**OFDM** Orthogonal Frequency Divison Multiple Access (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales)

**OMS** Organización Mundial de la Salud

**ONG** Organización No Gubernamental

**OSI** Open Systems Interconnection (Interconexión de Sistemas Abiertos)

**PC** Personal Computer (Computadora Personal)

**PDA** Personal Digital Assistant

**PDU** Professional Development Unit (Unidad de Desarrollo Profesional)

**RAM** Random Access Memory (Memoria de Acceso Aleatorio)

**RF** Radiofrecuencia

**ROM** Read Only Memory (Memoria de Solo Lectura)

**RTS** Request to Send (Solicitud de Envío)

**SCR** Silicon Controlled Rectifier (Rectificador Controlado de Silicio)

**Sen** Sensor

**SIFT** Short Interframe Spacing (Espacio Corto Entre Tramas)

**SNMP** Simple Network Management Protocol (Protocolo Simple de Administración de Red)

**SSID** Service Set Identifier (Identificador de Conjunto de Servicio)

**TDM** Time Division Multiplexing (Multiplexaje por División de Tiempo)

**TRIAC** Triodo Alternating Current (Triodo para Corriente Alterna)

**UART** Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Transmisor-Receptor Asíncrono Universal)

**UIT-R** Unión Internacional de Telecomunicaciones-Recomendaciones

**UNAM** Universidad Nacional Autónoma de México

**UV** Radiación Ultravioleta

**V** Volt

**VAR** Value-Added Reseller (Distribuidor de Valor Añadido)

**WAN** Wide Area Network (Red de Área Amplia)

**WECA** Wireless Ethernet Compatibility Alliance (Alianza de Compatibilidad Ethernet Inalámbrica)

**WiFi** Wireless Fidelity (Fidelidad Inalámbrica)

**WiMax** Worldwide Interoperability for Microwave Access (Interoperabilidad para el Acceso a Microondas)

**WLAN** Wireless Local Area Network (Red de Área Local Inalámbrica)

**WPAN** Personal Area Network (Red de Área Personal)

**ZMCM** Zona Metropolitana de la Ciudad de México

**Ω** Ohm



# Objetivos

## VIII.I Objetivo General

Diseñar un sistema de captación, almacenamiento y filtrado de agua de lluvia a nivel doméstico, que pueda ser operado vía remota, para su implementación en la zona norte de la Ciudad de México, con la finalidad de ofrecer a la población de este sector durante la temporada de lluvia, una importante reserva de agua para su uso y aprovechamiento dentro de las tareas del hogar.

## VIII.II Objetivos Particulares

1. Consolidar la captación de agua de lluvia como una técnica eficiente en el aporte de agua para consumo humano y factible de ser implementada en el entorno urbano de la Ciudad de México.
2. Identificar los elementos que constituyen un sistema de filtrado eficiente, con la finalidad de minimizar los efectos ocasionados por las diferentes afecciones relacionadas con el agua y que perturban la salud de los seres humanos.
3. Analizar las características de la Norma IEEE 802.11.
4. Implementar un prototipo con el cual, será posible ejemplificar el establecimiento de la conexión inalámbrica entre el módulo WiFi del sistema de filtrado con el modem local y se analizará la funcionalidad del control remoto.



## Justificación

La Organización de las Naciones Unidas, dio a conocer en su informe titulado “*La situación demográfica en el mundo 2014*”, que con 20.4 millones de habitantes, la Ciudad de México es la cuarta ciudad más poblada a nivel mundial, esto ocasiona que la cantidad de recursos naturales que se emplean para satisfacer las necesidades de la población aumente constantemente, si agregamos a este hecho la falta de cultura del cuidado en el ahorro de los recursos, la no concientización acerca del gran problema que se vive en torno al cambio climático, las terribles consecuencias generadas por el exceso de basura y contaminantes que producimos a diario, no nos será difícil imaginar que vivimos una época crítica y que las decisiones que se tomen hoy, marcarán el destino de la sociedad.

El propósito de este proyecto es centrar la atención en el tema del agua destinada para el consumo humano, lo cual no es un tema menor, pues como es bien sabido el agua es un recurso primordial para el desarrollo de la vida en general. No solo se prioriza para sobrevivir, sino que es necesaria para desempeñar la mayor parte de las actividades humanas, algunas tan importantes como la elaboración de alimentos en la cocina, la agricultura, la supervivencia de todas las especies consumibles, el aseo personal y del entorno.

Dependemos en gran medida de un buen suministro de agua. Sin embargo, la demanda de agua potable sobrepasa por mucho a la oferta, lo que ha derivado en una sobre explotación de las fuentes naturales de agua, de las que actualmente se dispone. La consecuencia de esto se refleja en un incremento en el costo del servicio y por lo tanto en una distribución desigual del recurso.

La extracción desmedida de agua del subsuelo genera espacios cavernosos que con el tiempo se vencen por el peso de las construcciones que sostienen, colapsando y en muchas ocasiones con trágicas consecuencias. De igual manera se bombean millones de litros de agua desde los ríos más cercanos a la Ciudad de México, acción en la que se emplean grandes cantidades de energía, por otro lado tenemos también el gran costo económico que representa el mantenimiento de la infraestructura necesaria, además de que se depende de las lluvias para mantener un nivel óptimo en dichos ríos, lo cual en ocasiones no es posible ya que la mayor parte del agua de lluvia se pierde en el drenaje, quedando inservible para el consumo humano.

Por lo tanto, sería incierto seguir apostando nuestro futuro a un carente suministro de agua potable que al tratar de solucionar un problema se está convirtiendo en otro mayor. Sin embargo, se piensa que aún se está a tiempo de minimizar el impacto que la demanda de agua potable por parte del ser humano genera en los ecosistemas, por lo que en este proyecto se propone una nueva alternativa que podría representar la mejor opción para satisfacer las demandas de agua potable dentro de nuestra sociedad.



## Introducción

El agua potable constituye el recurso natural con mayor demanda a nivel mundial, es utilizada en una gran diversidad de actividades vitales para el desarrollo de las sociedades modernas. En el mundo entero, los gobiernos destinan grandes cantidades de su presupuesto para brindar a sus ciudadanos acceso a fuentes de agua potable de calidad.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) en el informe del Programa Conjunto de Monitoreo del 2015, dio a conocer que el 91% de la población a nivel mundial, utiliza una fuente de agua potable mejorada. También señala que 6,600 millones de personas tienen acceso a fuentes de agua potable mejoradas, contra 663 millones de personas que no tienen acceso a dichas fuentes.

Sin embargo, aunque los esfuerzos son grandes, en países como México el problema de la escasez de agua potable es un tema delicado. Existen zonas en todo el país que no cuentan con los servicios básicos, por lo que la calidad de vida en estos sectores de la población se ve mermada considerablemente. En este proyecto se pretende integrar un sistema capaz de captar, filtrar y almacenar agua de lluvia controlado mediante tecnología inalámbrica, con la finalidad de obtener un suministro de agua alterno a las técnicas convencionales a través de las cuales la población se abastece del vital líquido.

En el primer capítulo se describen las principales fuentes de abastecimiento de agua potable en la Ciudad de México y los problemas que la sobre explotación a dichas fuentes ha traído a la población. También se dará un recorrido por diferentes países que alrededor del mundo ya están aprovechando los grandes beneficios que la captación de agua de lluvia les ofrece y por último se determina si las condiciones climatológicas de la Ciudad de México son ideales para implementar técnicas de captación de agua de lluvia.

En el segundo capítulo se enfatiza la importancia de tener una cantidad suficiente de agua potable en cada hogar. Asimismo, se conocerán las principales enfermedades que los seres humanos padecemos por falta del recurso hídrico, tener acceso a una cantidad insuficiente de agua o contar con un recurso de mala calidad. En este capítulo también se analizarán los métodos de filtrado y purificación del agua según las normas oficiales, así como también se revisan algunos proyectos con propósitos similares a los que se pretenden en este trabajo y que ya se han puesto en marcha en la Ciudad de México.

En el tercer capítulo se citan los elementos que constituyen a una red LAN y una red WLAN. Para poder analizar sus principales diferencias, se evalúan los elementos y procesos involucrados en los sistemas de comunicaciones inalámbricas y se revisan las características de operación de los protocolos IEEE 802.11, IEEE 802.15.1 y IEEE 802.16, para determinar cuál de ellos se ajusta mejor a los objetivos y necesidades de este proyecto.

En el cuarto capítulo se llevará a cabo el desarrollo e integración de un prototipo, con el cual se simula el funcionamiento del sistema propuesto en este proyecto, centrando la atención en la conexión inalámbrica, esto será de gran ayuda para revisar de forma física el funcionamiento del enlace inalámbrico, determinando así que su respuesta será la deseada.

El desarrollo de este proyecto se basará en la siguiente estructura.

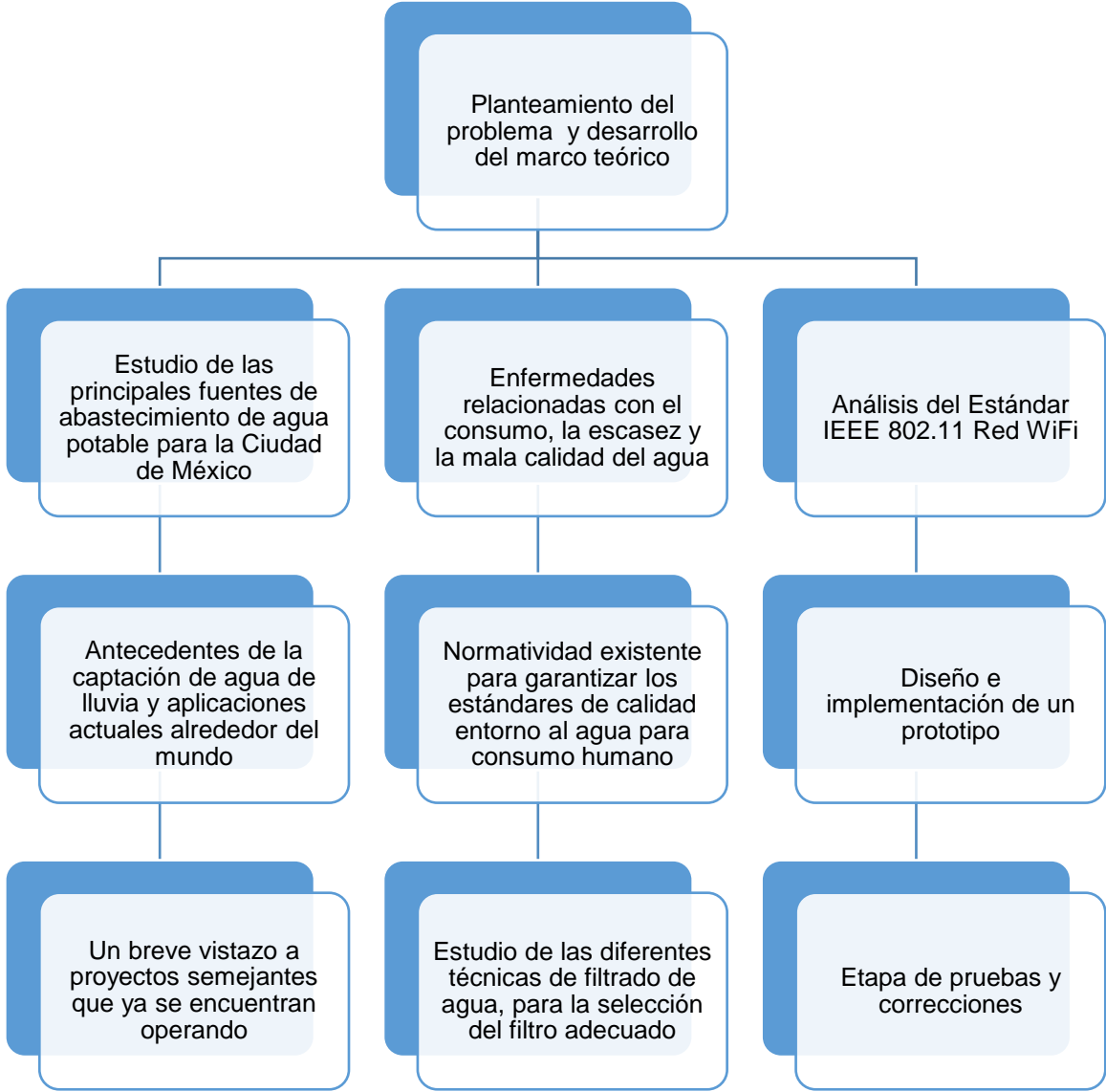


Fig. 1. Metodología del Proyecto

# Capítulo 1

## Captación de agua a nivel mundial y nacional

### 1.1 La escasez de agua en la Ciudad de México.

La Ciudad de México al ser la capital del país presenta un fenómeno llamado centralización; en el cual las principales industrias y dependencias gubernamentales, así como las privadas, se concentran en esta región, generando una gran cantidad de empleos. Esta razón fue la principal motivación que impulsó una creciente migración que inicio en los años 30's, que en sus orígenes provenía desde los estados cercanos a la Ciudad de México y posteriormente desde cualquier parte del país.

La gente que arribaba a la capital del país se asentaba principalmente en el centro, pero al disminuir los espacios con los que se disponía, comenzaron a distribuirse en las zonas aledañas. En un principio el gobierno preocupado por satisfacer las necesidades de la creciente población capitalina, ofrecía los servicios básicos como: agua, luz, espacios públicos, pavimentación de calles, seguridad, transporte, etc. Sin embargo, la oferta y la demanda con base a los servicios suministrados por el Estado siempre ha estado en tela de juicio, esto debido a una mala planeación de la creciente mancha urbana, dando como resultado una implacable demanda, que en algunos servicios ha superado por mucho a la oferta. En cuestión de agua, para satisfacer las necesidades de la población, se instalaban tomas públicas que daban abasto a una colonia completa, creándose una red de agua pobre e insuficiente, que con el tiempo se volvió obsoleta.

Aunque con los años se mejoró la red de agua, nunca se proyectó la magnitud que alcanzaría el número de pobladores en las diferentes colonias que componen a la Ciudad de México y pronto la demanda superó a la oferta. En la actualidad estas redes presentan constantes problemas como son las fugas; a través de las cuales se pierde el 38% del agua disponible para la Ciudad de México, en otros casos la presión del agua es tan baja que es imposible obtener un servicio continuo y de calidad y en los casos más extremos se carece de tuberías, por lo que la población tiende a recurrir a otras técnicas de abastecimiento como son el tandeo y la captación de agua de lluvia, por mencionar algunas (CONAGUA, 2016).

Es evidente que para los gobiernos actuales resulta difícil poder garantizar el abastecimiento de este importante servicio, ya que el crecimiento de las zonas urbanas en lugares de difícil acceso o que carecen de la infraestructura necesaria para proveerles el recurso natural, obstaculiza esta tarea, dando como resultado una desigualdad social ya que mientras existen sectores de la población que gozan de una abundancia en la cantidad y en la calidad del agua que reciben por hogar,

otros sectores sufren de una importante escasez y una deplorable calidad del agua que el gobierno les suministra.

Tal como se lee en la siguiente observación. Persisten acusadas desigualdades geográficas, socioculturales y económicas, no solo entre las zonas rurales y urbanas, sino también en el seno de las ciudades, donde las personas que viven en asentamientos informales, ilegales o de bajos ingresos tienen por lo general un menor acceso a fuentes mejoradas de abastecimiento de agua potable que otros residentes (OMS, 2017).

Por otro lado, este problema se agrava con una marcada preferencia por parte de los gobiernos a satisfacer las necesidades de las clases sociales medias y altas, y dejan sin amparo a los sectores vulnerables de la población. Por tal motivo a los estudiantes de escuelas públicas y en especial a la comunidad estudiantil de la UACM, se les hereda la responsabilidad de buscar soluciones alternativas a los problemas que hoy en día agravan a la sociedad.

El Estudio Nacional del Agua (ENA) realizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) presenta el cálculo de la relación demanda oferta de agua para el año 2000, y proyecciones para los años 2015 y 2025, las cuales indican que el 50% de la población de las áreas urbanas municipales estarían en alto riesgo de desabastecimiento, con condiciones hidrológicas medias. Si las condiciones hidrológicas son de año seco, las proyecciones indican que el 80% de la población de las cabeceras municipales estarían en alto riesgo de desabastecimiento (Ballen, 2006).

Como vemos, las proyecciones del párrafo anterior nos han alcanzado y aún no se vislumbra una posible y pronta solución, más aún se siguen sobreexplotando las reservas superficiales de agua en la ciudad, capital de nuestro país.

## **1.2 Principales fuentes de abastecimiento de agua potable para la Ciudad de México**

A continuación, se examinarán las principales fuentes de abastecimiento de agua potable para la Ciudad de México, y se observará el por qué no pueden seguir vigentes en la actualidad, argumentando que los problemas que se generan debido a la sobre explotación son potenciales fuentes de desastres geográficos.

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se localiza en la parte suroeste de la cuenca del Valle de México, abarca aproximadamente 50% de su territorio y sus características hidrológicas corresponden al relieve, clima, suelo y vegetación de esta región.

La cuenca de México tiene una extensión de 9568 km<sup>2</sup>, se localiza entre tres regiones hidrológicas, la mayor de su territorio se ubica en una de las más importantes del país, la del Pánuco (RH-26). La cuenca del Valle de México

está rodeada por las cuencas Lerma, Cutzamala, Amacuzac, Libres Oriental y Tecolutla, las dos primeras son las más cercanas a la metrópoli (a 40 y 127 kilómetros de distancia respectivamente), por ello han sido las fuentes idóneas para el suministro de agua a la capital del país. El uso intensivo de los recursos hidrológicos de la cuenca de México ha alterado el equilibrio hidrológico de la región, modificando la disponibilidad del recurso (INEGI, 2002).

En la figura 1.1 se muestran las principales cuencas cercanas a la Ciudad de México de acuerdo con la información disponible en el INEGI.

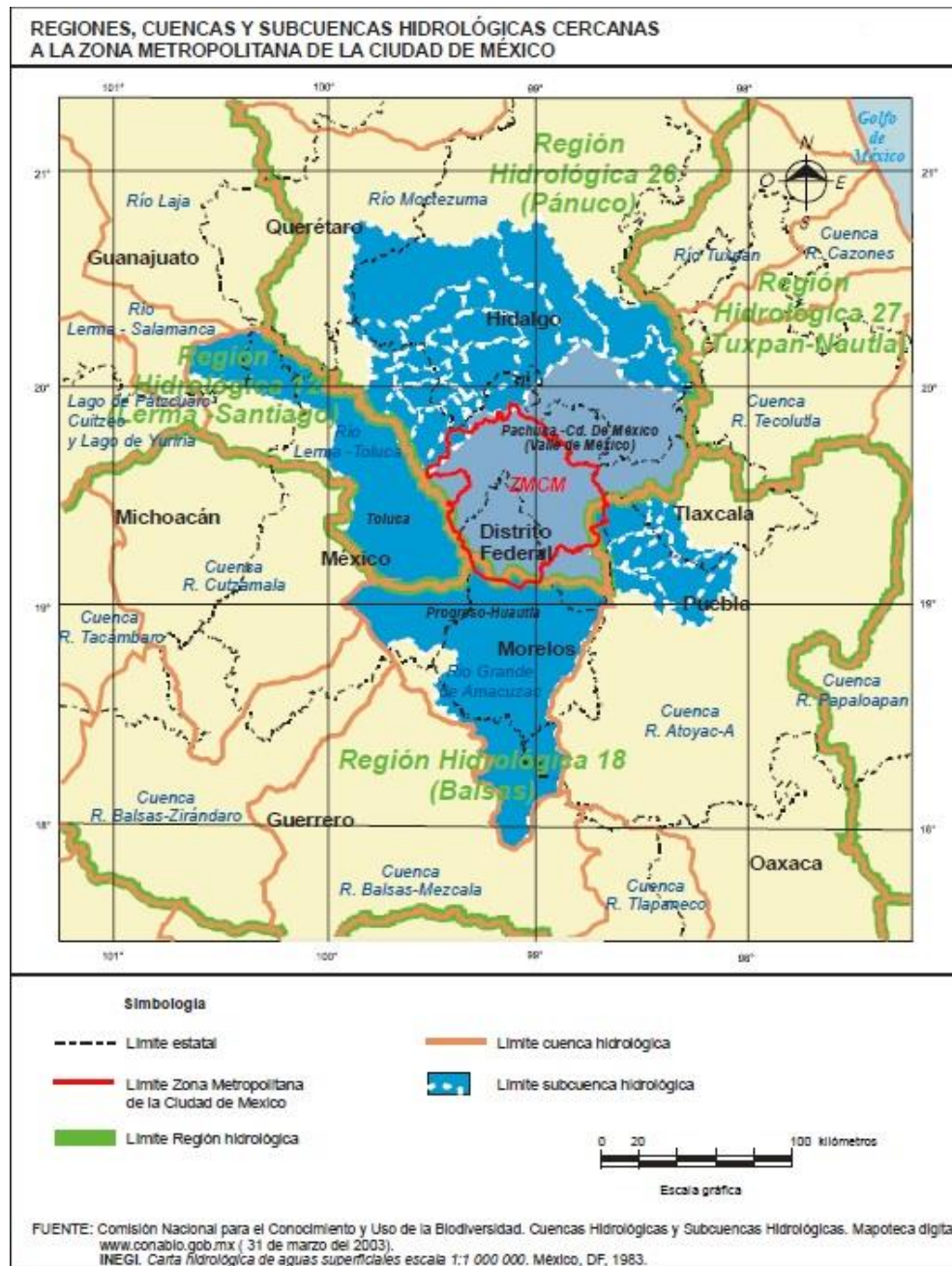


Fig. 1.1. Principales Cuencas cercanas a la Ciudad de México (INEGI, 2022).

Sin embargo, el agua superficial no es la única fuente de abastecimiento de agua potable para la Ciudad de México, también resulta prudente mencionar el uso que la población le da al agua subterránea.

Las aguas subterráneas constituyen importantes reservas con una menor susceptibilidad a procesos de contaminación y degradación en comparación con las fuentes superficiales. El almacenamiento y flujo del agua en el subsuelo están determinados por las condiciones geológicas del suelo y subsuelo, además de las características físicas, químicas, hidrológicas y climáticas que intervienen en la dinámica de recarga, tránsito y descarga de los sistemas acuíferos presentes en las diferentes regiones (ENA, 2000).

El acuífero que se encuentra en el subsuelo de la ciudad suministra la mayor cantidad de agua para las actividades de la población. El 5 de diciembre de 2000 recibió oficialmente el nombre de Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Es una formación geológica por la que circula y se almacena agua que es extraída para diversos usos.

A principios del siglo XX, antes de que se iniciara la explotación del acuífero de la Ciudad de México, los materiales geológicos se encontraban totalmente saturados y el nivel estático afloraba, con la extracción extensiva a lo largo de los años el nivel se ha abatido; debido a que el acuífero se encuentra saturado y deja pasar muy lentamente el agua, se produce un “drenado vertical de las arcillas hacia el acuífero”, por esta razón se le denomina acuitardo. La baja permeabilidad de las arcillas hace que el flujo de drenado vertical sea lento, sin embargo, multiplicado por la gran superficie que estos materiales abarcan, el drenado es considerable.

Se estima que en el acuífero de la Ciudad de México existe una sobreexplotación del 35%, mientras que en los acuíferos de Texcoco y Valle de Chalco llega a 50% y 19% respectivamente.

En el 2002, se extrajeron 437.7 millones de metros cúbicos de agua, a razón de 1.2 millones por día, mediante la operación de 374 pozos profundos que se ubican en las 16 delegaciones del Distrito Federal. El mayor Caudal se obtuvo en las delegaciones: Xochimilco, Coyoacán, Tlalpan e Iztapalapa, que en este año también tenían el mayor número de pozos en operación.

Una extracción de esta magnitud genera un abatimiento de los niveles piezométricos del acuífero, ocasionando procesos de consolidación del subsuelo blando y compresible del sur de la cuenca, y desde hace más de un siglo el hundimiento progresivo de varias zonas de la región: entre 1983 y 1996 se registraron deformaciones de 1.2 m en el Zócalo de la Ciudad de México, y en Aragón, Nezahualcóyotl y Chalco se detectó un hundimiento total de 3.6 m y de casi 2 metros en la planicie de Xochimilco (INEGI, 2002).

Paralelamente estas deformaciones tienen otros efectos al interactuar en zonas adyacentes con suelos compactos que casi no se deforman, provocando agrietamientos superficiales que con el tiempo forman escalonamientos en el subsuelo y ponen en peligro la estabilidad estructural del parque urbano. Las localidades de la cuenca de México que registran afectaciones son: Naucalpan, Xalostoc, Ecatepec, Nezahualcóyotl, Los Reyes la Paz, Chalco, Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Tláhuac y Xochimilco, lo mismo que varias poblaciones aledañas a los pozos localizados en el Alto Lerma, a la altura de San Felipe Santiago (INEGI, 2002).

En la figura 1.2 se muestra un mapa con el hundimiento promedio anual de algunas zonas de la ciudad de México, ocasionado por la sobre explotación de las fuentes de agua subterránea.

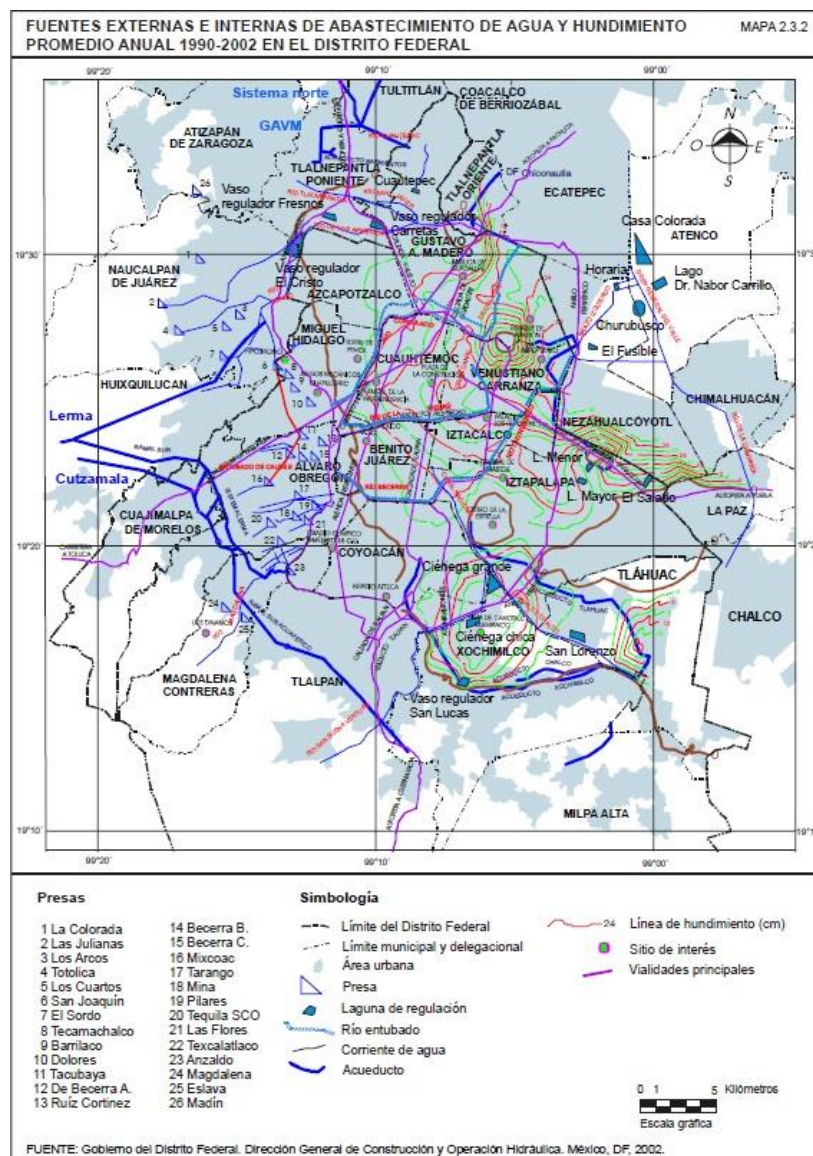


Fig. 1.2. Hundimiento promedio anual (INEGI, 2002).

### 1.3 Papel actual de la precipitación pluvial en la ciudad de México

Ya se han analizado las principales fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México, equívocamente se piensa que las fuentes de agua de las que se dispone son estables y que logran efectivamente rellenarse a través de su ciclo natural, si esto fuera cierto, sería ilógico hablar de un problema de escasez de agua.

Sin embargo, las fuentes naturales de agua no logran recuperar su nivel, aun cuando las lluvias en la Ciudad capital de nuestro país aparecen de forma constante a lo largo de todo el año, siendo breves los intervalos de sequía, este dilema es el que lleva a preguntar cuál es el destino del agua de lluvia en la Ciudad de México.

Por su ubicación geográfica, cercana al trópico de Cáncer, la Ciudad de México registró una precipitación promedio de 746.58 mm anuales en el lapso 1982-2002; el periodo de mayor intensidad se presenta en los meses de mayo a octubre, con lluvias en forma de tormentas de corta duración que llegan a desbordar las alcantarillas y en algunas ocasiones provocan encharcamientos considerables que afectan vialidades e infraestructura (INEGI, 2002).

Es posible que las cifras descritas en el párrafo anterior puedan confundir la perspectiva a primera vista, pues podría pensarse de forma errónea que, en las temporadas de lluvia la precipitación anual será capaz de reabastecer las fuentes que actualmente proveen de agua potable a la Ciudad, lo que se conoce como el ciclo hidrológico. Es decir, de forma natural los mantos acuíferos se realimentan debido a que las precipitaciones se infiltran en el subsuelo, a esto se suma también la evaporación de ríos, lagos, mares, la transpiración de las plantas y demás fenómenos naturales que se condensan y forman nubes, que debido al efecto de la gravedad pronto proporcionarán agua dulce a través de las lluvias a los acuíferos.

En 1900, con la construcción del Gran Canal del Desagüe y del túnel de Tequixquiac, para desalojar las aguas residuales y pluviales de la metrópoli, dan principio a la transformación de la cuenca cerrada (endorreica) de México en una cuenca con salida artificial (exorreica). Con estas acciones empiezan las obras que alterarían el equilibrio de la zona lacustre, seguidas años después por la construcción del Drenaje Profundo (INEGI, 2002).

Varios de los ríos que todavía existen en la ciudad han sido desviados y entubados para evitar inundaciones. Muchos de estos reciben las descargas de las aguas industriales y domésticas que se generan en el área urbana, contaminando su cauce y las aguas de los ríos lejanos donde confluyen. Entre las corrientes que reciben descargas de aguas residuales se encuentran los ríos: San Lucas, Santiago, Churubusco, de los Remedios, Hondo, Consulado y parcialmente el río Magdalena (no entubado totalmente), cuyas aguas limpias son contaminadas en los tramos más bajos, con las descargas domésticas que son depositadas a su paso por las zonas habitadas. La mayoría de estos ríos bajan por las sierras de las Cruces y

Chichinautzin (al poniente y sureste de la ciudad), mientras que en los lomeríos del norte son las corrientes menores (INEGI, 2002).

En la figura 1.3 se muestra el porcentaje de contaminación en los campos de agua superficial.

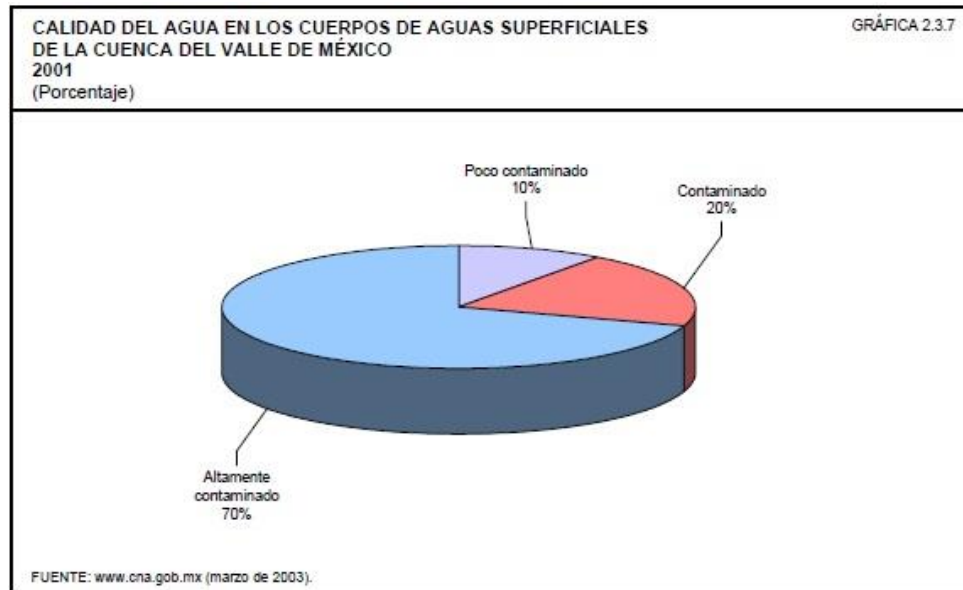


Fig. 1.3. Porcentaje de contaminación en los cuerpos de agua superficiales (INEGI, 2002).

Evidentemente las actividades humanas como la deforestación de los bosques, la mancha urbana creciente que en su implacable paso cubre de asfalto las superficies impidiendo la infiltración del agua en el subsuelo, la concentración de una gran población en la Ciudad de México y el Valle de México, así como los desechos de los hogares y las industrias que desembocan sobre los ríos, han permeado la calidad del agua, impidiendo así completar su ciclo y peor aun convirtiendo el vital líquido en un recurso no renovable.

Importantes estudios revelan que 663 millones de personas se abastecen de fuentes no mejoradas; de ellas, 159 millones dependen de fuentes superficiales. En todo el mundo al menos 1,800 millones de personas se abastecen de una fuente de agua potable contaminada por heces (OMS, 2017).

De este modo el papel de la precipitación pluvial en la Ciudad de México resulta poco relevante ya que la mayor parte del agua de lluvia tiene como destino el alcantarillado de la ciudad, quedando así contaminada e inutilizable por el hombre para satisfacer sus necesidades de agua potable.

## **1.4 La captación de agua de lluvia, como posible solución al problema de la escasez de agua potable**

No es ninguna novedad que, debido al crecimiento demográfico, especialmente en la Ciudad de México y zonas conurbadas, el abasto de agua sea insuficiente. Si a esto se le añade; un ordenamiento urbano mal planeado o asentamientos irregulares que conllevan a la falta de sistemas de abastecimiento de aguas formales, se observa que parte fundamental de la tarea que a las generaciones jóvenes les toca es lograr la distribución y abastecimiento de agua a la población, siguiendo técnicas sustentables para minimizar su impacto ambiental y lograr un mayor alcance a las zonas que no cuentan con un sistema de distribución o en dónde el agua escasea (Red del Agua UNAM, 2014).

En este punto resulta evidente que existe un verdadero problema con miras a convertirse en una catástrofe ambiental que podría golpear el equilibrio de nuestro mundo, poniendo en riesgo su bienestar y el nuestro propio. Así pues, parece que es un momento oportuno para analizar las soluciones que actualmente se han generado para combatir este problema.

Sin duda la principal fuente de abasto de agua potable para el ser humano ha sido el agua superficial, ya que se encuentra de forma directa y al alcance de los seres vivos en, ríos, lagos y arroyos. El problema es que existen territorios en los que estas fuentes naturales son escasas e incluso en ciertas regiones se carece de ellas. Sin embargo, existieron civilizaciones pasadas que se asentaban en estas áreas áridas y proliferaban. Esto fue posible debido a que en las épocas de lluvia los pobladores de estas regiones almacenaban toda el agua que les era posible (Ballen, 2006).

La captación pluvial no es algo nuevo y tampoco implica gran tecnología a un nivel doméstico. Es un sistema ancestral que ha sido practicado en diferentes épocas y culturas, ya que es un medio fácil para obtener agua para el consumo humano y para el uso agrícola. El agua de lluvia puede ser interceptada, colectada y almacenada en depósitos especiales para su uso posterior. Esto ayudaría durante el tiempo de sequía para sobrellevarlo y también durante épocas de lluvias fuertes que desencadenan inundaciones que afectan la Ciudad. Gracias al mal uso del agua y por factores tales como la deforestación masiva en el planeta, el agua irá escaseando progresivamente lo cual significa que, en un futuro no muy lejano, el sistema de captación de agua de lluvia será un mecanismo de sobrevivencia necesario (Red del Agua UNAM, 2014).

Un ejemplo claro de este hecho fue la civilización Maya, la cual construyó cisternas subterráneas llamadas chultunes que tenían la finalidad de captar el agua de lluvia por acción de la gravedad, almacenando grandes cantidades de agua, con la cual cubrían sus necesidades en épocas de sequía. Este es un ejemplo de muchos que se pueden encontrar a lo largo del mundo, es por esto que, sin necesidad de indagar

a fondo, resulta posible considerar la captación de lluvia como la principal opción para dar solución al problema de la escasez de agua en el tiempo presente, así como lo ha sido en el transcurso de la historia.

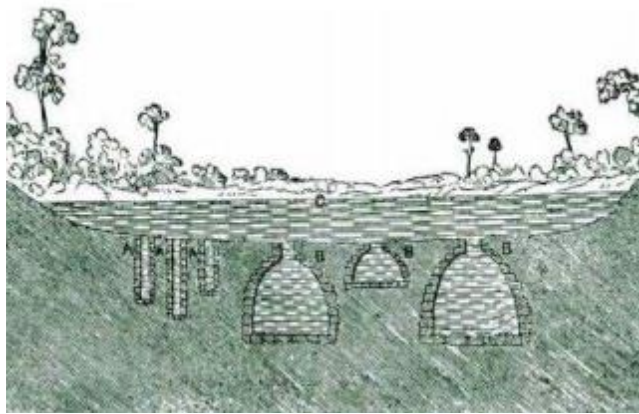


Fig. 1.4. Tres chultunes y tres pozos ocultos en una aguada (Red del Agua UNAM, 2014).

El único detalle a considerar es, si la región que comprende la Ciudad de México es apta para implementar técnicas de captación de agua de lluvia.

Con anterioridad se ha comentado que en la Ciudad de México las lluvias se presentan en forma torrencial y breve, pero con la ventaja de que lo hacen de forma constante a lo largo del año, teniendo una mayor presencia en ciertos meses. Esto actualmente es un problema ya que las grandes cantidades de agua producto de las precipitaciones pluviales no tienen un uso productivo puesto que el mayor caudal de agua llega a las alcantarillas contaminándose y perdiendo utilidad para el ser humano, además de que genera inundaciones en las calles y afectaciones entre la población.

Para dar un buen uso al agua pluvial primero es necesario poder retenerla antes de que llegue al drenaje, evitando así que se contamine y se convierta en un bien sin utilidad para la población. En la Ciudad de México, el desarrollo trajo consigo un estilo de construcción cuadrado, que es además de simple, el que mejor permite aprovechar los espacios y que para la meta de este proyecto aporta grandes ventajas, pues permite que sus techos ya sean de loza o lámina, tengan una gran área.

Lo anterior si bien no es lo más agradable a la vista, resulta muy útil hacia el propósito de este proyecto, ya que las áreas correspondientes a los techos de las viviendas son capaces de captar grandes cantidades de agua durante una precipitación pluvial, por lo que es posible confirmar que las técnicas de captación de agua de lluvia son posibles de implementar en la Ciudad de México y representan por mucho la mejor opción para contrarrestar los efectos de la escasez de agua que aquejan a la sociedad en la actualidad.

## 1.5 La captación de agua de lluvia, una solución a nivel mundial

A continuación se muestra información relevante, que brindará un amplio panorama de cómo hoy en día la captación de agua de lluvia es una herramienta muy utilizada en la lucha por alcanzar un mejor y constante suministro de agua potable que permita conseguir una óptima calidad de vida para las personas a nivel mundial; también se podrá usar esta información para afianzar y complementar el diseño del sistema de filtrado del cual más adelante se hablará de su importancia dentro de este proyecto, basados en técnicas que ya se han implementado y que han probado su eficacia a nivel mundial.

- África

La problemática del abastecimiento del agua potable es de carácter global, pero es una situación muy crítica en el continente africano debido a la alta concentración de pobreza que imposibilita la obtención de la cantidad de recursos y la tecnología necesaria para construcción y operación de un sistema de acueducto y alcantarillado adecuado, además la escasez de fuentes apropiadas en cuanto a calidad y seguridad del suministro, ha hecho de este un problema aún mayor.

Aunque en algunas zonas de África en los últimos años se ha producido una rápida expansión de los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia el proceso de implantación de esta tecnología en el Sur de África ha sido lento. Esto debido en parte a la baja precipitación, el reducido número y tamaño de las cubiertas impermeabilizadas y el alto costo en la construcción de los sistemas en relación a los ingresos familiares. La falta de disponibilidad de cemento y arena, eleva el precio de las instalaciones. Sin embargo, la recolección de agua de lluvia es muy difundida en África con grandes proyectos en Botswana, Togo, Mali, Malawi, Sudáfrica, Namibia, Zimbabwe, Mozambique, Sierra Leona y Tanzania.

Uno de los proyectos adelantados es el de “Sistemas de Aprovechamiento de Agua de Lluvia de Muy Bajo Costo” el cual se desarrolló con la intervención de varias organizaciones africanas y el apoyo de *Development Technology Unit* (Inglaterra). Las prácticas convencionales en muchos países de África de aprovechamiento de agua de lluvia son de carácter informal lo que permite tener costos reducidos; obteniendo también una muy baja calidad del agua y una mínima eficiencia del sistema. Los sistemas formales son promovidos por agencias subsidiarias o adoptados por familias de clase media con grandes volúmenes de almacenamiento que intenta satisfacer toda la demanda de la casa. En un punto intermedio se encuentran las tecnologías de “muy bajo costo”, con estas tecnologías se pretende suplir sólo un porcentaje de la demanda total de las casas a partir de una inversión que no supera los 120 dólares y utilizando los materiales disponibles en la zona (Ballen, 2006).

El importante rezago a nivel social, cultural y económico en la mayoría de los países africanos, da como resultado que aun cuando existe en ellos una importante reserva de agua potable, esta no se encuentre al alcance de la población. En el continente asiático, existen países cuya población es muy grande y la demanda de servicios es creciente a lo largo del año, por lo que sus líderes explotan todas las alternativas que permiten satisfacer las necesidades de su población.

- Asia

La India es el segundo país con mayor población después de China. Por ello el gran problema que enfrenta el gobierno es suministrar los servicios básicos a 1,000 millones de personas. La solución que se ha tomado para enfrentar estos problemas son las técnicas de aprovechamiento de agua de lluvia. En la India el monzón es un diluvio breve, allí se dan aproximadamente 100 horas de lluvia por año. En estas 100 horas se debe captar y almacenar el agua para las otras 8,600 horas que constituyen un año.

En Bangladesh, la recolección de agua de lluvia se ve como una alternativa viable para el suministro de agua segura en áreas afectadas por contaminación por arsénico. Desde 1977, cerca de 1,000 sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia fueron instalados en el país.

China ha estado enfrentando serios problemas de escasez de agua que han causado grandes pérdidas económicas y medioambientales. La peor condición de escasez de agua se da en la meseta de Loess de Gansu, localizada en el noreste del País, esta es una de las áreas más pobres de China donde el escurrimiento y el agua superficial son muy escasos. La agricultura en esta región confía en la llegada oportuna de la lluvia; por ello la mayoría de estos pueblos han padecido de sed durante siglos. Para promover el desarrollo social, económico y mejorar la calidad de vida, es necesario mejorar las condiciones de abastecimiento de agua. La única fuente de agua potencial en esta área es la lluvia. Debido a esto desde 1988, se han probado eficientes técnicas de captación de agua de lluvia y desde 1995 a 1996, el gobierno local ha implementado el proyecto llamado "121" para captación de agua de lluvia, apoyando económicamente a cada familia para construir un campo de recolección de agua, almacenamiento y un terreno para cultivar. Suministrando agua a 1.2 millones de personas (260,000 familias) y 1.18 millones de cabezas de ganado.

Singapur cuenta con recursos naturales limitados y una creciente demanda de agua, esta ha llevado a la búsqueda de fuentes alternativas y métodos innovadores para el aprovechamiento del recurso. Alrededor del 86% de la población de Singapur vive en edificios de apartamentos. Los techos de estos edificios son utilizados para la captación de agua de lluvia. El agua de lluvia es almacenada en cisternas separadas de las de agua potable, para darle usos diferentes al de consumo humano (Ballen, 2006).

El continente americano, es sin duda uno de los más afectados por la falta de agua potable, lo anterior a causa de la sobrepoblación y los altos niveles de pobreza en los que la gente vive, por lo que la captación de agua de lluvia juega un importante papel en el bienestar de los ciudadanos.

- Sur América

En la década pasada en Brasil, muchas ONG y organizaciones ambientales se enfocaron en trabajar en el suministro de agua para consumo humano usando sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia. En la región noroeste de Brasil de clima semiárido, el promedio anual de lluvia varía desde 200 hasta 1,000 mm. Las comunidades nativas tradicionalmente han recogido agua de lluvia en pozos excavados a mano en rocas, pero este sistema no logra satisfacer las necesidades de la población, por ello una ONG y el gobierno de Brasil iniciaron un proyecto para construir un millón de tanques para la recolección de agua de lluvia en un periodo de 5 años, para beneficiar a 5 millones de personas. La mayoría de estos tanques fueron hechos con estructuras de concreto prefabricado o concreto reforzado con mallas de alambre (Ballen, 2006).

- América del Norte (México)

San Felipe está ubicado en el Estado de Guanajuato, México, a una altura de 2,140 metros sobre el nivel del mar, su clima es templado y seco de tipo desértico. En este municipio el Ingeniero Agrónomo fallecido Hugo Velasco Molina, con el apoyo de la División de Agricultura y Tecnología de Alimentos, del Tecnológico de Monterrey desarrolló su proyecto "Agua y Vida" el cual comenzó en 1996, con almacenamientos de agua, ya que en esta población se dan periodos sin lluvia que superan los dos meses, el primer desarrollo tecnológico fue un sistema de aprovechamiento de agua de lluvia que cuenta con una cisterna con capacidad de almacenamiento de 500,000 litros y un área de captación cubierta de piedra laja. La siguiente obra fue construida a las afueras del municipio y se llamó "Techo-Cuenca" y consta de dos cubiertas con pendientes que se unen en un canal, el cual está conectado a una tubería que conduce el agua a un deposito con capacidad para almacenar 285,000 litros de agua ubicado dentro del municipio, que se ha denominado "Casa del Agua y Vida" donde se distribuye agua potable a las familias que la necesiten. Varias de las construcciones de tipo institucional como el jardín de niños y la escuela municipal están equipados con sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia que es utilizada para la descarga de inodoros, el aseo de pisos y baños y para regar los jardines. La población en seis años ha sido transformada y la mayoría de sus necesidades de agua han sido suplidas por los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia (Ballen, 2006).

En los países desarrollados la escasez de agua es también un tema delicado, ya que la industria y la agricultura requieren cantidades exorbitantes de agua para desempeñar sus actividades, por lo que las técnicas de captación de agua de lluvia

son eficientemente utilizadas en Europa y Norte América. Después de analizar los beneficios que la captación de agua de lluvia ha aportado en los distintos países alrededor del mundo en los que esta técnica es altamente implementada, se infiere que el agua de lluvia sin duda representará una solución al problema de la escasez de agua en este país, sin embargo, las fuentes de almacenamiento de agua de lluvia ya sean naturales o artificiales, no siempre garantizan que el agua contenida en ellas esté limpia.

En el 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció explícitamente el derecho humano al abastecimiento de agua y al saneamiento. Todas las personas tienen derecho a disponer de forma continuada de agua suficiente, salubre, físicamente accesible, asequible y de una calidad aceptable, para uso personal y doméstico (OMS, 2017).

Tener agua limpia es un derecho y una necesidad para las poblaciones del mundo entero, en el caso de México que es un país en vías de desarrollo, no siempre se garantiza a la población que el agua que se consume esté libre de contaminantes u otros agentes patógenos causantes de un gran número de enfermedades gastrointestinales.

Otro problema frecuente en el país es el hecho de que el agua no está al alcance de las familias, en algunas regiones las personas; principalmente mujeres y niños, caminan varios kilómetros hasta la fuente de agua más cercana, la Organización Mundial de la Salud sugiere que los sistemas de distribución de agua potable no estén a más de un kilómetro de distancia de los consumidores, pero pese a dichas recomendaciones, aun no es posible que todos los mexicanos gocen de este beneficio.

Dentro de las clases con mayor restricción al agua potable, se encuentran los sectores vulnerables, los cuales no pueden pagar a las empresas privadas los altos costos que el agua embotellada y el tandeo tienen hoy en día, por tal motivo se ven obligados a depender del ineficiente compromiso por parte del gobierno para satisfacer sus necesidades de agua para el consumo diario, que en algunos casos no alcanza a proveer más de 20 litros por familia, incluso en delegaciones como Iztapalapa, se han implementado talleres que tienen como objetivo enseñar a las personas a cumplir con todas las tareas que involucran el uso de agua como son: cocinar, aseo del hogar y aseo personal, por mencionar algunas de las más importantes, utilizando una cubeta con tan solo 20 litros de agua al día.

Ahora en el contraste encontramos a las personas cuyo nivel social si les permite cubrir los costos monetarios que el suministro de agua privado representa, sin embargo, la creciente demanda genera que los precios se ajusten, dando como resultado un constante incremento en el costo del recurso, que inclusive para las clases mejor posicionadas resulta excesivo. Por consiguiente, es en beneficio de la población en general el considerar otras opciones de abasto de agua potable, con las cuales sea posible generar un ahorro en la economía familiar.



## Capítulo 2

### Elementos que constituyen un sistema de filtrado de agua

En el capítulo anterior fue posible resaltar la importancia de comenzar a dirigir el ingenio y esfuerzo en el diseño y construcción de técnicas que permitan a la población captar la mayor cantidad de agua de lluvia cuando haya presencia de precipitaciones pluviales en la Ciudad, pero aunque esto representa un gran reto, no es el único obstáculo que se debe surcar antes de que el agua de lluvia represente una opción viable como un suministro alternativo que provea de forma eficiente agua potable a los ciudadanos para cubrir sus necesidades diarias. Para fines prácticos se considerará que se ha resuelto el problema de captar y almacenar el agua de lluvia, y se pensará que se tiene una buena cantidad de agua pluvial almacenada en un contenedor; el agua no estuvo en contacto más que con la superficie que capta el agua, la tubería y el contenedor, entonces ¿es correcto suponer que el agua está lista para ser consumida por la población?

La respuesta a la cuestión del párrafo anterior es un rotundo no, ya que es probable que la superficie que capta el agua, la tubería que la dirige o el tanque que la almacena, no estén limpios del todo, además puede ser que, en su proceso de evaporación y condensación, el agua que se dispone a formar nubes pudo estar en contacto con agentes como la contaminación ambiental, por lo tanto, el agua que cae en forma de lluvia no se considera potable.

Además, las bacterias que abundan en el medio ambiente contaminan el agua y son la principal causa de enfermedades gastrointestinales en la población, por lo que es primordial tener cuidado con el agua que se destina para consumo humano, pues previamente se debe garantizar su pureza. Por lo anterior se vuelve necesario canalizar el agua de lluvia hacia un filtro que le dé el tratamiento necesario, para garantizar que el agua que se ha almacenado es apta para su consumo.

El agua es un recurso esencial para el ser humano, se necesita para cocinar, para el aseo personal y para la limpieza del entorno, es también un recurso básico para la producción de alimentos, etc. Sin embargo, tener agua no es suficiente es imprescindible que el agua de que se dispone esté limpia.

El agua contaminada y el saneamiento deficiente están relacionados con la transmisión de enfermedades como el cólera, otras diarreas, la disentería, la hepatitis A, la fiebre tifoidea y la poliomielitis. Los servicios de agua y saneamiento inexistentes, insuficientes o gestionados de forma inapropiada exponen a la población a riesgos prevenibles para su salud. Esto es especialmente cierto en el caso de los centros sanitarios en los que tanto los pacientes como los profesionales quedan expuestos a mayores riesgos de infección y enfermedad cuando no existen

servicios de suministro de agua, saneamiento e higiene. A nivel mundial, el 15% de los pacientes contraen infecciones durante la hospitalización, proporción que es mucho mayor en los países de bajos ingresos (OMS, 2017).

Se calcula que unas 842,000 personas mueren cada año de diarrea como consecuencia de la insalubridad del agua, de un saneamiento insuficiente o de una mala higiene de las manos. Sin embargo, la diarrea es altamente prevenible y la muerte de unos 361,000 niños menores de cinco años al año se podría prevenir si se abordan estos factores de riesgo. En los lugares donde el agua no es fácilmente accesible, las personas pueden considerar que lavarse las manos no es una prioridad, lo que aumenta la probabilidad de propagación de la diarrea y otras enfermedades (OMS, 2017).

La diarrea es la enfermedad más conocida que guarda relación con el consumo de alimentos o agua contaminados. Sin embargo, hay también otros peligros. Casi 240 millones de personas se ven afectadas por “esquistosomiasis”, una enfermedad grave y crónica provocada por lombrices parasitarias, contraída por exposición a agua infestada.

En muchas partes del mundo los insectos que viven o se crían en el agua son portadores y transmisores de enfermedades como el dengue. Algunos de estos insectos, denominados vectores, crecen en agua limpia, y los contenedores domésticos de agua de bebida pueden servir como lugares de cría (OMS, 2017).



Fig. 2.1. Enfermedades relacionadas con la mala calidad del agua (Obtenida de agua.org.mx)

Las enfermedades vinculadas con el agua de consumo humano, son un problema significativo a nivel mundial, el cual se agudiza en los países en vías de desarrollo, este problema se asocia con mayor frecuencia a las poblaciones pobres; quienes reciben agua de mala calidad, que no tienen acceso a una cantidad suficiente de agua para un buen aseo personal o que las redes de distribución de agua no reciben un buen mantenimiento ni saneamiento.

## 2.2 Enfermedades relacionadas con el agua

### 2.2.1 Mala calidad del agua

A continuación, se muestra un estudio realizado por la Fundación para la Salud y Educación Globales (*Global Health and Education Foundation*) en el cual se clasifican en cinco rubros las enfermedades infecciosas vinculadas con el agua.

- Transportadas en el agua.

Las enfermedades transportadas en el agua se propagan cuando las personas beben agua contaminada o ingieren alimentos que han sido preparados con agua contaminada. Entre las enfermedades comunes transportadas en el agua se incluyen tifoidea, cólera, disentería, gastroenteritis y hepatitis. Estas enfermedades resultan cuando desechos humanos y de animales penetran a las fuentes de suministro de agua y la contaminan.

Muchas de las enfermedades transportadas en el agua son enfermedades diarreicas, incluidas las “criptosporidiosis” y “giardiasis”. Estos trastornos intestinales son causados por “*cryptosporidium*” y “*guardia*”, que son parásitos microscópicos en el agua. Además de diarrea severa, estos pueden causar fiebre, calambres, náusea, pérdida de peso y deshidratación. Estas enfermedades pueden poner en peligro la vida de aquellos que ya están enfermos o de personas de corta edad y de edad avanzada, que pudiesen tener sistemas inmunes debilitados.

El cólera es otra enfermedad transportada en el agua, causada por bacterias, que propagan problemas epidémicos de salud en la mayoría de países del mundo en vías de desarrollo. El Cólera puede causar diarreas mortales y, aunque las personas infectadas pueden recuperarse, puede ser una enfermedad particularmente peligrosa para las personas con desnutrición.

La tifoidea es una enfermedad transportada en el agua que afecta a casi 17 millones de personas cada año. La enfermedad es causada por bacterias patógenas en el tracto intestinal y el torrente sanguíneo de la víctima. Los síntomas de la tifoidea incluyen fiebre severa, malestar, dolor de cabeza, estreñimiento o diarrea, manchas en el pecho y un agrandamiento del hígado y el bazo.

La tifoidea se propaga por medio de los desechos humanos, y por medio de aguas contaminadas con desechos fecales en sitios donde se carece de servicios de saneamiento apropiados (*El Agua Potable Segura es Esencial*, 2007).

### 2.2.2 Por escasez de agua

- Arrasadas por el agua

Las enfermedades arrasadas por el agua son infecciones causadas por la deficiente higiene personal, resultante de la inadecuada disponibilidad de agua. Estas enfermedades pueden ser previsibles si las personas cuentan con un adecuado suministro de agua limpia disponible para la higiene personal.

Entre las enfermedades típicas arrasadas por el agua se incluye la shigella, que causa disentería, sarna, tracoma, treponematosi, lepra, conjuntivitis, infecciones y úlceras de la piel.

La sarna es una infección altamente contagiosa de la piel. Se puede identificar por medio de erupciones o granitos que producen suma comezón y aparecen en las manos, codos, rodillas, senos, hombros e incluso en otras partes del cuerpo. La sarna es causada por un acaro microscópico, que penetra debajo de la piel y se conoce como *Sarcoptes scabiei*. Al rascarse las erupciones de sarna que producen suma comezón, pueden ocurrir lesiones abiertas que se pueden infectar por otras bacterias. La sarna se transmite con facilidad por medio del contacto de una persona con otra y, cada año unos 300 millones de personas contraen la enfermedad.

El tracoma es una infección de los ojos y es la principal causa de ceguera que se puede evitar en el mundo. La enfermedad es causada por una bacteria patógena y se transmite fácilmente de persona a persona mediante los fluidos que se descargan por los ojos infectados. La enfermedad infecta por lo general a los niños. Avanza con los años, a menudo agravada por frecuentes recaídas de infecciones, hasta que la ceguera u otros síntomas graves aparecen con el tiempo en la vida de la persona. El tracoma causa cicatrices en el interior de los párpados de la víctima y ocasiona que las pestañas se volteen hacia dentro. Las pestañas frotan y laceran la córnea, hasta causar pérdida grave de la vista y ceguera.

Más de seis millones de personas en todo el mundo pueden estar ciegas debido a esta enfermedad, y unos 150 millones más esperan tratamiento (El Agua Potable Segura es Esencial, 2007).

- Acuáticas

Las enfermedades acuáticas son transmitidas por organismos acuáticos, como los gusanos o lombrices. Estos pueden penetrar la piel si se usa agua contaminada para la limpieza o para bañarse. Los gusanos de Guinea pueden ingresar al cuerpo por medio del agua potable contaminada.

La esquistosomiasis quizá no sea tan conocida como la malaria que es la enfermedad parasitaria más destructiva del mundo, pero ambas son casi igual de mortíferas. La esquistosomiasis es causada por varias especies de gusanos planos, que pueden penetrar la piel humana para ingresar al cuerpo y depositar sus huevos. Se puede transmitir por medio de desechos fecales humanos. Entre los síntomas se incluyen erupciones con comezón, fiebre, escalofríos, tos y dolores. Entre los efectos más graves se incluye el daño a los órganos (vejiga, hígado y riñones), impedimentos del sistema nervioso y, en niños atrofia del crecimiento y del desarrollo cognitivo.

Casi 200 millones de personas padecen de esquistosomiasis y 20 millones de ellos sufren efectos severos. La enfermedad es más común en la región de África sub-sahariana, donde residen 4 de cada 5 personas infectadas.

Las lombrices redondas de gran tamaño llamadas “dracunculiasis” (infección del gusano de Guinea), producen una dolorosa infección ulcerante. Los gusanos se ingieren inicialmente como larvas que portan las pulgas acuáticas presentes en aguas contaminadas. Después de más o menos un año, el gusano maduro trata de emerger del cuerpo humano para reproducirse. Esta salida la cual ocurre a menudo a través de las piernas, causa las dolorosas ampollas por las cuales se conoce la enfermedad.

La infección del gusano de guinea puede incapacitar a sus víctimas y dejarlas imposibilitadas de asistir al trabajo o a la escuela. Algunas personas sufren complicaciones como infección, artritis e incluso rigidez permanente de las extremidades.

Muchas víctimas tratan de aliviar esta incomodidad, sumergiendo en agua las ampollas causadas por el gusano de guinea, infortunadamente, esta práctica típicamente usada, estimula al gusano a liberar miles de larvas en el agua, y así vuelve a comenzar el ciclo.

Gracias a los esfuerzos de la campaña de erradicación respaldada por la OMS, la incidencia de la infección del gusano de guinea se ha reducido drásticamente en años recientes. Hoy día, la enfermedad está confinada principalmente a Sudán, Nigeria y Ghana (El Agua Potable Segura es Esencial, 2007).

- Por vectores de insectos acuáticos

Las enfermedades por vectores de insectos acuáticos se propagan, como su nombre lo indica, por insectos. Los insectos portadores, incluidos los zancudos y las moscas negras, se reproducen en aguas estancadas o en sus cercanías. Por ese motivo, las enfermedades que estos transmiten están relacionadas con el agua como aquéllas transmitidas más directamente por medio del líquido mismo.

Entre las enfermedades por vectores de insectos acuáticos se incluyen: malaria, filariasis, fiebre amarilla y ceguera de río.

La malaria es causada por diminutos parásitos, los cuales son transmitidos por zancudos. Los insectos se reproducen en agua dulce o salobre y, cuando pican a un ser humano infectado, succionan los parásitos de la malaria junto con la sangre de la persona infectada. Los insectos pueden entonces transmitir la enfermedad a la próxima persona que piquen.

En seres humanos, los parásitos de la malaria se desarrollan en el interior de los glóbulos rojos de la sangre y los destruyen, este proceso causa las fiebres características de la malaria. Otros síntomas pueden incluir escalofríos, dolores de cabeza y musculares, fatiga, náusea, diarrea e ictericia. En casos agudos, las víctimas de la malaria pueden sufrir convulsiones, estados de coma o insuficiencia renal.

La enfermedad es conocida por sus índices de mortalidad, particularmente entre los niños. Aproximadamente 300 a 500 millones de personas contraen malaria cada año, un millón de los cuales muere por causa de la enfermedad. La malaria es más frecuente en las regiones tropicales y subtropicales de los países en vías de desarrollo de Asia, África y Sudamérica (El Agua Potable Segura es Esencial, 2007).

- Enfermedades causadas por prácticas sanitarias deficientes

Algunas enfermedades, como la uncinaria, son el resultado directo de las condiciones de saneamiento deficientes. Se pueden contraer por el contacto con suelo contaminado, el cual se contamina por heces humanas en regiones donde no existen medios apropiados para la eliminación de desechos.

Los seres humanos resultan infectados con los parásitos de uncinaria o lombriz de gancho por contacto directo, como ocurre al caminar descalzo, en suelo que contiene heces humanas. Las larvas de la lombriz de gancho existen en el suelo y penetran la piel humana para llegar hasta el intestino delgado. Ya en el intestino, las lombrices crecen hasta su tamaño adulto y producen miles de huevos, los cuales se transmiten a través de la materia fecal para volver a comenzar su ciclo de vida.

Una pequeña infección de uncinaria quizá no presente síntomas, pero otras se identifican por causar comezón y erupciones cutáneas. La enfermedad a menudo causa diarrea o calambres y puede ser peligrosa para niños, mujeres embarazadas y para aquellos que están enfermos o desnutridos. Estas personas pueden padecer de anemia, deficiencia proteínica y retardo del crecimiento. Esta enfermedad en gran parte tropical afecta a aproximadamente mil millones de personas, una de cada seis en la Tierra (El Agua Potable Segura es Esencial, 2007).

Las enfermedades relacionadas con el agua son diversas y afectan potencialmente la salud de los seres humanos, resulta sorprendente el saber que el simple hecho de mejorar la calidad y la cantidad de agua disponible para las personas, evitaría miles de muertes anuales alrededor del mundo, lo anterior obliga a este proyecto a garantizar que el agua que se aporte, derivada de la captación de las precipitaciones, recibirá el tratamiento necesario para hacer de esta reserva de agua, una opción viable para el consumo humano.

### 2.3 Métodos de filtrado de agua

Se sabe que existen yacimientos de agua que son plenamente potables, también existen pozos de agua cuya calidad alcanza estándares muy elevados e incluso los ríos y mares en los que abunda la vida submarina necesitan limpiarse de todos los desechos que sus habitantes generan, para poder seguir gozando de un espacio apto para su desarrollo.

Entonces qué sucede, qué técnicas implementa la naturaleza para limpiar sus aguas. En el caso de las aguas dulces, al generarse las lluvias, el agua se infiltra en el subsuelo atravesando algunas capas en la corteza terrestre, conforme penetra el agua a través del suelo, se encuentra con tierra más comprimida, esto genera que las partículas contenidas en el agua se queden atrapadas en el sedimento terrestre. Cuanto más compacto este el sedimento, retendrá partículas aún más pequeñas y el agua alcanzará un nivel mayor de pureza.

En la figura 2.2 se muestra el proceso natural que el agua de lluvia tiene a través del llamado ciclo del agua.



Fig. 2.2. Ciclo natural del agua (Obtenida de wordpress.com)

En el caso de las aguas de mar, estas se rellenan por efecto de las lluvias y por el desdrenamiento de los ríos y los lagos. Los ríos y lagos a través de su cauce arrastran tierra y demás partículas que pueden contaminar el agua, sin embargo, las olas del mar crean corrientes que empujan sus aguas hacia las costas, generando una espuma densa que retiene principalmente materia orgánica microscópica y depositándola sobre la arena. Entre la arena se alojan tanto bacterias microscópicas, como organismos de mayor tamaño que se alimentan de la materia orgánica arrastrada por el mar (Red del Agua UNAM, 2014).

También en el mar existen arrecifes de coral, que se forman con los restos calcáreos de corales duros, que tienen la característica de ser muy porosos, este hecho es aprovechado por bacterias diminutas que se alojan en los huecos de los corales y que utilizan la fuerza de las mareas que obligan al agua a pasar a través de los huecos donde las bacterias viven y donde también se atorán pequeñas partículas orgánicas que sirven como alimento a dichas bacterias. Este proceso también se lleva a cabo en los ríos, pero en vez de arrecifes coralinos aquí encontramos arena y rocas que realizan la misma función.

Sin embargo, estos procesos utilizados por la naturaleza, aunque son muy efectivos también son lentos, así que el reto para el ser humano ha sido el desarrollar métodos de filtración artificial basados en los naturales, que puedan limpiar grandes cantidades de agua en el menor tiempo posible.

Por tal motivo a continuación se analizan los métodos artificiales más comunes que el ser humano utiliza para eliminar los contaminantes y organismos patógenos contenidos en el agua.

- Filtración convencional

Los sistemas de filtración tratan el agua pasándola a través de medios granulares que retiran los contaminantes. Su eficiencia varía potencialmente, pero estos sistemas se pueden utilizar para corregir problemas de turbidez y color, así también como tratamiento para eliminar “guiardia” y “criptosporidium”, bacterias y virus. La filtración convencional utiliza primero un pretratamiento químico coagulante, como son las sales de hierro o aluminio, las cuales se agregan al agua fuente. Después se agita la mezcla lentamente para inducir la unión de las partículas pequeñas en suspensión para formar grumos más grandes o “flóculos” los cuales resultan fáciles de retirar.

Estos sistemas utilizan después un paso de sedimentación. En este proceso, las partículas en el agua, incluidos los flóculos creados en el proceso de floculación, se asientan en el fondo del agua de manera natural por la fuerza de la gravedad. Estos contaminantes se aglutinan en el fondo del sistema como un fango que debe ser eliminado periódicamente (Sistemas de filtración, 2016).

La filtración convencional, es un método químico de filtrado, ya que utiliza una mezcla coagulante, que atrapa las partículas suspendidas en el agua, una vez formados los coágulos es fácil retirarlos utilizando algún material filtrante. Sin embargo, aunque es una técnica eficiente de filtrado, no es recomendable para aguas con alto grado de turbidez ya que con estas condiciones los filtros tienden a saturarse rápidamente.

En la imagen 2.3 se observa el Diagrama a bloques de un clarificador convencional.

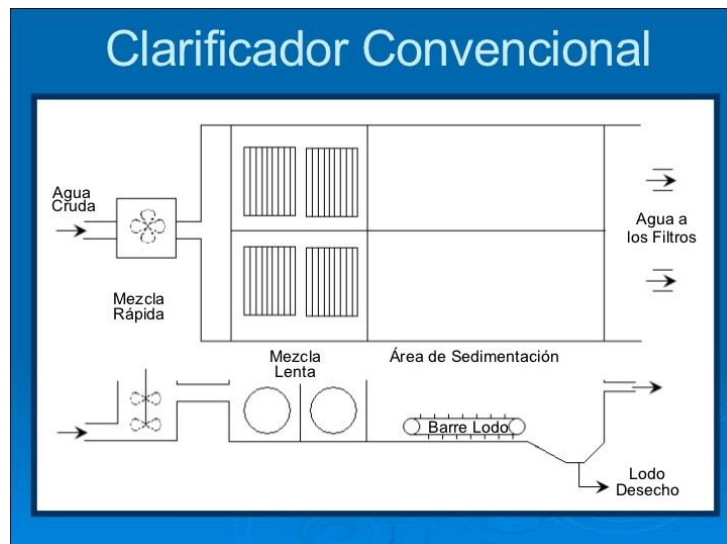


Fig. 2.3. Filtración convencional (Obtenida de [www.profeco.gob.mx](http://www.profeco.gob.mx))

- Filtración lenta con arena

La filtración lenta con arena fue el primer método utilizado por muchas ciudades durante el siglo XIX. Estos filtros pueden eliminar eficazmente los microorganismos que causan enfermedades transportadas por agua, al igual que bacterias y virus (una capacidad que demostró inicialmente con un descenso en los índices de enfermedades en las ciudades europeas que iniciaron a aplicar el tratamiento).

El agua tratada mediante estos sistemas se deja pasar lentamente a través de un lecho de arena de unos 2 a 4 pies (0.6 a 1.2 metros) de profundidad. En ruta, una combinación de procesos físicos y biológicos que filtran el agua y elimina los contaminantes. Después del uso repetido, la arena se vuelve portadora de una multitud de bacterias, algas, protozoos, rotíferos, copépodos, y gusanos acuáticos. Estos microorganismos ayudan al proceso de filtración mediante la eliminación de contaminantes, no obstante que pueden ser afectados por las temperaturas de agua menores a 10 °C. Se dice que la arena que alberga estos organismos está madura y es preferible a la arena limpia o nueva. Puede ser necesario que transcurran varias semanas o meses para madurar la arena, dependiendo del contenido y la temperatura del agua (Sistemas de filtración, 2016).

La filtración lenta es una técnica muy eficiente y económica de implementar, es considerada una técnica biológica de filtrado ya que no utiliza ningún tipo de agente químico, sin embargo, al igual que la filtración convencional, presenta varias desventajas.

Primero requiere de una efectiva población del sedimento por parte de las colonias bacterianas quienes realizan el proceso de filtrado, lo cual puede tardar varios días.

Otra desventaja consiste en que requiere de un flujo moderado de agua, por lo que no maneja grandes cantidades de agua.

Por último, no permite adicionar ningún agente químico como por ejemplo el cloro, el cual es una sustancia esencial para garantizar los niveles de pureza necesarios para el consumo humano, lo anterior debido a que el cloro acabaría también tanto con los agentes patógenos, así como con la colonia bacteriana.

En la imagen 2.4 se muestra el proceso de filtrado con arena lenta.



Fig. 2.4. Filtración lenta con arena (Obtenida de [www.koshland-science-museum.org](http://www.koshland-science-museum.org))

- Filtración con bolsa y cartucho

Los filtros de bolsa y cartucho son sistemas sencillos y fáciles de operar que usan una bolsa tejida o un cartucho con un filtro de filamento, enrollado para restringir físicamente los microbios y sedimentos del agua fuente cuando esta pasa a través del medio filtrante (Sistemas de filtración, 2016).

La eficiencia de estos filtros depende en gran medida del material con el que están constituidos la bolsa o el cartucho, por si solos no eliminan color ni olor en el agua, además cuando los niveles de impurezas en el agua son muy altos, es necesario cambiar constantemente el material filtrante.

Otra desventaja que presentan los filtros de bolsa o cartucho, radica en que al pasar del tiempo las bacterias que habitan o se transportan en el agua, comienzan a poblar los materiales filtrantes, lo que obliga a reemplazar con frecuencia esta parte del filtro.

- Filtración de cerámica

Los filtros de cerámica se han utilizado para el tratamiento de agua durante varios siglos. No obstante que en la actualidad se comercializan para sistemas de tratamiento de agua centralizados, la mayoría de los filtros de cerámica ahora se fabrican para aplicaciones de punto de uso como son: pequeños filtros portátiles, filtros bajo tarja en la cocina, etc. En los países en vías de desarrollo estos se fabrican localmente algunas veces por una microempresa autofinanciada. Típicamente a estos dispositivos se les da la forma de maceta o tazón y se los impregna con diminutas partículas de plata coloidal como desinfectante y para prevenir el crecimiento de bacterias en el filtro. El filtro se asienta en un recipiente plástico o cerámico de 20 a 30 litros de capacidad con un grifo (Sistemas de filtración, 2016).

Los filtros de cerámica son muy económicos y fáciles de implementar, sin embargo, aún no se conoce su eficiencia contra virus, por lo que se recomienda complementarlos con alguna otra forma de filtrado.

La mayor desventaja que presentan estos filtros es el bajo caudal de apenas un par de litros por hora, por lo que no suelen ser la principal opción en sistemas de almacenamiento que maneja grandes volúmenes de agua.

En los párrafos anteriores se han estudiado los principales agentes filtrantes, utilizados en el tratamiento del agua destinada al consumo humano, sin embargo, existen muchos filtros derivados de los modelos anteriores o que mezclan más de una sola técnica en el mismo filtro, no obstante, resulta pertinente conocer la normatividad existente en materia de estándares de calidad del agua destinada para el consumo humano, lo anterior será de gran ayuda para conseguir los mejores resultados en el proceso de filtrado.

## **2.4 Normatividad existente para garantizar la calidad del agua potable**

Cabe señalar que después de analizar la información con la que se cuenta en este trabajo, se debe decidir si diseñar un filtro es la opción más viable, o seleccionar alguno que cumpla con nuestras exigencias, de entre los existentes en el mercado. Es muy probable que la segunda opción suponga un ahorro de tiempo y esfuerzo, por lo que ahora se revisarán las normas existentes para garantizar una óptima calidad en el agua potable, para que así se tenga la información necesaria para evaluar diferentes equipos de filtración de agua.

En el mercado existen un gran número de filtros que nos ayudan a mejorar la calidad del agua, sin embargo, hay varios factores que se deben considerar para hacer la

selección adecuada para alcanzar nuestro propósito, tales factores se encuentran especificados en la normatividad que rige la calidad que el agua para consumo humano debe cumplir. Dicha norma es conocida como NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO -LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION".

Esta norma tiene como principal objetivo el garantizar un nivel de calidad óptimo en el agua potable, para así evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y de cualquier tipo que se deriven de su consumo.

## 2.5 Principales agentes que merman la calidad del agua

- Contaminación biológica

Los contaminantes biológicos son aquellos microorganismos que pueden afectar nuestro sistema generando enfermedades. En esta categoría encontramos hongos, bacterias, virus, algas, etc.

La norma NOM-127-SSA1-1994 recomienda que, en el caso de existir contaminación biológica, se debe tratar utilizando cloro, ozono o luz ultravioleta.

El cloro es el químico más utilizado para desinfectar el agua, sin embargo, no elimina el 100% de los microorganismos además de que, en periodos prolongados de tiempo, los microorganismos destruidos por el cloro se descomponen generando nuevamente un gran número de agentes biológicos contaminantes en el agua.

La luz ultravioleta, emite longitudes de onda capaces de destruir el material genético de los organismos descartando la posibilidad de la reproducción y generando una muerte veloz en los organismos expuestos a ella. Sin embargo, al igual que el cloro no elimina los restos de los organismos destruidos, aunque tiene la ventaja de no adicionar agentes químicos al agua.

Por último, el proceso de ozonización destruye los microorganismos existentes en el agua y permite condiciones estériles por periodos de tiempo breves, aunque mayores a los métodos anteriores, el problema es que estos equipos suelen ser caros (NOM-127-SSA1-1994).

- Características físicas y organolépticas

En este punto nos referimos al olor, sabor, color y turbiedad del agua. Si bien en nuestros estudios primarios se nos inculca la idea de que el agua pura es inodora, incolora e insípida. Esto no es del todo cierto ya que, dependiendo de la región de procedencia, las sales minerales y otros factores, dan un sabor característico al agua. Por lo tanto, para garantizar que el agua se aproxime en mayor medida a estas condiciones ideológicas, la norma recomienda someter al agua a alguna de las siguientes técnicas: Coagulación, floculación, precipitación, filtración, absorción

en carbón activado u oxidación. Se puede aplicar una de estas técnicas o la combinación de ellas (NOM-127-SSA1-1994).



Fig. 2.5. Filtro compuesto (Obtenida de [www.profeco.gob.mx](http://www.profeco.gob.mx))

Cabe señalar que cualquiera de estas técnicas eliminaría los restos de microorganismos resultantes de la aplicación de cloro, luz ultravioleta u ozonización.

Ahora, para precisar una combinación entre los mecanismos de filtrado que sea la óptima, es necesario tomar en cuenta varias consideraciones. En primer lugar, las condiciones de lluvia en la Ciudad de México pues, aunque ofrecen precipitaciones pluviales a lo largo del año, también dan lugar a periodos secos en los que no hay presencia de lluvia. Este hecho es sin duda una limitante para algunos métodos de filtrado, como lo es la filtración con arena, ya que la colonia bacteriana que es fundamental para eliminar los restos de materia orgánica, no podría mantenerse con vida en los periodos secos.

Por otro lado, en los periodos secos el filtro permanecerá en un estado de inactividad, esto con la finalidad de no incrementar el consumo diario de luz en el hogar. Lo anterior nos lleva a la necesidad de un mecanismo de control que active el filtro cuando detecte lluvias y lo desactive en los periodos secos. Esto sin duda es una propuesta innovadora y práctica, ya que permite a los usuarios desatenderse del filtro, pero limita el uso de agentes químicos como el cloro que tendría que ser adicionado de forma manual.

Así pues, la tarea de seleccionar un filtro se vuelve cada vez más difícil, por lo que se ha decidido investigar sobre proyectos similares al que se propone en este trabajo, con la finalidad de analizar el cómo es que se ha dado solución a este problema.

## 2.6 Proyectos similares que operan en la actualidad

La escasez de agua en la Ciudad de México es un problema que ha impulsado a mucha gente con una visión humanista y de ayuda hacia su prójimo a desarrollar proyectos dirigidos a resolver esta problemática, uno de estos proyectos es:

- Isla Urbana.

Isla Urbana es una organización dedicada a desarrollar e implementar un modelo de captación de lluvia que se pueda adaptar a gran escala en la Ciudad de México. Isla Urbana es una asociación entre el Instituto Internacional de Recursos Renovables, AC, y Fundación Temo dedicados a desarrollar una solución al problema de agua en México.

“Isla Urbana es un proyecto dedicado a impulsar la captación de lluvia en México como respuesta a la insustentabilidad y crisis de agua, dando una solución a quienes sufren carencia o quieren volverse sustentables en agua.

En el 2009 se fundó Isla Urbana en la colonia Cultural Maya, área popular en el Ajusco, México Distrito Federal, con grave escasez de agua. Con un enfoque social y ambiental, gran parte de nuestro trabajo se ha realizado en zonas de bajos recursos, instalando sistemas de captación de lluvia en las comunidades. Se inició como un proyecto de asociación civil, en colaboración con el Instituto Internacional de Recursos Renovables AC (IRRI-México), y poco después se abrió un negocio dedicado a ofrecer productos y servicios al público en general.

Se tiene la creencia que la mejor manera para combatir la problemática de agua es masificando la captación de lluvia integrando el trabajo de un comercialmente sustentable negocio y un proyecto social. De esa manera será posible ofrecer soluciones innovadoras, sustentables, económicas y escalables al sector privado y a la vez con familias de bajos recursos.

Hoy, Isla Urbana continúa su labor social con IRRI México, mientras Isla Urbana-Productos y Servicios ofrece todo para captar agua de lluvia en cualquier tipo de inmueble” ([www.islaurbana.org](http://www.islaurbana.org)).

A continuación, se examinarán las opciones que Isla Urbana ofrece en materia de captación y filtrado de agua de lluvia, haciendo mención de los costos y equipos que se incluyen.

En la tabla 2.1 se encuentran enumerados los elementos que se incluyen en los distintos paquetes que isla urbana ofrece, cabe mencionar, que la numeración de los accesorios descritos en la tabla 2.1, corresponde con los números que aparecen en las figuras 2.6 – 2.8.

Número	Nombre del elemento
1	Filtro de hojas de acero inoxidable
2	Tlaloque
3	Reductor de tuberías
4	Pichancha flotante
5	Tren de filtrado
6	Desinfección
7	Potabilización bajo la tarja de la cocina

Tabla 2.1 Elementos que componen los paquetes de Isla Urbana.

### 1. Kit Oro

Sistema de captación de lluvia 100% potable con KDF, iones de plata y luz ultravioleta, este paquete incluye todos los elementos que se mencionan en la tabla 2.1, por lo que se considera el paquete más completo y que ofrece una mejor calidad en el agua almacenada.

Costo del paquete \$18,100.



Fig. 2.6. Kit Oro para captación de lluvia (Isla Urbana, 2011)

### 2. Kit Plata.

Sistema de captación de lluvia para uso doméstico.

Incluye Tlaloque con filtro de hojas de acero inoxidable, pichancha flotante, reductor de tubería, filtro std 20, carbón block, filtro Amiad 50 micras 3/4', dosificador de cloro Acualim para 6 meses, cisterna de almacenamiento de 5000l manual y DVD de mantenimiento.

Costo del paquete \$12,300.

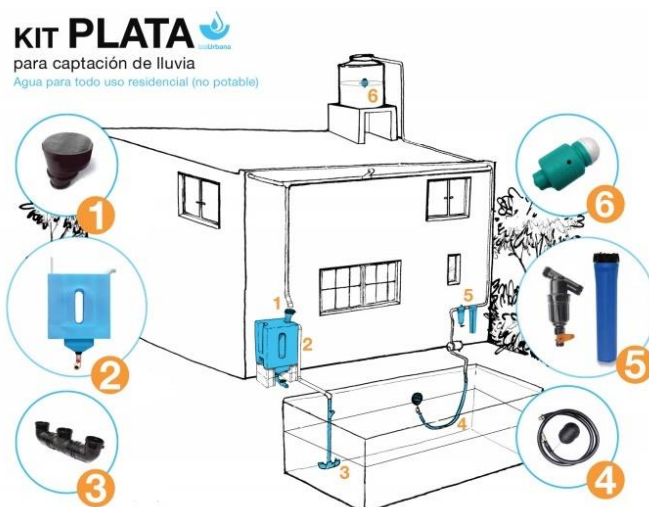


Fig. 2.7. Kit Plata para captación de lluvia (Isla Urbana, 2011)

### 3. Kit Bronce.

Sistema de captación de lluvia para uso de riego.

Incluye Tlaloque con filtro de hoja, reductor de tubería, pichancha flotante y cisterna de almacenamiento de 5000l.

Costo del paquete \$9,650.

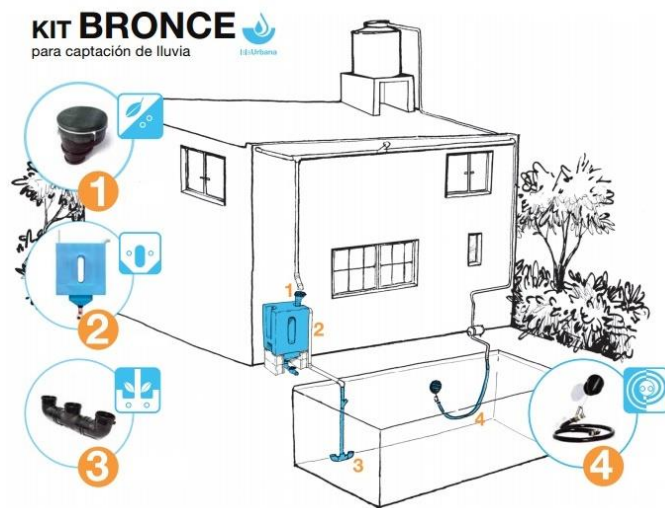


Fig. 2.8. Kit Bronce para captación de lluvia (Isla Urbana. 2011)

La industria es uno de los sectores que más recursos consume e igualmente quien más los desperdicia y en materia de agua no es la excepción, por lo tanto, en este ámbito también existen proyectos enfocados en el aprovechamiento del agua de lluvia, uno de ellos el presentado por Soluciones Hidropluviales.

- Soluciones Hidropluviales

“En Soluciones Hidropluviales se distribuyen equipos especializados que aseguran una gestión integral del agua de lluvia. La tecnología que se ofrece garantiza el mejor tratamiento primario de escurrimientos pluviales para grandes volúmenes y en amplias extensiones de captación, como pueden ser proyectos para la industria, centros comerciales, desarrollos habitacionales y municipales. Se realiza un servicio integral que incluye el análisis de las posibilidades de aprovechamiento del agua de lluvia dependiendo de las condiciones hidrológicas, características del proyecto y las necesidades específicas del cliente.

Se utiliza la infraestructura existente y después de un proceso de limpieza, se puede aprovechar el agua de lluvia para diversos usos y procesos. Promoviendo el ahorro de agua a la vez que se evitan los problemas generados por inundaciones.

Se ofrecen tecnologías y servicios especializados para captar, separar, almacenar y filtrar el agua de lluvia. Los sistemas que se ofrecen aseguran la disponibilidad y calidad del agua” (Sistemas Hidropluviales, 2016).



Fig. 2.9. Sistema de filtrado para la industria (Sistemas Hidropluviales, 2016)

En Soluciones Hidropluviales, no se cuentan con opciones para pequeñas viviendas, además de que los costos de sus productos son muy elevados ya que están destinados a la industria, por lo tanto, este proyecto no se ajusta a los objetivos que en este estudio se pretenden.

Analizando la información anterior, el trabajo de Isla Urbana se ajusta más a lo que este estudio pretende, sin embargo, solo el kit oro garantiza que el agua de lluvia recuperada sea potable, ya que incluye varias etapas de filtración. En primer lugar, tiene lo que ellos denominan Tlaloque; que es un contenedor que permite separar los primeros litros de agua que se producen en un día lluvioso, los cuales vienen

más contaminados ya que la superficie que capta el agua puede estar sucia y los primeros litros de lluvia arrastraran estos contaminantes.

En segundo lugar, incluye un filtro BB 20, con KDF el cual es un material filtrante que elimina microorganismos y metales pesados contenidos en el agua. También incluye carbón granular, que igualmente absorbe impurezas en el agua.

En tercer lugar, incluye un dosificador de cloro, que como ya hemos mencionado, sirve para matar microorganismos.

Encontramos también una cuarta etapa de filtración, compuesta por un dispositivo formado por un material poroso que impide que partículas mayores a 50 micras pasen a través de él.

Por último, contiene un filtro de 3 etapas, constituido por sedimentos, carbón y una lámpara UV.

Pese a los beneficios que aporta este kit, su costo es muy elevado, además requiere de un mantenimiento periódico, lo que incrementará los costos del sistema.

Por lo anterior, se infiere que el sistema de filtrado sugerido en este proyecto debe ser tan eficiente como el propuesto por Isla Urbana, pero con un costo menor para los consumidores, pudiendo así tener una mayor penetración en los sectores vulnerables de la sociedad. Lo anterior no es algo con lo que no se esté listo para lidiar, ya que toda esta investigación ha sido solo la antesala para presentar los objetivos que este trabajo pretende cumplir.

Pues si bien es cierto que el principal objetivo de este proyecto es captar la mayor cantidad de agua posible en cada día lluvioso. No es esta una frontera que limite el potencial de esta investigación, por consiguiente cabe señalar, que se pretenden aprovechar todas las ventajas que un mundo tecnológicamente desarrollado ofrece, valiéndose así de un sistema de control que dirija todas las posibles acciones que el filtro deba ejecutar para sortear cualquier eventualidad, permitiendo con esto que el usuario no necesite estar presente en cada parte del proceso de captación y purificación del agua de lluvia, dando pie a que el sistema sea autónomo.

A continuación, se muestra la lista de tareas que se ha propuesto que este sistema realice.

## **2.7 Propuesta del sistema de investigación**

En primer lugar, el filtro iniciara su labor por acción directa de la gravedad, esto quiere decir que estará conectado a una tubería que transportará el agua de lluvia que se almacene en las azoteas hacia el sistema purificador. A continuación, un filtro colocado en la parte baja de la casa se encargará de dar un primer tratamiento al vital líquido. Para garantizar una buena calidad en el proceso de filtrado es necesario que el agua circule a través del filtro controlado vía remota en un par de

ocasiones, por lo tanto se incluirá un tanque menor que fungirá como un primer depósito permitiendo así contener el agua que ya ha iniciado con su proceso de filtración, esto presenta un primer problema ya que la simple acción de la gravedad no hará que el agua recircule por el filtro inalámbrico las veces que sean necesarias, es por esto que será indispensable incluir un sistema de bombeo que realice esta labor, el cual será operado por el sistema de control.

El circuito encargado del control del filtro inalámbrico estará basado en un microcontrolador, el cual será el encargado de procesar toda la información que entre o salga del sistema, dependiendo de esta información, activará o no el sistema de bombeo, en la figura 2.10 se muestra un diagrama a bloques que ejemplifica como el microcontrolador será el centro del sistema de filtrado.

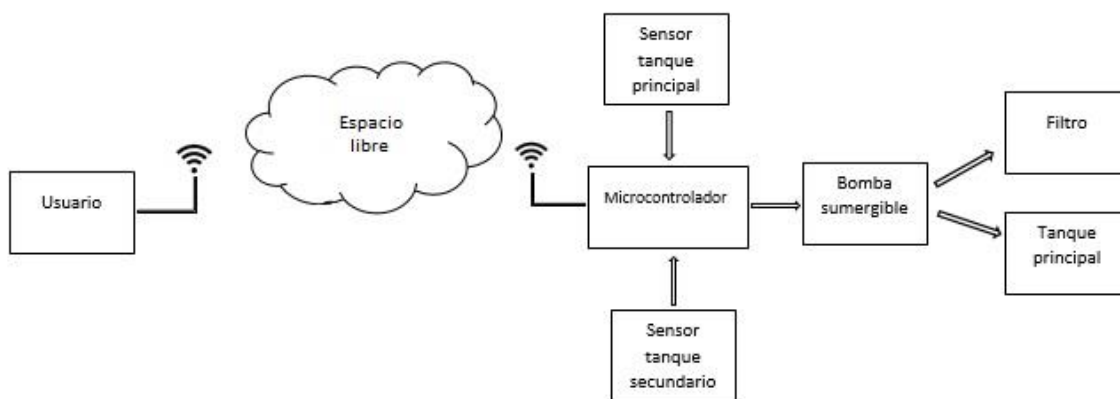


Fig. 2.10. Microcontrolador enviando y recibiendo información.

El microcontrolador se encargará de ejecutar las siguientes tareas:

- El sistema de filtrado se conectará a la red local del usuario permitiéndole interactuar con él de forma inalámbrica.
- Recibirá una señal que le indique cuando el tanque menor se ha llenado y ofrecerá al usuario la opción de recircular el agua las veces que sean necesarias para garantizar que ha alcanzado la calidad necesaria para ser empleada en las labores domésticas.
- Mostrará en una página web, el estatus del sistema de filtrado y un menú con al menos las siguientes opciones:
  1. Drenar el tanque principal.
  2. Enviar el agua al tanque mayor o principal.
  3. Detener cualquier proceso.
- Si el usuario selecciona la opción 2, pero el tanque principal se encuentra lleno a su máxima capacidad el microcontrolador recibirá una señal ponderada, por lo que no atenderá la instrucción y además enviará un nuevo mensaje que comunique al usuario dicha situación.
- Si el usuario selecciona la opción 2 y el microcontrolador no tiene impedimentos para ejecutar esa instrucción, entonces se activará un

mecanismo que trasladará el agua filtrada del tanque menor al ataque mayor. Sin embargo, si durante este proceso el microcontrolador recibe la señal de que el tanque principal está lleno a su máxima capacidad, deberá interrumpir de forma inmediata el traslado del agua (en este caso no será necesario que se informe al usuario de esta situación).

- Si el proceso de filtrado fue interrumpido por causa de que el tanque principal está lleno, y si pasado un tiempo el microcontrolador recibe una señal que le indica que el tanque principal ya se ha vaciado, el microcontrolador podrá activar de manera autónoma el mecanismo para continuar con el traslado del agua hacia el tanque principal.
- Si el microcontrolador informa al usuario que el proceso de filtrado ha terminado y el usuario por algún motivo no ve el mensaje o no proporciona al microcontrolador instrucción alguna, entonces el microcontrolador evaluará sus entradas para determinar la siguiente acción, por ejemplo, si recibe la señal de que el tanque principal está vacío. En este caso activará el mecanismo de bombeo, para transportar el agua del tanque secundario al tanque principal.
- Si el proceso de traslado del agua se ve interrumpido por un corte de luz, el microcontrolador analizará sus variables de entrada a través de los sensores para determinar la acción a seguir.
- El usuario debe poder estar informado de cada paso del proceso de filtrado, cuando así lo desee.

Ahora, para que el microcontrolador pueda cumplir con la lista de tareas que se le han encomendado, necesita apoyarse en un conjunto de sensores que serán los encargados de proporcionarle la información necesaria para que pueda seleccionar el camino que seguirá. También requiere de una bomba que será la encargada de circular el agua a través del filtro y hacia el tanque principal.

Para seleccionar los equipos y accesorios adecuados para alcanzar los objetivos propuestos, se ha de realizar una investigación en el mercado, que permita conocer cuáles son los equipos que se encuentran disponibles y sus costos. La finalidad de este estudio es comparar los productos de al menos dos proveedores, evaluando funcionalidad y precio. Esto también ayudará a generar un presupuesto base, con el cual será posible equiparar este sistema de filtrado con los mencionados anteriormente y determinar si el que aquí se propone es competitivo y viable, sin perder de vista otro objetivo casi tan importante como el principal, que es convertir este proyecto en una opción que esté al alcance de todo público, en particular de la gente de bajos recursos.

Sin embargo, para poder iniciar con dicha comparativa, es necesario fijar la cantidad de elementos necesarios para construir e instalar el sistema de filtrado descrito, en una vivienda promedio<sup>1</sup>.

En la figura 2.10 se muestra un esquema que ilustra de forma gráfica, el sistema de filtrado propuesto en este proyecto una vez que se haya instalado en una vivienda.

Debe entenderse que el sistema de filtrado, está diseñado para ser instalado en la parte externa de la vivienda, así como también lo hacen las tuberías, salvo aquellas excepciones en las cuales el tanque principal o sistema de almacenamiento de la casa se encuentre dentro de la misma; en este caso las tuberías podrán instalarse parcialmente dentro de la casa, con la finalidad de interconectar al tanque de almacenado del filtro con el tanque principal.

A continuación, la figura 2.10 muestra un diagrama que servirá como apoyo para determinar el número de elementos que conformaran al sistema de filtrado y almacenamiento de agua de lluvia controlado vía remota, estudio de este proyecto.

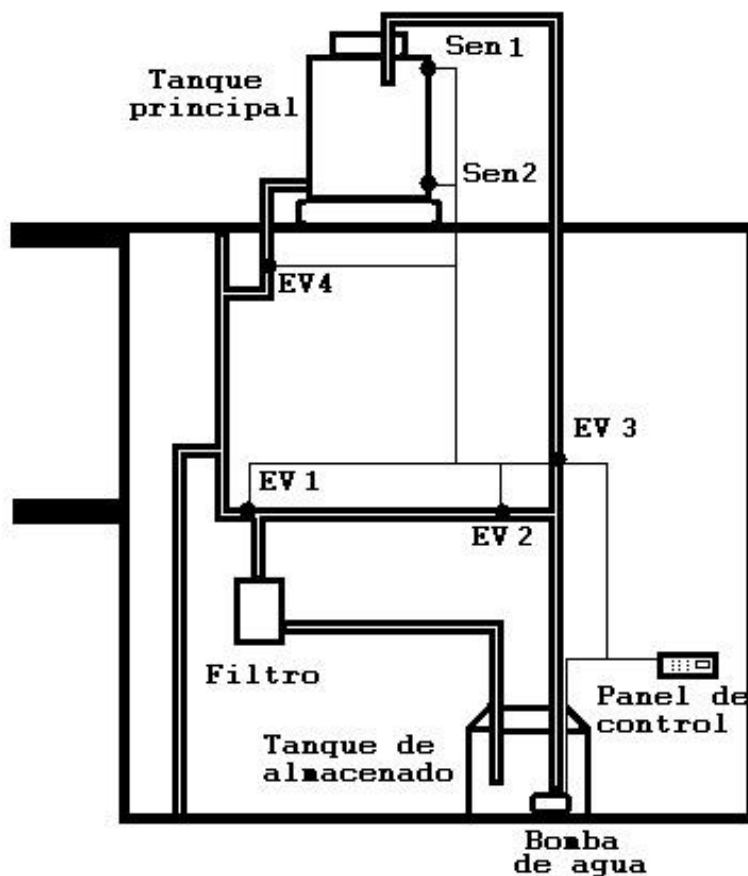


Fig. 2.11. Sistema de filtrado.

<sup>1</sup> Como vivienda promedio se ha seleccionado una casa de 2 pisos. Sin embargo, el sistema de filtrado será capaz de adaptarse a espacios más pequeños o más grandes según se requiera.

En la figura 2.10 EV 1, EV 2, EV 3 y EV 4 representan las electroválvulas que permitirán o no el flujo del agua desde diferentes puntos del sistema inalámbrico de filtrado, esto ayuda para poder dirigir el flujo de agua por el camino correcto, según la tarea que se requiera cumplir.

Por otro lado, Sen1 y Sen 2 son los nombres con los que se han denominado a los sensores de nivel de líquidos, que permitirán conocer el nivel de agua en el tanque principal, esta información es importante en la toma de decisiones del sistema inalámbrico de filtrado.

También se observa que dentro del tanque de almacenamiento se encuentra la bomba que tendrá como primera función trasladar el agua de este tanque al tanque principal, pero también tiene una segunda función, pues será la encargada de recircular el agua almacenada por el filtro las veces que sean necesarias para garantizar que el agua alcance un nivel óptimo de pureza para el consumo humano.

Por el momento se omiten los detalles de programación y demás herramientas necesarias para conseguir que el sistema inalámbrico de filtrado realice las tareas encomendadas y por cuestiones prácticas se dará por hecho que el sistema inalámbrico funciona y ejecuta de forma correcta cada instrucción asignada por el usuario o las que se deriven de la información que arribe a las entradas del microcontrolador. De tal forma que se centrará la atención en el cómo será posible la comunicación entre el usuario y el sistema.

## Capítulo 3

### Características del estándar IEEE 802.11

Mucho se ha hablado en este proyecto de un sistema de filtrado controlado vía remota, pero aún no se ha determinado como será posible cumplir con este propósito. El INEGI en colaboración con el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), en su estudio “*Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares*”, dieron a conocer que, en el 2017, se registraron 71.3 millones de usuarios de internet y se estima que esta cifra seguirá en aumento para el 2018. Haciendo uso de esta información, se puede proponer una solución eficiente para conseguir el propósito de tener un sistema de control inalámbrico. Básicamente lo que se pretende es conectar el sistema de control del filtro a la red local del usuario, de esta forma, el usuario podría a través de la Internet, acceder al control del filtro y enviar instrucciones desde cualquier punto con acceso a la red. Por lo anterior se fijará la atención en analizar las tecnologías que permiten conectar un dispositivo a una red local, se iniciara con este estudio analizando el protocolo IEEE 802.11 (WiFi), que describe el funcionamiento de las redes inalámbricas y permite conocer los procesos involucrados en la transmisión de datos entre sistemas inalámbricos.

#### 3.1 Introducción a las Redes de Área local (LAN)

Una red LAN consiste en un medio de transmisión compartido y un conjunto de software y hardware para servir de interfaz entre dispositivos y el medio. También se encarga de regular el orden de acceso al mismo. Las topologías usadas para LAN son anillo, bus, árbol y estrella. Las topologías en bus y en árbol son secciones pasivas de cable a las que se encuentran conectadas las estaciones, de modo que la transmisión de una trama por parte de una estación puede ser escuchada por cualquier otra estación. Una LAN en anillo consiste en un bucle cerrado de repetidores que permite la circulación de los datos alrededor del anillo. Un repetidor puede funcionar también como un punto de conexión de dispositivo, realizándose la transmisión generalmente en forma de tramas. Por su parte, una red LAN en estrella incluye un nodo central al que se conectan las estaciones (CISCO System Inc., 2006).

Los medios de transmisión empleados en redes LAN pueden ser: el par trenzado, cable coaxial, fibra óptica y medios no guiados como el aire o el vacío. Por lo que se refiere a los pares trenzados, éstos pueden ser tanto blindados como no blindados, utilizándose para la transmisión inalámbrica infrarrojos o microondas (CISCO System Inc., 2006).

### 3.1.1 Arquitectura LAN y protocolos

La arquitectura LAN se describe mejor en términos de una jerarquía de protocolos que organizan las funciones de la misma. Cuando hablamos de topologías aunadas al tema de redes, podemos pensar en ellas como la forma en cómo se encuentran interconectados los sistemas finales entre sí. Describen la estructura que tiene la red y definen los protocolos que permiten el tránsito de información a través de ella (Stalling, W., 2004).

#### Arquitectura de protocolos

Los protocolos definidos específicamente para la transmisión en redes LAN y MAN definen los procesos involucrados con la transmisión de bloques de datos a través de la red. Según OSI, los protocolos de capas superiores (capas 3 o 4 y superiores) son independientes de la arquitectura de red y son aplicables a redes LAN, MAN y WAN. Así pues, el estudio de protocolos LAN está relacionado con las capas inferiores del modelo OSI.

En la figura 3.1 se relacionan los protocolos LAN de la arquitectura OSI. Esta arquitectura fue desarrollada por el comité IEEE 802 y ha sido adoptada por todas las organizaciones que trabajan en la especificación de los estándares LAN (CISCO System Inc., 2006).

Desde abajo hacia arriba, el protocolo IEEE 802 opera sobre la capa física del modelo OSI, e incluye funciones tales como:

- Codificación/decodificación de señales
- Generación/eliminación de preámbulo (para sincronización)
- Transmisión/recepción de bits.

Además, la capa física del modelo 802 incluye una especificación del medio de transmisión y de la topología. Generalmente, esto se considera debajo de la capa inferior del modelo OSI; sin embargo, dado que la elección del medio de transmisión y la topología es crítica en el diseño de redes LAN, se incluye una especificación del medio.

Por encima de la capa física se encuentran las funciones asociadas a los servicios ofrecidos a los usuarios LAN. Entre ellas se encuentran las siguientes:

- En transmisión, ensamblado de datos en tramas con campos de dirección y detección de errores
- En recepción, desensamblado de tramas, reconocimiento de dirección y detección de errores
- Control de acceso al medio de transmisión LAN
- Interfaz con las capas superiores y control de errores y de flujo

Estas funciones se asocian generalmente a la capa 2 de OSI. El conjunto de funciones del último punto de los cuatro indicados se agrupan en la capa de control de enlace lógico (LLC, *logical link control*), mientras que las funciones especificadas en los tres primeros puntos se tratan en una capa separada denominada control de acceso al medio (MAC, *mediun access control*). Esta separación de funciones se debe a las siguientes razones:

- La lógica necesaria para la gestión de acceso a un medio compartido no se encuentra en la capa 2 de control de enlace de datos tradicional.
- Se pueden ofrecer varias opciones MAC para el mismo LLC.

En la figura 3.1 se ilustra la relación existente entre los niveles de la arquitectura. Los datos de nivel superior se pasan hacia abajo al nivel LLC, que añade una cabecera de información de control dando lugar a una *unidad de datos de protocolo (PDU, Protocol Data Unit)* LLC. Esta información de control se utiliza para el funcionamiento del protocolo LLC. La PDU LLC se pasa a la capa MAC, que añade información de control al principio y al final del paquete creando una trama MAC. Una vez más es necesaria la información de control en la trama para el funcionamiento del protocolo MAC. Para situarnos en contexto, la figura 3.1 muestra también el uso del protocolo TCP/IP y una capa de aplicación por encima de los protocolos LAN (Stalling, W., 2004).

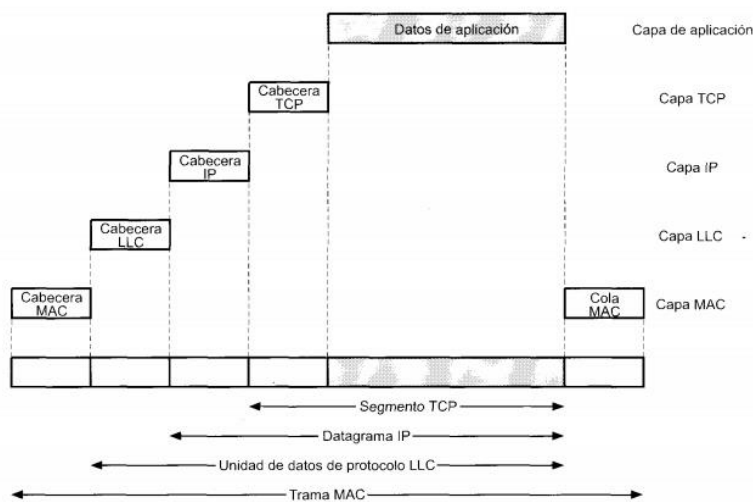


Fig. 3.1. Protocolos LAN en contexto (Stalling, W., 2004).

### 3.1.2 Topologías

A continuación, centraremos el estudio en una reseña sobre las topologías LAN básicas para la capa física. Las topologías usuales en LAN son bus, árbol, anillo y estrella. El bus es un caso especial de la topología en árbol, con un solo tronco y sin ramas; se usará el término *bus* cuando las diferencias no sean importantes (Stalling, W., 2004).

- Topologías en bus y en árbol

Ambas topologías se caracterizan por el uso de un medio multipunto. En el caso de la topología en bus, todas las estaciones se encuentran directamente conectadas, a través de interfaces físicas apropiadas conocidas como tomas de conexión (taps), a un medio de transmisión lineal o bus. El funcionamiento *full-duplex* entre la estación y la toma de conexión permite la transmisión de datos a través del bus y la recepción de estos desde aquél. Una transmisión desde cualquier estación se propaga a través del medio en ambos sentidos y es recibida por el resto de estaciones. En cada extremo del bus existe un terminador que absorbe las señales, eliminándolas del bus (Stalling, W., 2004).

En esencia la topología de árbol es una generalización de la topología de bus, las principales desventajas; en primer lugar, existe una alta posibilidad de colisiones, en segundo lugar, todos los equipos en la red pueden recibir la transmisión por lo que hay que definir de alguna forma al destinatario.

- Topología en anillo

En la topología en anillo, la red consta de un conjunto de repetidores unidos por enlaces punto a punto formando un bucle cerrado. El repetidor es un dispositivo capaz de recibir datos a través del enlace y transmitirlos, bit a bit, a través del otro enlace tan rápido como son recibidos. Los enlaces son unidireccionales; es decir, los datos se transmiten sólo en un sentido, de modo que estos circulan alrededor del anillo en el sentido de las agujas del reloj o en el contrario. Cada estación se conecta a la red mediante un repetidor, transmitiendo los datos hacia la red a través de él (Stalling, W., 2004).

En este caso un problema puede ser el tiempo en que la red se mantiene ocupada, pues cuando un equipo envía datos a través del medio, estos viajan por toda la red o anillo hasta que regresan al equipo origen para ser eliminados, un segundo problema, es el hecho de que solo se pueda transmitir en un sentido.

- Topología en estrella

En redes LAN con topología en estrella cada estación está directamente conectada a un nodo central, generalmente a través de dos enlaces punto a punto, uno para transmisión y otro para recepción, esta configuración permite alcanzar mayores velocidades, el nodo central recibe todos los paquetes, los procesa y los dirige hacia el equipo receptor, esto es posible ya que cada equipo tiene asignada una dirección que es única dentro de la red (Stalling, W., 2004).

En la figura 3.2 se aprecian las diferentes topologías usadas dentro de una red LAN, siendo la topología de estrella una de las más usadas en la actualidad.

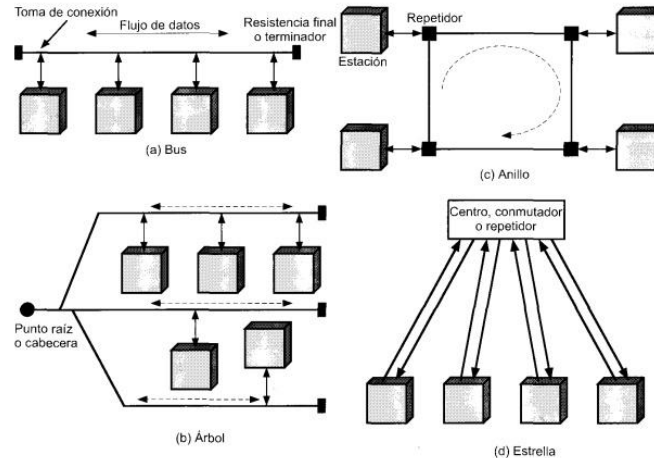


Fig. 3.2. Topologías LAN (Stalling, W., 2004).

### 3.2 Redes de Área Local Inalámbricas (WLAN)

En una red WLAN, el principal medio de transmisión es el espacio libre, aunque es posible encontrar combinaciones entre redes LAN y WLAN. El beneficio que se puede exaltar de este tipo de redes conocidas como redes WLAN, es el bajo costo de instalación que tienen al compararlo con el costo de instalación de una red cableada, pero aun esta característica no es razón suficiente para pensar que una red WLAN es mejor o más conveniente que una red LAN, ya que las velocidades que permiten los medios inalámbricos son inferiores a las que un medio de transmisión físico ofrece, esto es porque la tasa de transmisión se relaciona con el ancho de banda y existen medios guiados como la fibra óptica, cuyo ancho de banda se considera infinito.

Sin embargo, la popularidad de las redes WLAN va en aumento, pues al parecer características atractivas como una alta velocidad de transmisión, puede ser fácilmente sustituida por la movilidad que una red inalámbrica ofrece.

En términos sencillos, una WLAN hace exactamente lo que su nombre implica: proporciona todas las características y ventajas de las tecnologías LAN tradicionales, como Ethernet y Token Ring, pero sin las limitaciones que suponen los hilos o cables. Así las WLAN redefinen la visión que la industria tiene de las LAN. La conectividad ya no implica estar “atado” a algo. Las distancias ya no se miden en metros, kilómetros. La necesidad de una infraestructura no queda enterrada en el suelo u oculta detrás de paredes. La infraestructura se puede mover o cambiar con la empresa (CISCO System Inc., 2006).

Las WLAN utilizan un medio, de transmisión, al igual que las LAN cableadas. Pero, en lugar de utilizar cable de par trenzado o de fibra óptica, las WLAN utilizan luz infrarroja (IR) o radiofrecuencias (RF). La RF es mucho más popular debido a su

mayor alcance, mayor ancho de banda y cobertura más amplia. Las WLAN utilizan las bandas de frecuencia 2.4 y 5 gigahertz (GHz). Estas porciones del espectro de RF están reservadas en casi todo el mundo para los dispositivos sin licencia. Las redes inalámbricas proporcionan la libertad y la flexibilidad de operar dentro y entre edificios (CISCO System Inc., 2006).

Sin embargo, existen muchas personas que afirman que las redes puramente inalámbricas no existen, ya que por lo general los enlaces inalámbricos terminan en una red cableada, por lo que se considera que las redes inalámbricas no son más que una extensión de una red LAN.

Ventajas de una red WLAN:

- Movilidad
- Flexibilidad
- Ahorro de costos a corto y largo plazo
- Ventajas de instalación
- Fiabilidad en entornos complejos
- Reducción del tiempo de instalación

Las WLAN tienen muchas ventajas para los entornos domésticos, empresas pequeñas, empresas medianas, redes de campus y grandes empresas. Los entornos que probablemente se beneficiarán de una WLAN tienen las siguientes características:

- Requieren velocidades estándar LAN Ethernet a 10 Mbps
- Se benefician de los usuarios en movimiento
- Se expanden rápidamente
- Utilizan una conexión a internet de banda ancha
- Se enfrentan a dificultades importantes al instalar LAN cableadas
- Necesitan conexiones entre dos o más LAN en un área metropolitana
- Requieren LAN y oficinas temporales

Las WLAN no eliminan la necesidad de los proveedores de servicios de internet (ISP). La conectividad a internet todavía requiere unos contratos de servicio con los proveedores locales (LEC, *Local Exchange Carrier*) o ISP que garanticen el acceso a internet. La tendencia actual es que los ISP proporcionen el servicio inalámbrico a internet. Estos ISP se denominan proveedores de servicios de Internet inalámbricos (WISP, *Wireless Internet Service Providers*). Además, las WLAN no reemplazan a la necesidad de los servidores, switches y routers cableados tradicionales de una LAN típica.

Aunque las WLAN están diseñadas principalmente como dispositivos LAN, se pueden utilizar para proporcionar una conectividad "sitio a sitio" a distancias superiores a los 40 km (25 millas). El uso de dispositivos WLAN resulta mucho más económico que utilizar ancho de banda WAN o cualquier otra instalación

de grandes tendidos de fibra. Por ejemplo, la instalación de una WLAN entre dos edificios incurre en un único costo de varios miles de dólares. Un enlace T1 alquilado y dedicado, que únicamente proporciona una fracción del ancho de banda de una WLAN, cuesta fácilmente cientos de dólares USA o más al mes. La instalación de fibra a una distancia superior a 1.6 km (1 milla) es compleja y podría costar más que una solución inalámbrica. Por desgracia no hay garantía de una conectividad inicial o futura inalámbrica a cualquier distancia (CISCO System Inc., 2006).

### 3.2.1 Evolución de las WLAN

Las primeras tecnologías WLAN eran de baja velocidad y ofrecían de 1 a 2 Mbps. A pesar de estas limitaciones, la libertad y la flexibilidad que ofrece la tecnología inalámbrica permitieron que estos productos encontraran un lugar en los mercados verticales. Los trabajadores móviles utilizaban los dispositivos portátiles para administrar los inventarios y recopilar datos en los comercios y los almacenes. Más tarde, los hospitales aplicaron la tecnología para obtener y distribuir la información de los pacientes. De hecho, muchas de estas tecnologías inalámbricas “pre-estándar” todavía se siguen utilizando porque los dispositivos que recopilan los datos no requieren velocidades de datos altas.

A medida que las computadoras fueron ganando terreno en las aulas y las oficinas, los colegios y las empresas empezaron a instalar redes inalámbricas para evitar los costos de un cableado al tiempo que habilitan el acceso compartido a internet. Al darse cuenta de la necesidad de un estándar del tipo de Ethernet, los fabricantes de tecnología inalámbrica se asociaron en 1991 y formaron la Alianza para la Compatibilidad de Ethernet Inalámbrica (WECA, *Wireless Ethernet Compatibility Alliance*). La WECA propuso y construyó un estándar basado en las tecnologías cooperantes. Más tarde la WECA cambió su nombre por el de Wi-Fi Alliance (Alianza Wi-Fi). En junio de 1997, el IEEE hizo público el estándar 802.11 para las redes inalámbricas de área local (CISCO System Inc., 2006).

Lo mismo que los estándares 802.3 Ethernet, permiten la transmisión de datos por cable de par trenzado o coaxial, los estándares 802.11 WLAN, permiten la transmisión de datos por el aire.

Las tecnologías que se utilizan para WLAN son las siguientes:

- Luz IR
- Tres tipos de radiotransmisión dentro de las bandas de frecuencia de 2.4 GHz sin licencia:
  - Espectro disperso por salto de frecuencia (**FHSS**, *Frequency Hopping Spread Spectrum*)
  - Espectro disperso de secuencia directa (**DSSS**, *Direct Sequence Spread Spectrum*)802.11g

- OFDM (Multiplexación por división de frecuencia ortogonal, *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*)
- Un tipo de transmisión por radio dentro de las bandas de frecuencia de 5 GHz sin licencia:
  - 802-11a OFDM

El espectro disperso es una técnica de modulación que se desarrolló en la década de 1940. Consiste en dispersar una señal de transmisión por un intervalo amplio de radiofrecuencias. Esta técnica es ideal para las comunicaciones de datos porque es menos susceptible de sufrir el ruido ocasionado por la interferencia de potencia finita de la señal de radio y provoca poca interferencia.

De las tecnologías de señalización disponibles, las que más ventajas ofrecen son DSSS y OFDM. Muy pocos fabricantes, si hay alguno, ofrecen productos WLAN basados en IR o FHSS. Uno sólo puede imaginarse las próximas tecnologías de señalización que ofrecerán velocidades en el rango del gigabit. (CISCO System Inc., 2006)

#### El futuro de las WLAN

Las tecnologías WLAN actuales ofrecen un aumento en las velocidades de datos, mayor fiabilidad y reducción de costos. La velocidad de los datos ha aumentado de 1 a 54 Mbps, cierta interoperabilidad se ha hecho realidad con la introducción de la familia de estándares IEEE 802.11, y los precios se han reducido drásticamente. Al hacerse las WLAN más populares, los fabricantes pueden potenciar cada vez más las economías de escala.

Se han producido muchas mejoras recientemente. El estándar 802.11g, operativo en la frecuencia de 2.4 GHz, ofrece ahora 54 Mbps al igual que el 802.11a y es compatible retroactivamente con el estándar 802.11b. Ha habido muchas mejoras. Por ejemplo, el estándar 802.11i se encargará de muchos temas de seguridad. La Calidad de Servicio (QoS), que es crucial para las aplicaciones de voz y vídeo, será posible con la ratificación 802.11e. La interoperabilidad entre los distintos fabricantes de dispositivos WLAN será posible con el estándar 802.11f.

Hoy en día la movilidad representa una parte importante de nuestro estilo de vida, por lo que resulta esencial para el éxito de este proyecto, que nuestro sistema no restrinja al usuario el salir cuando el equipo este trabajando. Por esta razón se propone que el mecanismo de control sea capaz de comunicarse con el sistema de filtrado de forma inalámbrica, lo que permitirá al usuario estar al tanto del proceso de purificación aun cuando no se encuentre presente ante el equipo (CISCO System Inc., 2006).

### 3.2.2 Perturbaciones en la Transmisión

En un enlace inalámbrico el medio de transmisión es el espacio libre y es precisamente la ausencia de guías artificiales lo que hace tan atractivo a este tipo de comunicación, sin embargo, el hecho de que no existan las guías artificiales no supone que la señal esté libre de sufrir perturbaciones tal y como ocurre en los medios guiados.

En un sistema inalámbrico las principales afectaciones a la señal son la atenuación, el ruido, la interferencia y los desvanecimientos. A continuación, se tratarán de forma breve cada uno de estos fenómenos.

- Atenuación

La energía de las señales decae con la distancia en cualquier medio de transmisión. En medios no guiados la atenuación es una función más compleja de la distancia y dependiente a su vez de las condiciones atmosféricas, a partir de cierta distancia la atenuación resulta inaceptable, lo que requiere la utilización de repetidores (Stalling, 2004).

Las ondas electromagnéticas pueden propagarse en el vacío sin pérdidas, ya que no existen partículas suspendidas que puedan absorber parte de la energía de estas ondas, sin embargo, al alejarse de la fuente las ondas electromagnéticas se dispersan, dando como resultado una disminución en la densidad de potencia.

En la ecuación 3.1 se enuncia la ley del cuadrado inverso de la radiación, con ella se describe en forma matemática la reducción de densidad de potencia con la distancia a la fuente. A medida que se aleja un frente de onda de la fuente, el campo electromagnético continuo que irradia la fuente se dispersa. Esto es, las ondas se alejan cada vez más entre sí y, en consecuencia, la cantidad de ondas por unidad de área es menor. No se pierde o se disipa nada de la potencia irradiada, porque el frente de onda se aleja de la fuente; la onda solo se extiende, o se dispersa, sobre un área mayor y disminuye la densidad de potencia. La reducción de densidad de potencia con la distancia equivale a una pérdida de potencia a la cual se le llama atenuación de la onda (Tomasi, 2003).

$$I = \frac{S}{4\pi r^2} \quad \text{Ec ... (3.1)}$$

*donde:*

$I$  = Intensidad en la superficie

$S$  = Intensidad de la fuente

$r$  = Distancia a la fuente

Sin embargo, el comportamiento de las ondas electromagnéticas dentro de la atmósfera terrestre es un tanto diferente al que tienen en el vacío, por lo que, al hablar de atenuación en un espacio no libre, es necesario tomar algunas consideraciones.

La atmósfera terrestre está formada por átomos y moléculas de sustancias gaseosas, líquidas y sólidas. Algunos de estos materiales pueden absorber las ondas electromagnéticas. Cuando una onda electromagnética se propaga a través de la atmósfera terrestre, se transfiere energía de la onda a los átomos y moléculas atmosféricos. Una vez absorbida la energía se pierde para siempre, y causa una atenuación en las intensidades de voltaje y campo magnético, y una reducción correspondiente de densidad de potencia (Tomasi, 2003).

En la figura 3.3 se muestra la gráfica que representa la absorción atmosférica que sufren las ondas electromagnéticas. Gráficamente se observa que a medida que aumenta la frecuencia, las ondas electromagnéticas son más susceptibles a las pérdidas debidas al vapor de agua, este hecho se puede verificar cuando en un día lluvioso la señal de la televisión de paga se ve interrumpida a causa de la lluvia e incluso el proveedor del servicio envía un mensaje anunciando que la señal se reestablecerá cuando la lluvia cese.

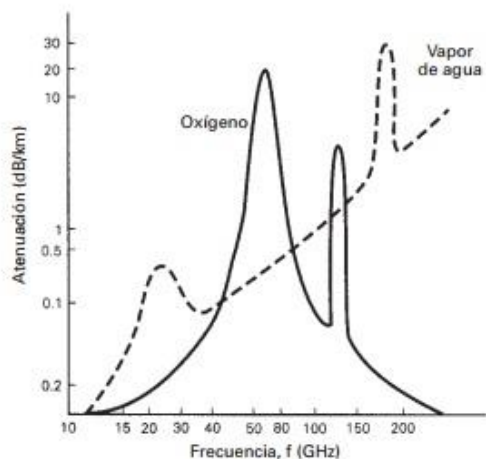


Fig. 3.3. Absorción atmosférica de las ondas electromagnéticas (Tomasi, 2003).

- Ruido

En cualquier dato transmitido, la señal recibida consistirá en la señal transmitida modificada, debido a las distorsiones introducidas por el sistema, además de señales no deseadas que se insertan en algún punto entre el transmisor y el receptor. A estas últimas señales se les denomina ruido. El ruido es el factor de mayor importancia a la hora de limitar las prestaciones de un sistema de comunicación. El ruido se puede clasificar en cuatro categorías.

- Ruido térmico

Se debe a la agitación térmica de los electrones. Está presente en todos los dispositivos electrónicos y medios de transmisión; como su nombre lo indica es una función de la temperatura. El ruido térmico está uniformemente distribuido en el espectro de frecuencias y es también llamado **ruido blanco**. El ruido térmico no se puede eliminar. La cantidad de ruido térmico en un ancho de banda de 1 Hz en cualquier dispositivo o conductor es: (Stalling, 2004).

$$N_0 = kT \text{ (W/Hz)} \quad \text{Ec ... (3.2)}$$

*donde:*

$N_0$  = densidad de potencia del ruido, en vatios por 1 Hz de ancho de banda.

$k$  = constante de Boltzmann ( $1,3803 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{k}$ )

$T$  = Temperatura, en grados Kelvin.

Al alimentar cualquier circuito electrónico con una diferencia de potencial, se genera un flujo de electrones, sin embargo, la resistencia que los electrones oponen al flujo produce un rozamiento, que depende del material con el que están constituidos los circuitos, el rozamiento a su vez disipa parte de la energía en forma de calor. Por esta razón resulta imposible eliminar por completo el ruido térmico, más aún porque en todos los circuitos la pérdida de energía en forma de calor es una técnica que se utiliza para obtener diferentes voltajes en las distintas etapas que componen al circuito.

- Ruido de intermodulación

Cuando señales de distintas frecuencias comparten el mismo medio de transmisión puede producirse ruido de intermodulación. Se trata de la aparición de señales que sean suma o diferencia de las dos frecuencias originales o múltiplos de ellas (Stalling, 2004).

- Diafonía

Se trata de un acoplamiento no deseado entre las líneas de transmisión que transportan las señales. Esto puede ocurrir por el acoplamiento de electrónico entre pares de pares cercanos o en raras ocasiones en líneas de cable coaxial que transportan varias señales. La diafonía también puede parecer cuando las señales no deseadas se captan en las antenas de los sistemas de comunicaciones inalámbricos (Stalling, 2004).

La diafonía es un fenómeno, con el que las personas adultas se familiarizan, ya que se presentaba con frecuencia en la telefonía fija, al levantar la bocina y poder escuchar una conversación ajena a través del teléfono.

○ Ruido Impulsivo

Es no continuo y está constituido por pulsos o picos irregulares de corta duración y de amplitud relativamente grande. Se genera por una gran diversidad de causas, por ejemplo, perturbaciones electromagnéticas exteriores producidas por tormentas atmosféricas y fallas o defectos en los sistemas de comunicación (Stalling, 2004).

El ruido impulsivo se produce también por la acción de motores que están conectados en la misma línea de corriente, un ejemplo de esto se observa cuando al estar escuchando la radio se enciende la licuadora y por ende la señal que capta la radio se distorsiona por la presencia del ruido.

En la figura 3.4 se observa una cadena de bits que serán transmitidos por un canal, sin embargo, durante la trasmisión aparece una segunda señal compuesta por ruido térmico y unos picos ocasionales de ruido impulsivo. Al sumarse ambas señales se aprecia que el ruido térmico no perturba la señal, sin embargo, los picos producto del ruido impulsivo si pueden convertir un 1 en 0 y viceversa, por lo que al final en el transmisor se tendrá una señal distinta a la transmitida originalmente.

El ruido impulsivo puede convertirse en un gran problema, por ejemplo, si se considera un pico con duración de 0.01 seg. Afectando a una señal digital que se transmite a 56 kbps., se estarían afectando a 560 bits, lo cual puede ocasionar la pérdida del mensaje.

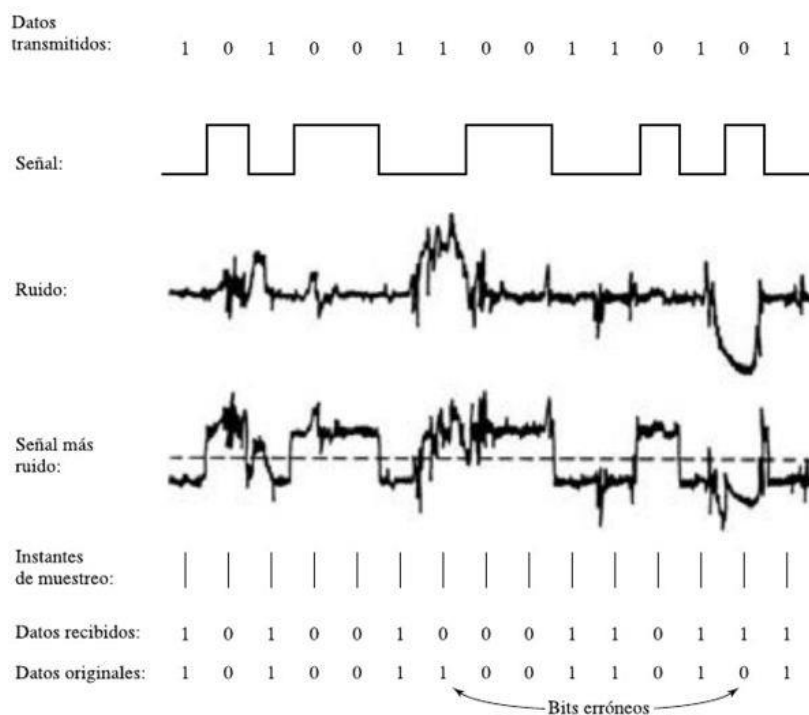


Fig. 3.4. Señal digital con presencia de ruido (Stalling, 2004).

- Interferencia

La interferencia es una forma de ruido externo y como su nombre lo indica, significa “perturbar o estorbar”. Se produce interferencia eléctrica cuando las señales de información de una fuente producen frecuencias que caen fuera de su ancho de banda asignado, e interfieren con otras señales de otra fuente. La mayor parte de las interferencias se produce cuando las armónicas o las frecuencias de producto cruzado de una fuente llegan a la banda de paso de un canal vecino. Por ejemplo, los radios CB transmiten señales en el intervalo de 27 a 28 MHz. Sus frecuencias de segunda armónica (54 a 56 MHz) caen dentro de la banda asignada a la televisión VHF. Por lo anterior es frecuente que al operar un radio de este tipo si se produce una componente de segunda armónica con gran amplitud, podrá interferir con la recepción de TV (Tomasi, 2003).

- Desvanecimiento

Las comunicaciones entre lugares remotos sean de tierra a tierra o de tierra a satélite, requieren la propagación de señales electromagnéticas por el espacio libre. Al propagarse una onda electromagnética por la atmosfera terrestre, la señal puede tener pérdidas intermitentes de intensidad, además de la perdida normal en la trayectoria. Estas pérdidas se pueden atribuir a diversos fenómenos, que incluyen efectos de corto y largo plazo. Esta variación en la pérdida de la señal se llama desvanecimiento y se puede atribuir a perturbaciones meteorológicas como la lluvia, nieve, granizo, etc.; a trayectorias múltiples de transmisión y a una superficie terrestre irregular. Para tener en cuenta el desvanecimiento temporal, se agrega una pérdida adicional de transmisión a la pérdida de trayectoria normal. A esta pérdida se le llama margen de desvanecimiento (Tomasi, 2003).

$$F_m = 30 \log D + 10 \log(6ABf) - 10 \log(1 - R) - 70 \quad \text{Ec ... (3.3)}$$

*donde:*

$F_m$  = margen de desvanecimiento

$D$  = Distancia (kilometros)

$f$  = frecuencia (gigahertz)

$1 - R$  = objetivo de confiabilidad para una distancia ruta de 400 km en un sentido

$A$  = factor de rugosidad

$B$  = factor para convertir la peor probabilidad mensual en una probabilidad anual

### 3.2.3 Topologías WLAN

La tecnología WLAN puede ocupar el lugar de una red cableada tradicional o ampliar sus límites y capacidades. De forma muy parecida a sus hermanas cableadas, el equipamiento WLAN de un edificio consta de adaptadores cliente y AP que llevan a cabo funciones parecidas a las de los *hubs* de las redes cableadas.

En el caso de instalaciones pequeñas o temporales, una WLAN puede disponerse en una topología “igual a igual” o *ad hoc* usando adaptadores cliente. Para la funcionalidad y el enlace añadidos, se pueden incorporar AP que actúen como centro de una topología en estrella, como se aprecia en la figura 3.5. El AP también puede actuar como puente a una red Ethernet.

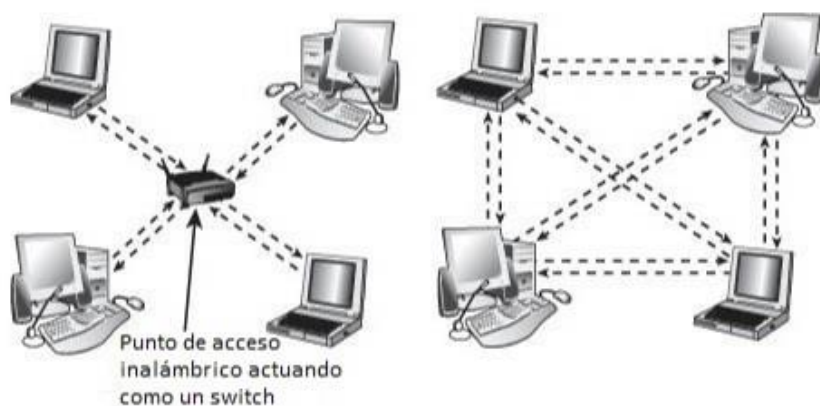


Fig. 3.5. Red inalámbrica (Obtenida de [www.tomshw.it](http://www.tomshw.it)).

La adopción de la tecnología inalámbrica permite una gran movilidad, los usuarios pueden cambiar de ubicación sin perder el acceso a la red.

La aplicación de la tecnología WLAN a los sistemas de sobre mesa otorga a la empresa una flexibilidad imposible de lograr con una LAN tradicional. Los sistemas cliente de escritorio se pueden ubicar donde es imposible o poco práctico tender un cable. Los PC de sobremesa pueden cambiar de lugar dentro de la instalación siempre que sea necesario. Todo esto hace que la tecnología inalámbrica sea ideal para grupos de trabajo temporales y empresas en continuo crecimiento (CISCO System Inc., 2006).

### 3.2.5 WiFi: redes LAN inalámbricas 802.11

Presente por todas partes, en las oficinas, en los domicilios particulares, en las instituciones educativas, en las cafeterías, en los aeropuertos e incluso en la esquina de cualquier calle, las redes LAN inalámbricas son hoy en día una de las tecnologías más importantes de redes de acceso para Internet. Aunque en la

década de 1990 se desarrollaron muchas tecnologías y estándares para redes LAN inalámbricas, hay una clase concreta de estándares que ha terminado por emerger como ganador indiscutible: la red LAN inalámbrica IEEE 802.11, también conocida como red WiFi.

Existen varios estándares 802.11 para la tecnología LAN inalámbrica, incluyendo 802.11b, 802.11a y 802.11g. En la tabla 3.1, se observan las características principales de estos estándares.

Elemento	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n
<b>Banda</b>	5.0 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
<b>Máx. velocidad de datos</b>	54 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	120Mbps
<b>Modulación</b>	OFDM	DSSS	OFDM	OFDM y DSSS
<b>Ancho de banda (típico)</b>	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz
<b>Diversidad</b>	Ninguna	Ninguna	Ninguna	MIMO
<b>Rango (máx)</b>	500 pies	500 pies	500 pies	1500 pies
<b>Compatibilidad</b>		802.11a	802.11b	802.11b y g

Tabla 3.1. Características principales entre los estándares 802.11 (Couch, 2008).

Para la primavera del 2009, existen muchos dispositivos 802.11g que están siendo ofrecidos por los fabricantes de puntos de acceso y tarjetas LAN. También hay disponibles diversos dispositivos en modo dual (802.11a/g) y trimodo (802.11a/b/g) (Couch, 2008).

Los estándares 802.11 comparten muchas características. Todos ellos emplean el mismo protocolo de acceso al medio, CSMA/CA. Los tres usan también la misma estructura de trama para la capa de enlace. Los tres estándares tienen la capacidad de reducir su velocidad de transmisión para poder alcanzar mayores distancias. Y los tres estándares permiten trabajar tanto “en modo de infraestructura” como “en modo ad hoc”. Sin embargo, como se muestra en la tabla 3.1 los estándares presentan algunas diferencias importantes en la capa física (Kurose, 1996).

Al igual que el resto de los estándares IEEE 802, el estándar IEEE 802.11 se centra en los dos modelos inferiores del modelo OSI: Capa física y capa de enlace de datos, tal como se muestra en la figura 3.6.



Fig. 3.6. Capas del modelo OSI definidas por el estándar IEEE 802.11 (Couch, 2008).

En 802.11 la capa física se divide en dos subcapas: PMD y PLCP. La subcapa PMD (*Physical Medium Dependant*) se ocupa de la modulación y de la aplicación de técnicas de espectro ensanchado de la señal. La subcapa PLCP (*Physical Layer Convergent Procedure*) se encarga de acondicionar las tramas que provienen de la capa MAC para su envío a través del medio añadiéndoles un preámbulo y una cabecera (Couch, 2008).

En este punto es posible retomar la idea de los múltiples problemas que una transmisión de datos en el espacio no libre conlleva, centrandó la atención en el ruido y las interferencias. Ya que las técnicas de espectro disperso fueron las técnicas de modulación que se adoptaron en el estándar 802.11 pues fueron las que permitieron subsanar de forma óptima estos problemas.

Para obtener el espectro disperso o ensanchado existen dos formas. La primera es codificar la información con una señal pseudo aleatoria. La información codificada se transmite en la frecuencia en que opera el transmisor, para lo cual se utiliza un ancho de banda mucho mayor al que se utiliza sin codificación Secuencia Directa (*Direct Sequence-DS/SS*). La segunda posibilidad es codificar la frecuencia de trabajo con una señal pseudo aleatoria por lo que la frecuencia de trabajo cambia permanentemente Saltos en Frecuencia (*Frequency Hopping-FH/SS*).

- Secuencia Directa (*Direct Sequence*). DS/SS

En este tipo de modulación, la señal digital de información es modulada mediante una secuencia pseudo aleatoria (PN), con una velocidad mucho mayor que la de la señal de información y luego transmitida utilizando algún tipo de modulación digital, así como se muestra en la figura 3.7 (Sklar, 2011).

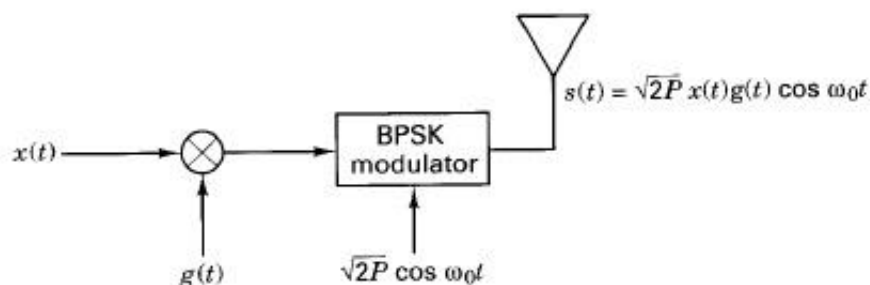


Fig. 3.7. Modulación DSSS (Sklar, 2011).

En la figura 3.7, se observa que la señal  $x(t)$  entra en el combinador de señales en donde se multiplica con la secuencia de código generada  $g(t)$ , en el dominio de la frecuencia se realiza la convolución, posteriormente en el modulator la señal sufre un desplazamiento de fase de 2 símbolos, teniendo  $0^\circ$  para el 1 y  $180^\circ$  para el 0.

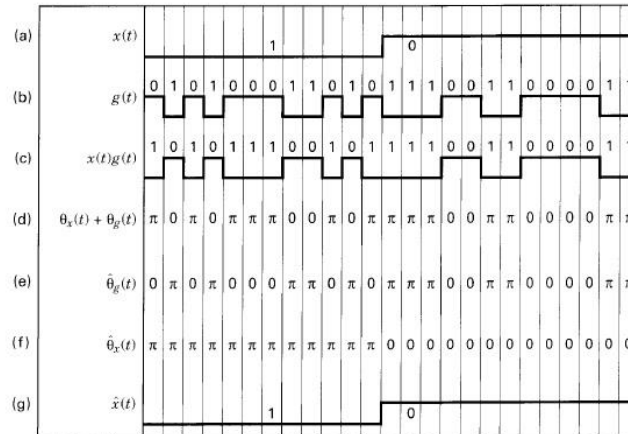


Fig. 3.8. Ejemplo de espectro disperso usando secuencia directa (Sklar, 2011).

En la figura 3.8 (a) se observa la secuencia de bits que se quieren transmitir. (b) Secuencia de código o de ruido generada, a cada elemento del código se le denomina chip, en este ejemplo se utilizan 12 chips por bit y se observa que la tasa de bit es menor a la tasa de chip. (c) Se realiza la suma aritmética módulo 2 entre  $x(t)$  y  $g(t)$ , el resultado de la suma es la secuencia transmitida. (d) Se muestra la fase de la secuencia transmitida. (e) código con inversión de fase producido por el receptor. (f) fase de la portadora en el receptor después del proceso de demodulación. (g) Señal recuperada (Sklar, 2011).

- Saltos de Frecuencia (Frequency Hopping) FH/SS

En este caso la señal o mensaje es modulada, con alguna técnica de modulación digital, por señales de portadoras que cambian abruptamente su frecuencia a intervalos regulares, cíclica o aleatoriamente. Estos saltos de frecuencia se hacen con dos objetivos fundamentales: Incrementar la capacidad del sistema y mejorar su calidad disminuyendo la tasa de bits erróneos (Sklar, 2011).

Un diagrama a bloques de un FHSS se muestra en la figura 3.9.

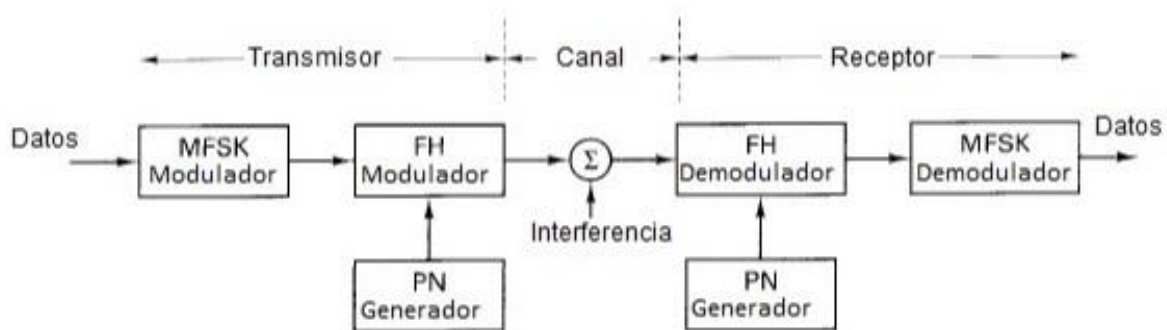


Fig. 3.9. Modulación FHSS (Sklar, 2011).

En la figura 3.10 se incluye un ejemplo de modulación con saltos de frecuencia. La entrada consiste en una secuencia binaria con una secuencia de datos de  $R = 150$  bits/s. La modulación es Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (8-ary FSK). Por lo tanto la tasa de símbolo es  $R_s = R/\log_2 8 = 50$  *simbolos/s* de este modo la duración de cada símbolo es  $T = \frac{1}{50} = 20ms$ . La frecuencia es cambiada una vez por símbolo, y el tiempo de salto se sincroniza con la tasa de símbolo, por lo tanto, la tasa de salto es 50 saltos/s. En la figura 3.10 el eje de las abscisas representa el tiempo y el eje ordenado representa los saltos dentro de un ancho de banda  $W_{ss}$ . La imagen a la derecha de la figura 3.10 representa un arreglo de 8 tonos con la frecuencia y el símbolo correspondiente a cada uno, y se observa la separación entre frecuencias la cual como se mencionó anteriormente debe ser de 50 Hz (Sklar, 2011).

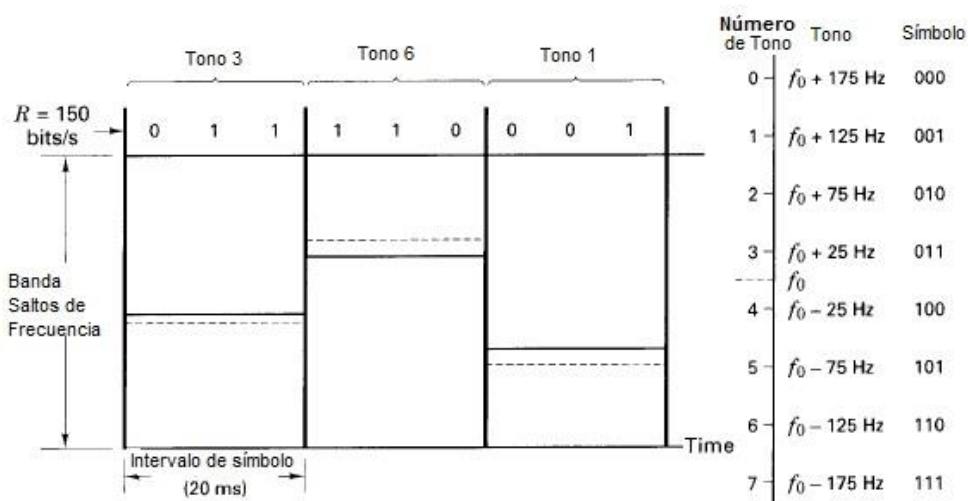


Fig. 3.10. Ejemplo de Salto de frecuencia usando Modulación 8-ary FSK (Sklar, 2011).

La tecnología LAN inalámbrica 802.11b ofrece una velocidad de datos de 11 Mbps y opera en la banda de frecuencia sin licencia de 2.4 – 2.485 GHz, compitiendo por el espectro de frecuencias con los teléfonos de 2.4 GHz y los hornos de microondas, razón por la cual cobra gran relevancia el contar con una técnica que modulación que brinde soporte ante las interferencias. Las redes LAN 802.11a tienen una distancia de transmisión más corta para un determinado nivel de potencia y se ven más afectadas por los problemas de la propagación multitrayectoria. Las redes LAN 802.11g operan en la misma banda de menor frecuencia que el estándar 802.11b y son compatibles con este estándar, utilizan las velocidades de transmisión del estándar 802.11a, lo que permite a los usuarios disfrutar de lo mejor de los otros dos estándares (Kurose, 1996).

Hay un nuevo estándar WiFi, 802.11n [IEEE 802.11n 2009], que se encuentra en proceso de estandarización. 802.11n utiliza antenas de entrada múltiple y salida múltiple (MIMO, *Multiple-Input Multiple-Output*); es decir, dos o más antenas en el

lado emisor y dos o más antenas en el lado receptor están transmitiendo/recibiendo diferentes señales (Diggavi, 2004).

Aunque todavía el proceso de estandarización no ha concluido, ya hay disponibles productos pre-estándar, en los que las primeras pruebas realizadas muestran que se pueden conseguir en la práctica tasas de transferencia de transmisión de más de 200 Mbps (Newman, 2008).

### 3.2.6 La arquitectura 802.11

La figura 3.11 ilustra los principales componentes de la arquitectura de una red LAN inalámbrica 802.11. El componente fundamental es el conjunto de servicio básico (BSS, *Basic Service Set*). Un BSS contiene una o más estaciones inalámbricas y una estación base central, conocida con el nombre de punto de acceso (AP, *Access Point*). En la figura se muestra el punto de acceso en cada uno de los dos BSS; los puntos de acceso se interconectan a un dispositivo de interconexión (como un conmutador o un enrutador), que a su vez conecta a internet.

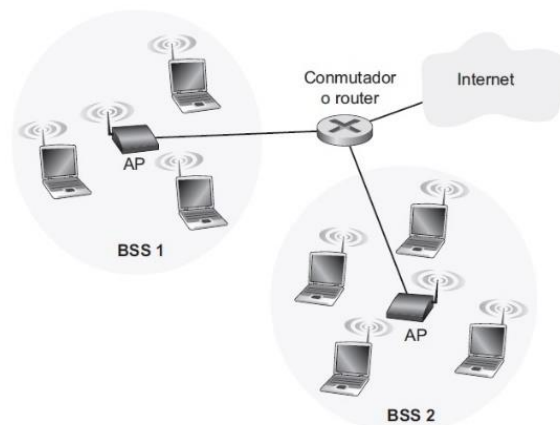


Fig. 3.11. Red LAN inalámbrica 802.11 (Kurose, 1996).

Al igual que sucede con los dispositivos Ethernet, cada estación inalámbrica 802.11 tiene una dirección MAC de 6 bytes que está almacenada en el firmware de la tarjeta adaptadora de la estación (es decir, en la tarjeta de interfaz de red 802.11). Cada punto de acceso tiene también una dirección MAC para su interfaz inalámbrica. Al igual que sucede con Ethernet, estas direcciones MAC son administradas por el IEEE y son (en teoría) globalmente únicas. Las redes LAN inalámbricas que incorporan puntos de acceso suelen denominarse redes LAN inalámbricas de infraestructura, siendo la “infraestructura” los puntos de acceso junto con la infraestructura de Ethernet cableada que interconecta los puntos de acceso y un enrutador (Kurose, 1996).

La figura 3.12 muestra que las estaciones IEEE 802.11 también pueden agruparse para formar una red ad hoc; una red sin ningún control central y que no tiene extensiones con el “mundo exterior”. En este caso, la red es formada por una serie de dispositivos móviles que se han encontrado con que están próximos entre sí, que tienen una necesidad de comunicarse y que no encuentran ninguna infraestructura de red preexistente en la ubicación en la que están. Una red ad hoc podría formarse cuando una serie de personas con computadoras portátiles se juntan (por ejemplo, en una sala de conferencias, en un tren o en un vehículo) y quieren intercambiar datos en ausencia de un punto de acceso centralizado (Kurose, 1996).

La figura 3.12 muestra una red ad hoc, en este tipo de redes los usuarios desean intercambiar información entre si y no necesariamente enlazarse a internet, por lo que se pueden omitir de la red los AP y un equipo cualquiera puede reemplazarlo.

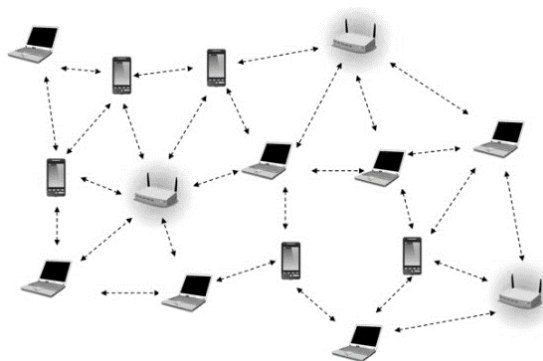


Fig. 3.12. Red ad hoc inalámbrica (Kurose, 1996).

### Dispositivos compatibles con 802.11

Los dispositivos inalámbricos para las LAN han crecido muchísimo. Los dispositivos cableados tradicionales como los teléfonos IP y las impresoras, ahora cuentan con opciones inalámbricas incorporadas. Actualmente, entre los dispositivos inalámbricos posibles podemos citar los siguientes:

- PDA
- Teléfonos IP
- Impresoras
- Proyectoras
- Tablet PC
- Cámaras de seguridad
- Lectores de códigos de barras
- Pantallas
- Dispositivos personalizados para los mercados verticales:
  - Cuidado de la salud
  - Fabricación
  - Ventas
  - Restaurantes

### 3.2.7 Canales y asociación de 802.11

La arquitectura 802.11 opera en el rango de frecuencias de 2.4 GHz a 2.485 GHz. Dentro de esta banda de 85 MHz, 802.11 define 11 canales parcialmente solapados. Dados dos canales cualesquiera diremos que no se solapan si y sólo si están separados por cuatro o más canales. En particular, el conjunto de canales 1, 6 y 11 es el único conjunto de tres canales no solapados. Esto quiere decir que un administrador podría crear una red LAN inalámbrica con una velocidad máxima de transmisión agregada de 33 Mbps instalando tres puntos de acceso 802.11b en la misma ubicación física, asignando los canales 1, 6 y 11 a los puntos de acceso e interconectando todos los AP mediante un conmutador.

A continuación, se analizará una problemática típica dentro de una jungla WiFi. Un equipo de cómputo desea poder acceder a Internet de manera inalámbrica. Suponiendo que existen cinco puntos de acceso en esa jungla WiFi. Para poder obtener acceso a Internet, el equipo de cómputo necesita unirse a exactamente una de las subredes y, por tanto, necesitará asociarse con uno de los puntos de acceso. Asociarse quiere decir que la estación inalámbrica creará un cable virtual entre ella y el punto de acceso. Específicamente, solo el punto de acceso asociado enviará tramas de datos (es decir, tramas que contienen datos, como por ejemplo un datagrama) a el equipo de cómputo e igualmente dicho equipo enviará tramas de datos hacia Internet solamente a través del punto de acceso asociado.

Para llevar a cabo la asociación, el estándar 802.11 define que un punto de acceso enviará de forma periódica tramas baliza (*beacon frames*), cada una de las cuales incluye la dirección MAC y el identificador del punto de acceso. La estación inalámbrica, que sabe que los puntos de acceso están enviando tramas baliza, explora los once canales buscando las tramas baliza de cualquier punto de acceso que pueda haber en las proximidades (algunos de los cuales pueden estar transmitiendo a través del mismo canal, ya que se está en una jungla). Habiendo determinado qué puntos de acceso hay disponibles a través de las tramas baliza, se selecciona uno de los puntos de acceso para realizar la asociación.

Normalmente, el host elige el punto de acceso cuya trama baliza se recibe con la máxima intensidad de señal. Pero, aunque una alta intensidad de señal resulta conveniente, la intensidad de la señal no es la única característica del punto de acceso que influirá en el rendimiento que un host perciba. En particular, es posible que el punto de acceso seleccionado pueda tener una gran intensidad de señal, pero que pueda estar sobre cargado por otra serie de hosts asociados (que necesitarán compartir el ancho de banda inalámbrico disponible en dicho punto de acceso), mientras que se deja sin seleccionar un punto de acceso bastante descargado, debido a que la intensidad de la señal es ligeramente menor. Por esto, recientemente se han propuesto diversas formas de elección de los puntos de acceso (Vasudevan, 2005).

El proceso de exploración de los canales y de escucha de las tramas baliza se conoce con el nombre de exploración pasiva. Un host inalámbrico también puede realizar una exploración activa, difundiendo una trama de sondeo que será recibida por todos los puntos de acceso que caigan dentro del alcance del host inalámbrico. Los puntos de acceso responden a la trama de la solicitud de sondeo con una trama de respuesta. El host inalámbrico puede entonces elegir el punto de acceso con el que asociarse de entre todos aquellos que hayan respondido.

En el proceso de asociación los equipos intercambian una serie de tramas, en las cuales se definen la mayoría de los modos de operación entre los dispositivos. Cabe mencionar que este segundo acuerdo de solicitud/respuesta también es necesario cuando se utiliza la exploración activa, dado que un punto de acceso que está respondiendo a la trama inicial de solicitud de sondeo no sabe cuál de los puntos de acceso que hayan respondido va a ser seleccionado por el host para asociarse, una vez asociado con un punto de acceso, el host se unirá a la subred a la que pertenezca el punto de acceso. Normalmente el host enviará un mensaje de descubrimiento hacia la subred a través del punto de acceso para obtener una dirección IP de esa subred. Una vez obtenida la dirección, el resto del mundo verá entonces a dicho host simplemente como otro host cualquiera con una dirección IP perteneciente a dicha subred (Kurose, 1996).

### **3.2.8 El protocolo MAC 802.11**

Anteriormente se tocó el punto de las capas del modelo OSI que define el estándar IEEE 802.11, haciendo mención de las acciones que se realizan en la capa física, pero, quedando sin especificar las acciones que se realizan en la capa de enlace. En esta sección se estudiará una etapa muy importante, en la cual se lleva a cabo el mecanismo de control de acceso al medio.

Una vez asociada una estación inalámbrica con un punto de acceso, la estación puede comenzar a enviar y recibir tramas de datos hacia y desde el punto de acceso. Sin embargo, dependiendo de la cantidad de equipos que formen la red, puede haber momentos en los que varios equipos deseen transmitir tramas a través de la red al mismo tiempo, por lo que se vuelve necesario la implementación de un protocolo de acceso al medio que minimice las pérdidas de información por colisiones.

El protocolo seleccionado para el estándar 802.11, se conoce como CSMA con evitación de colisiones CSMA/CA (*Collision Avoidance*). Las siglas “CSMA” hacen referencia al “acceso múltiple por sondeo de portadora”, lo que significa que cada estación sondea o escucha el canal antes de transmitir y se abstiene de transmitir cuando detecta que el canal está ocupado. Aunque tanto Ethernet como 802.11 utilizan acceso aleatorio con sondeo de portadora, los dos protocolos MAC presentan diferencias importantes. En primer lugar, en vez de utilizar detección de colisiones, 802.11 utiliza técnicas de evitación de las colisiones. En segundo lugar,

debido a que, por la naturaleza de los canales inalámbricos, pueden presentarse errores, 802.11 (a diferencia de Ethernet) utiliza un esquema de reconocimiento o retransmisión (ARQ) de la capa de enlace (Kurose, 1996).

Cuando la estación de destino recibe una trama y esta pasa la prueba de comprobación de CRC, espera un corto periodo de tiempo conocido con el nombre de Espacio corto entre tramas (SIFT, *Short Interframe Spacing*) y luego devuelve una trama de reconocimiento. Si la estación transmisora no recibe una trama de reconocimiento dentro de un periodo de tiempo especificado, supone que se ha producido un error y retransmite la trama, utilizando el protocolo CSMA/CA para acceder al canal. Si no se recibe una trama de reconocimiento después de un número fijo de retrasmisiones, la estación transmisora se da por vencida y descarta la trama (Kurose, 1996).

### Protocolo CSMA/CA 802.11

Suponga que una estación (estación inalámbrica o punto de acceso) dispone de una trama para transmitir.

1. Si la estación detecta inicialmente que el canal está inactivo, transmite la trama después de un corto periodo de tiempo, llamado: Espacio distribuido entre tramas (*DIFS, Distributed Inter-frame Space*).
2. En caso contrario, la estación selecciona un valor de espera (*backoff*) aleatorio y efectúa una cuenta atrás con este valor mientras detecta que el canal está inactivo. Cuando detecta que el canal está ocupado, el valor del contador permanece congelado.
3. Cuando el contador alcanza el valor cero (esto sólo puede suceder mientras se detecta que el canal está inactivo), la estación transmite la trama completa y luego espera a recibir un reconocimiento.

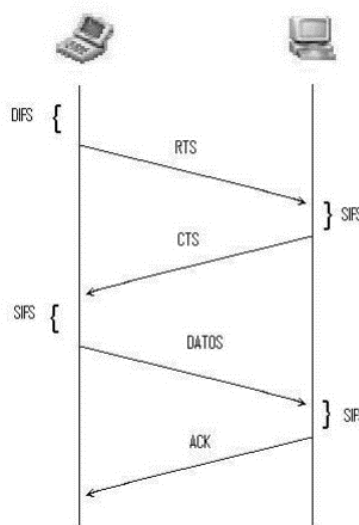


Fig. 3.13. Reconocimientos ACK (Kurose, 1996).

4. Si se recibe una trama de reconocimiento, la estación transmisora sabe que su trama ha sido recibida correctamente en su estación de destino. Si la estación tiene otra trama que enviar, comienza de nuevo el protocolo CSMA/CA en el paso 2. Si no recibe una trama de reconocimiento, la estación transmisora vuelve a entrar en la fase de backoff del paso 2, seleccionando el valor aleatorio de un intervalo más largo (Kurose, 1996).

### 3.2.9 Enfrentándose al problema de los terminales ocultos: RTS y CTS

En la figura 3.14 se aprecian dos estaciones inalámbricas y un punto de acceso. Ambas estaciones inalámbricas caen dentro del alcance del punto de acceso (cuya área de cobertura se muestra como un círculo sombreado) y ambas están relacionadas con el punto de acceso. Sin embargo, debido al desvanecimiento, los rangos de señal de las estaciones inalámbricas están limitados al interior de los círculos sombreados. En consecuencia, cada una de las estaciones inalámbricas se encuentran ocultas entre sí, aunque ninguna de las dos está oculta para el punto de acceso.

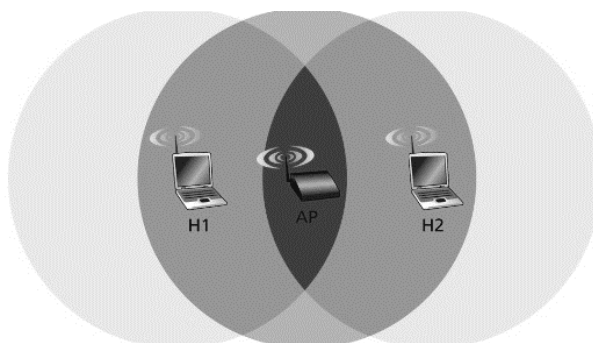


Fig. 3.14. Terminales ocultos: H1 está oculto de H2 y viceversa (Kurose, 1996).

El principal problema con los terminales ocultos consiste en que si  $H_1$  está transmitiendo una trama y en ese instante  $H_2$  quiere enviar una trama al punto de acceso.  $H_2$ , al no escuchar la transmisión de  $H_1$ , esperará primero un intervalo DIFS y luego transmitirá la trama, provocando una colisión. Por tanto, el canal se desperdiciará durante el periodo completo de transmisión de  $H_1$ , así como durante la transmisión de  $H_2$ .

Para evitar este problema, el protocolo IEEE 802.11 permite a una estación utilizar una corta trama de control de Solicitud de transmisión (*RTS, Request to Send*) y otra corta trama de control de Preparado para enviar (*CTS, Clear to Send*) para reservar el acceso al canal. Cuando un emisor quiere enviar una trama de datos, puede enviar primero una trama RTS al punto de acceso, indicando el tiempo total requerido para transmitir la trama de datos y la trama de reconocimiento (ACK). Cuando el punto de acceso recibe la trama RTS, responde difundiendo una trama CTS. Esta trama CTS sirve a dos propósitos distintos: proporciona al emisor un

permiso explícito para enviar una trama y también informa a las otras estaciones que no deben transmitir durante ese periodo de tiempo reservado (Kurose, 1996).

En la figura 3.15 se muestra el modo en que este mecanismo de prevención de colisiones opera. El uso de tramas RTS y CTS puede mejorar el rendimiento de dos formas importantes:

- El problema de las estaciones ocultas queda mitigado, ya que una trama de datos larga sólo se transmitirá después de haber reservado el canal.
- Puesto que las tramas RTS y CTS son cortas, una colisión que implique a una trama RTS o CTS sólo durará mientras duren esas tramas cortas RTS o CTS. Una vez transmitidas las tramas RTS y CTS correctamente, las tramas de datos y ACK siguientes deberán poder transmitirse sin colisiones.

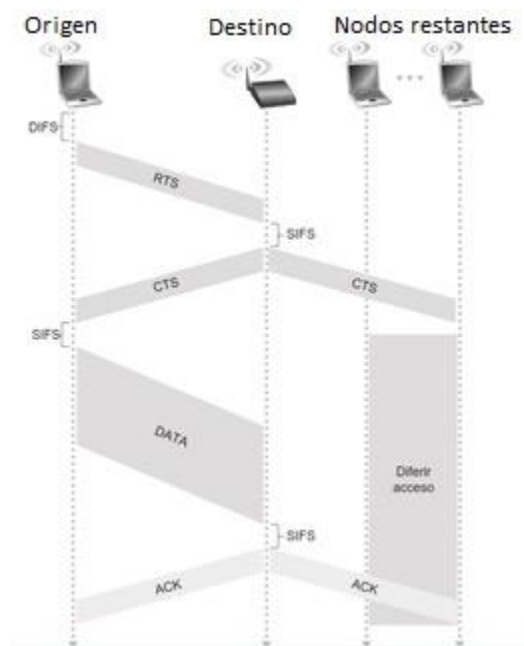


Fig. 3.15. Evitación de colisiones utilizando las tramas RTS y CTS (Kurose, 1996).

Aunque teóricamente el uso de esta técnica previene muy bien las colisiones, en la práctica esto supone que el protocolo cada vez sea más complejo e igualmente con un mayor consumo de recursos.

### 3.2.10 La trama IEEE 802.11

En la figura 3.16 se muestra la trama 802.11. Los números situados encima de cada campo de la trama representan las longitudes de los campos en bytes; los números situados por encima de cada uno de los subcampos en el campo de control de trama representan las longitudes de los subcampos en bits. Se examinarán ahora los campos de la trama, así como algunos de los subcampos más importantes del campo de control de trama.

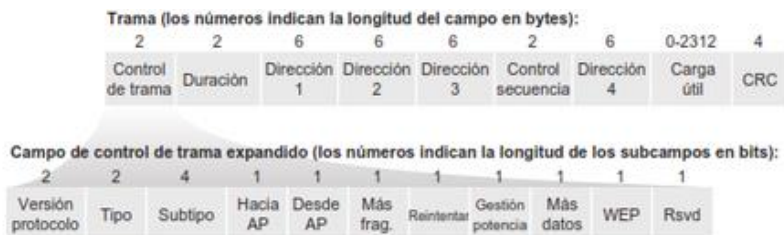


Fig. 3.16. Trama 802.11 (Kurose, 1996)

### Campos de carga útil y CRC

En el núcleo de la trama se encuentra la carga útil, que normalmente estará compuesta por un datagrama IP o un paquete ARP. Aunque el campo puede tener una longitud de hasta 2.312 bytes, normalmente la longitud es inferior a 1.500 bytes, conteniendo el campo un datagrama IP o un paquete ARP. Al igual que con una trama Ethernet, una trama 802.11 incluye un código de redundancia cíclica (CRC) de 32 bits, de modo que el receptor pueda detectar errores de bit en la trama recibida. Los errores de bit son mucho más comunes en las redes LAN inalámbricas que en las redes LAN cableadas, por lo que el CRC aquí es todavía más útil (Kurose, 1996).

### Campos de dirección

Quizá la diferencia más sobresaliente en la trama 802.11 es que tiene cuatro campos de dirección, tres de los campos de dirección son necesarios para propósitos de la comunicación por la red, específicamente para mover el datagrama de la capa de red de una estación inalámbrica hasta una interfaz de enrutador a través de un punto de acceso. El cuarto campo de dirección se utiliza cuando los puntos de acceso se reenvían tramas entre sí en modo ad hoc. Puesto que solo estamos considerando aquí las redes de infraestructura, vamos a centrarnos en los tres primeros campos de dirección. El estándar 802.11 define estos campos como sigue:

Dirección 2 es la dirección MAC de la estación que transmite la trama. Por tanto, si una estación inalámbrica transmite la trama, la dirección MAC de dicha estación se insertará en el campo Dirección 2. De forma similar, si es un punto de acceso el que transmite la trama, en el campo Dirección 2 se insertará la dirección MAC de dicho punto de acceso.

El campo Dirección 1 contiene la dirección MAC de la estación inalámbrica que tiene que recibir la trama. Por tanto, si una estación inalámbrica móvil transmite una trama, Dirección 1 contendrá la dirección MAC del punto de acceso de destino. De forma similar, si un punto de acceso transmite la trama, Dirección 1 contendrá la dirección MAC de la estación inalámbrica de destino.

Para comprender el campo de Dirección 3, es necesario recordar que el BSS (que consta del punto de acceso y las estaciones inalámbricas) forma parte de una subred y que dicha subred se conecta a otras subredes a través de alguna interfaz de enrutador. El campo Dirección 3 contiene la dirección MAC de esa interfaz de enrutador.

A continuación, se verá un ejemplo de comunicación por red en el contexto de la figura 3.17. En esta figura hay dos puntos de acceso, cada uno de los cuales es responsable de una serie de estaciones inalámbricas. Cada uno de los puntos de acceso tiene una conexión directa con un enrutador, el cual a su vez conecta a la red Interglobal. Debemos recordar que un punto de acceso es un dispositivo de la capa de enlace y que, por tanto, nunca “habla” IP ni comprende las direcciones IP. Considere ahora el proceso de transferir un datagrama desde la interfaz del enrutador  $R_1$  hasta la estación inalámbrica  $H_1$ . El enrutador no es consciente de que existe un punto de acceso entre él y  $H_1$ ; desde la perspectiva del enrutador,  $H_1$  es simplemente un host en una de las subredes a la que el enrutador está conectado.

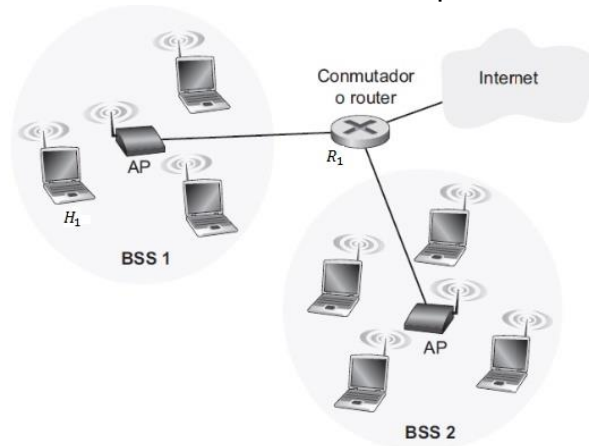


Fig. 3.17. Uso de los campos de dirección en las tramas 802.11: envío de tramas entre  $H_1$  y  $R_1$  (Kurose, 1996).

El enrutador, que conoce la dirección IP de  $H_1$  (a partir de la dirección de destino del datagrama), utiliza ARP para determinar la dirección MAC de  $H_1$ , al igual que en una red LAN Ethernet normal. Después de obtener la dirección MAC de  $H_1$ , la interfaz del enrutador  $R_1$  encapsula el datagrama dentro de una trama Ethernet. El campo de dirección de origen de esta trama contiene la dirección MAC de  $R_1$  y el campo de la dirección de destino contiene la dirección MAC de  $H_1$ .

Cuando la trama Ethernet llega al punto de acceso, éste convierte la trama Ethernet 802.3 en una trama 802.11 antes de transmitirla por el canal inalámbrico. El punto de acceso rellena los campos Dirección 1 y Dirección 2 con la dirección MAC de  $H_1$  y su propia dirección MAC, respectivamente, como ya se ha descrito anteriormente. Como Dirección 3, el punto de acceso inserta la dirección MAC de  $R_1$ . De esta manera,  $H_1$  puede determinar (a partir de la Dirección 3) la dirección MAC de la interfaz del enrutador que envió el datagrama hacia la subred (Kurose, 1996).

Considere ahora lo que sucede cuando la estación inalámbrica responde transfiriendo un datagrama desde  $H_1$  a  $R_1$ .

$H_1$  crea una trama 802.11, relleno los campos Dirección 1 y Dirección 2 con la dirección MAC del punto de acceso y la de  $H_1$ , respectivamente. Como Dirección 3,  $H_1$  inserta la dirección MAC de  $R_1$ .

Cuando el punto de acceso recibe la trama 802.11, la convierte en una trama Ethernet. El campo de dirección de origen de esta trama será la dirección MAC de  $H_1$ , mientras que el campo de dirección de destino será la dirección MAC de  $R_1$ . Por tanto, el campo Dirección 3 permite al punto de acceso determinar la dirección MAC de destino apropiada a la hora de construir la trama Ethernet.

En resumen, el campo Dirección 3 desempeña un papel crucial para la comunicación por red entre el BSS y una red LAN cableada (Kurose, 1996).

**Campos Número de secuencia, Duración y Control de trama**

En el protocolo 802.11, cada vez que una estación recibe correctamente una trama procedente de otra estación devuelve un mensaje de reconocimiento. Puesto que los reconocimientos pueden perderse, la estación transmisora podría enviar múltiples copias de una determinada trama. Por tal motivo, los números de secuencia permiten al receptor distinguir entre una trama recién transmitida y la retransmisión de una trama anterior.

Se sabe también que el protocolo 802.11 permite a una estación transmisora reservar el canal durante un periodo de tiempo, que incluye el tiempo para transmitir su trama de datos y el tiempo para transmitir una trama de reconocimiento. Este valor de duración está incluido en el campo Duración de la trama (tanto para las tramas de datos como para las tramas RTS y CTS).

Como se muestra en la figura 3.16. El campo de control de tramas incluye muchos subcampos. Los campos *tipo* y *subtipo* se utilizan para distinguir las tramas de asociación, RTS, CTS, ACK y de datos. Los campos *hacia* y *desde* se utilizan para definir los significados de los diferentes campos de dirección (estos significados cambian dependiendo de si se está utilizando el modo ad hoc o el modo de infraestructura. El campo WEP indica si se está empleando cifrado (Kurose, 1996).

### **3.2.13 Más allá de 802.11: Bluetooth y WiMAX**

El estándar WiFi IEEE 802.11 está pensado para la comunicación entre dispositivos separados hasta 100 metros excepto cuando se utiliza (802.11 en una configuración punto a punto con una antena direccional). Existen otros dos protocolos estándar IEEE 802.11: Bluetooth definido en el estándar IEEE 802.15.1 y WiMAX (definido en el estándar IEEE 802.16 para la comunicación a distancias más cortas y más largas, respectivamente).

- Bluetooth

Una red IEEE 802.15.1 opera con un corto alcance, a baja potencia y con bajo costo. Se trata básicamente de una tecnología de “sustitución de cables” de baja potencia, corto alcance y baja velocidad para la interconexión de computadoras de bolsillo, dispositivos periféricos, teléfonos celulares y dispositivos PDA, mientras que 802.11 es una tecnología de “acceso” de mayor potencia, de alcance medio y mayor velocidad. Por esta razón las redes 802.15.1 se denominan en ocasiones redes inalámbricas de área personal (WPAN, *Wireless Personal Area Network*). Las capas de enlace y física de 802.15.1 están basadas en la especificación anterior de Bluetooth para redes de área personal (Held 2001, Bisdikian 2001).

Las redes 802.15.1 operan en la banda de radio sin licencia de 2.4 GHz en forma TDM, con particiones de tiempo de 625 microsegundos. Durante cada partición de tiempo, un emisor transmite en uno de 79 canales, cambiando el canal de una partición a otra en una forma conocida, pero pseudo-aleatoria. Este tipo de saltos de canal, que es una técnica conocida con el nombre de Espectro disperso por salto de frecuencia (FHSS, *Frequency-Hopping Spread Spectrum*), distribuye las transmisiones a lo largo del tiempo por todo el espectro de frecuencias. 802.15.1 puede proporcionar velocidades de datos de hasta 4 Mbps (IEEE 802.15 2009).

Las redes 802.15.1 son redes ad hoc: no hace falta ninguna infraestructura (por ejemplo, un punto de acceso) para interconectar los dispositivos 802.15.1. Por tanto, estos dispositivos deben organizarse por sí mismos. Los dispositivos 802.15.1 se organizan primero en una picored (*piconet*), formada por hasta 8 dispositivos activos, como se muestra en la figura 3.14. Uno de estos dispositivos se designa como maestro, actuando los dispositivos restantes como esclavos. El nodo maestro gobierna realmente la picored; es un reloj el que determina el tiempo en la picored, el dispositivo maestro puede transmitir en cada partición con número impar y un esclavo sólo puede transmitir después de que el maestro se haya comunicado con él en la partición anterior e incluso entonces el esclavo sólo puede transmitir hacia el maestro. Además de los dispositivos esclavos, puede haber hasta 255 dispositivos aparcados dentro de la red. Estos dispositivos no pueden comunicarse hasta que su estado se ha cambiado por el nodo maestro de aparcado a activo (IEEE 802.15 2009).

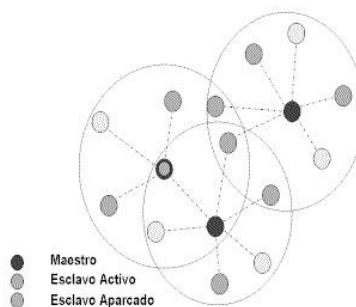


Fig. 3.18. Picored Bluetooth (Obtenida de <http://www.oas.org>).

- WiMAX

Interoperabilidad mundial para el acceso por microondas (WiMAX: *World Interoperability for Microwave Access*) es una familia de estándares IEEE 802.16 que trata de suministrar datos inalámbricos a un gran número de usuarios en un área extensa, a velocidades capaces de competir con las de los módems por cable y las redes ADSL. El estándar 802.16d actualiza el estándar anterior 802.16a. El estándar 802.16e pretende soportar la movilidad a velocidades de 70-80 millas por hora, unos 105-120 kilómetros por hora (es decir, velocidad de autopista en la mayoría de los países fuera de Europa) y tiene una estructura de enlace diferente para dispositivos pequeños y de recursos limitados tales como PDA, los teléfonos y las computadoras portátiles (IEEE80216d, 2004).

La arquitectura 802.16 está basada en la noción de una estación base que sirve de modo centralizado a un número potencialmente grande de clientes (conocidos con el nombre de estaciones de abonado) asociados con dicha estación base. En este sentido, WiMAX recuerda tanto a WiFi en modo de infraestructura como a las redes de telefonía celular. La estación base coordina la transmisión de los paquetes de la capa de enlace tanto en la dirección de bajada (desde la estación base a las estaciones de abonado) como de subida (desde las estaciones de abonado hacia la estación base), de acuerdo con la estructura de marcos TDM mostrada en la figura 3.15. Se utilizará aquí el término “paquete” en lugar del término “trama” (que se usó para 802.11 y otros paquetes de la capa de enlace) para distinguir la unidad de datos de la capa de enlace de la estructura de marcos TDM mostrada en la figura 3.15. WiMAX opera, por tanto, en modo de multiplexación por división en el tiempo (TDM), aunque los tiempos de marco son variables como se indica más adelante.

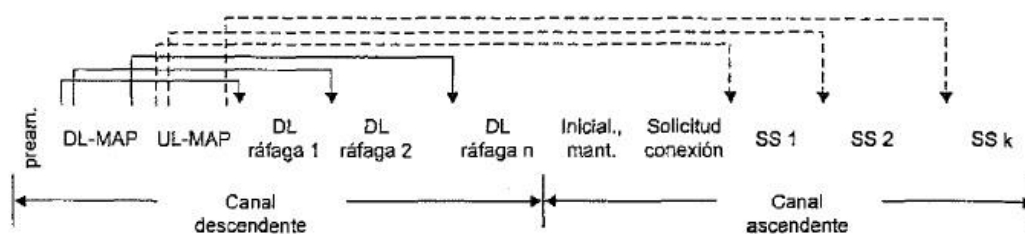


Fig. 3.19. Estructura de marcos TDM 802.16 (Kurose, 1996).

Observemos que WiMAX también define un modo FDM de operación, aunque aquí no se trata este hecho a fondo.

Al principio de la estructura de marcos TDM, la estación base envía en primer lugar la lista de mensajes MAP (*Media Access Protocol*) descendentes que informa a las estaciones de abonado de las propiedades de la capa física (esquema de modulación, codificación y parámetros de corrección de errores) que se utilizan para transmitir las subsiguientes ráfagas de paquetes dentro de la estructura de marcos

TDM. Puede haber múltiples ráfagas dentro de una estructura y múltiples paquetes dentro de una ráfaga destinada a una determinada estación de abonado. La estación base transmite todos los paquetes contenidos en la ráfaga utilizando las mismas propiedades de la capa física. Sin embargo, dichas propiedades pueden cambiar de una ráfaga a otra, permitiendo a la estación base seleccionar múltiples esquemas de transmisión de la capa física que estén óptimamente adaptados a cada estación de abonado receptora. La estación base puede seleccionar el conjunto de receptores a los que va a enviar en esta estructura en función de las condiciones actuales estimadas del canal existente hasta cada receptor. Esta forma de planificación oportunista (adaptar el protocolo de la capa física a las condiciones del canal entre el emisor y el receptor, y seleccionar los receptores a los que se enviarán los paquetes basándose en las condiciones del canal) permite a la estación base hacer un uso óptimo del medio inalámbrico (Bender, 2000).

En este punto se tienen tres opciones que pueden dar solución al reto de contar con un control inalámbrico para el sistema de captación y filtrado de agua de lluvia. Sin embargo, la opción que más se ajusta a los objetivos de este proyecto, es WiFi ya que permite desde una gran serie de dispositivos, conectarse a Internet, permitiendo así operar el sistema de filtrado desde cualquier parte del mundo en el que una conexión a Internet esté disponible.

Además, en la actualidad es muy común que las personas cuenten con dispositivos de interconexión a internet a través de la tecnología WiFi, por lo que aprovechar esta conexión será más sencillo y económico. Solo quedando el reto de convertir el sistema de filtrado en un dispositivo capaz de conectarse a una red WiFi.



## Capítulo 4

### **Desarrollo e implementación del prototipo de captación y filtrado de agua de lluvia controlado inalámbricamente.**

La figura 2.11 muestra el sistema inalámbrico de captación y filtrado de agua de lluvia propuesto en este proyecto, sin embargo, aunque ya se cuenta con este diseño, aún no se ha especificado cómo ejecutará las acciones que se prevé realice. Por tal motivo se describirá a continuación el modo de operar de dicho sistema.

- En primer lugar, cuando el sistema es alimentado por una diferencia de potencial, el módulo WiFi se conecta a la red local, la cual fue configurada con anterioridad, un led de color verde ubicado en el control manual, indicará que el sistema está encendido.
- En el control manual podremos observar 4 botones, 3 de ellos activarán cada una de las funciones disponibles (filtrar, drenar tanque principal y re-filtrar), el cuarto botón servirá como un paro (stop). Cada vez que el sistema esté ejecutando una acción, se encenderá un led distinto indicando la acción en proceso, en el caso del botón de paro se encenderá el color rojo como se usa típicamente.
- Las mismas opciones del control manual se tendrán en el control inalámbrico, para esto el usuario podrá entrar a una página web, y pulsar de forma digital los botones que representan cada instrucción. Para evitar el problema de crear múltiples páginas web (una por sistema instalado), la misma página se utilizará para todos los usuarios, con la diferencia de que se instalará en el microcontrolador de cada sistema.
- En el Anexo A, se incluye un diagrama de flujo que describe las instrucciones que ha de ejecutar el sistema de filtrado inalámbrico, en él se puede apreciar la lógica que debe seguirse a la hora de hacer la programación, por ejemplo: Se observa que cuando el sistema está encendido, es posible recibir instrucciones provenientes del control manual, así como del control inalámbrico. Si la instrucción que se recibe es la de Drenar entonces, se activa la electroválvula 1 permitiendo liberar el agua contenida en el tanque principal y conduciéndola a través del filtro y hacia el tanque secundario, si durante este proceso no se recibe la instrucción de paro entonces, el microcontrolador enviará una señal que encenderá la bomba la cual enviará el agua del tanque secundario a el principal. Si la instrucción que se recibe es la de Filtrar entonces quiere decir que el tanque secundario está lleno de agua por lo tanto se activa la bomba y se envía el agua hacia el tanque principal. Por último, la opción de Re-filtrar, acciona la electroválvula 2 y la bomba para dirigir el agua del tanque principal por un camino distinto hacia el filtro nuevamente. Si el

botón de parar se presiona durante algún proceso, el microcontrolador detendrá toda acción y quedará en espera de una nueva instrucción.

En la figura 4.1 se observa un diagrama que ilustra las partes que integran el sistema de filtrado inalámbrico.

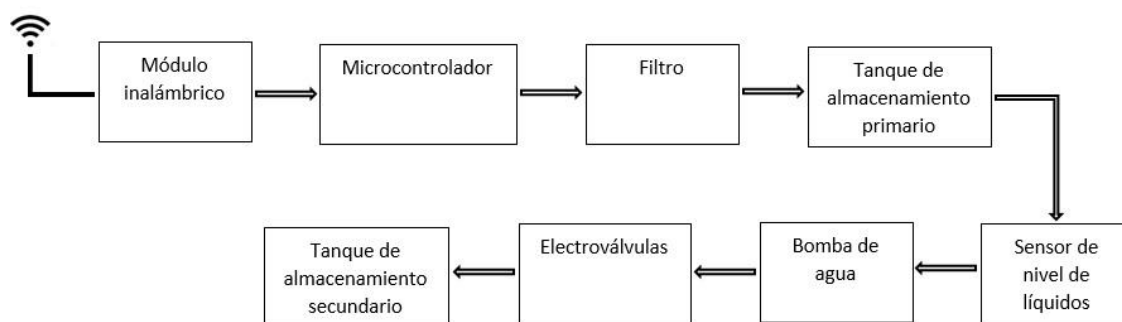


Fig. 4.1. Diagrama a bloques del sistema inalámbrico de filtrado

En un principio, el usuario podrá interactuar con el sistema de filtrado a través del control inalámbrico, enviando instrucciones en tiempo real, así como controlar el tiempo de ejecución de cada proceso.

El microcontrolador recibe las instrucciones y manda las ordenes necesarias para llevarlas a cabo. La prioridad del sistema será almacenar la mayor cantidad de agua de lluvia y filtrarla.

El filtro retendrá las partículas contaminantes y agentes patógenos, con la finalidad de que el agua disponible para los usuarios tenga los niveles de calidad que la OMS exige.

El Tanque de almacenamiento primario, contiene el agua que ha sido filtrada en al menos una ocasión, en espera de ser conducida a través del filtro una vez más o llevada hacia el tanque secundario.

El sensor de nivel de líquidos tiene la tarea de proteger a la bomba de agua, evitando que los niveles de agua sean lo suficientemente bajos para que la bomba trabaje en seco, esta acción prevendrá un sobre calentamiento.

La bomba será la encargada de impulsar el agua a través de las tuberías del sistema, conduciéndola del tanque de almacenamiento primario, al filtro o al tanque secundario.

Las electroválvulas permitirán el paso del agua en alguna dirección, esto permitirá controlar su camino a través del filtro, el rumbo que el agua tome, dependerá de las instrucciones que el usuario introduzca en el sistema.

Por último, el tanque secundario almacenará el agua que ha concluido su proceso de filtrado y que está lista para ser utilizada por el usuario.

Un prototipo si bien es cierto, no opera de forma exacta como lo haría el diseño original, ofrece una visión general de cómo se comportaría el modelo real, únicamente variando algunos parámetros como son en este caso: la altura, la potencia de la bomba, el tamaño de las tuberías, capacidad de los tanques, etc.

En esta sección se pretende construir un prototipo que simule el actuar del sistema de filtrado controlado inalámbricamente. El prototipo estará constituido por un modelo escala de una casa, el cual contará con un tanque de almacenamiento de agua, una tubería que conducirá el agua de la azotea a través del filtro y hacia el tanque secundario, una bomba que transportará el agua captada y filtrada hacia el tanque principal, el control manual y por supuesto el control inalámbrico el cual es la esencia de este proyecto.

Aunque el sistema de filtrado que se propone en este proyecto es muy completo, el prototipo solo ejecutara la acción de transportar el agua del tanque secundario al tanque principal, no contará con un filtro verdadero, ni tendrá las electroválvulas con las que se pretende direccionar el flujo del agua.

Parecería entonces que se están dejando de lado muchas cosas, sin embargo, se debe entender que este proyecto pertenece al área de telecomunicaciones por lo que la parte fuerte en este estudio que compete a dicha área se encuentra en el control inalámbrico y es por este motivo que el objetivo del prototipo será el garantizar la correcta operación del control inalámbrico.

Un primer paso para comenzar con la construcción de este prototipo, es seleccionar el tipo de microcontrolador con el que se ha de trabajar, pues hay que tomar en cuenta que cada microcontrolador se programa de diferente manera, según el fabricante; y aunque hoy en día el propósito de los diseñadores en el área de la electrónica es el de facilitar la tarea de sus consumidores, cuando se habla de programar es mejor transitar por un camino conocido, para así aprovechar los conocimientos que ya se tienen, ya que esto se traducirá en un considerable ahorro de tiempo.

Por lo anterior se evaluarán un par de opciones de microcontroladores los cuales son conocidos de forma popular como amigables, además de que resultan familiares ya que en las prácticas de materias como “Programación de microcontroladores” y “Microcontroladores y periféricos”, se tuvo la oportunidad de utilizarlos.

Un microcontrolador es un sistema digital de alta capacidad de procesamiento de información, recibe datos de entrada y genera resultados a alta velocidad y con gran exactitud mediante la ejecución de programas (Arduino, 2016).

Un microcontrolador combina los recursos fundamentales disponibles en un microcomputador, es decir, la unidad central de procesamiento (CPU), la memoria y los puertos de entrada y salida, en un único circuito integrado.

En general la organización de un microcontrolador se muestra en la figura 4.2.

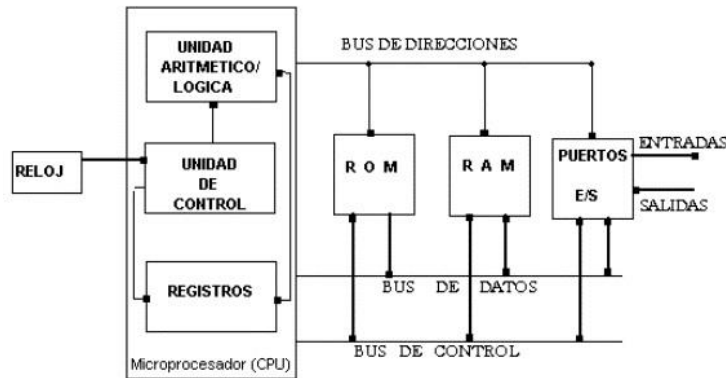


Fig. 4.2. Diagrama de bloques general de un microcontrolador (ITphonet, 2017)

En otras palabras, un microcontrolador es un pequeño computador capaz de enviar y recibir información, esto representa la posibilidad de realizar una conexión entre este equipo y otros sistemas finales, permitiendo incorporar el sistema de control a una red local. Esto sin duda brinda un panorama muy emocionante, ya que permite imaginar libremente que el sistema de filtrado puede ser controlado utilizando los sistemas finales como computadoras, celulares, laptops, etc. Sin olvidar que algunos de los sistemas finales mencionados pueden acceder a la red de forma inalámbrica. Entonces cualquier dispositivo de los mencionados podría fungir como el control inalámbrico del sistema de captación y filtrado de agua de lluvia.

#### 4.1 Seleccionando el sistema mínimo

Para seleccionar el sistema mínimo se hará una comparación entre el microcontrolador Arduino Uno y el Pic 16F887, inclinado la balanza a favor de aquel que sea más económico y que mejor se ajuste a las necesidades de este proyecto

- Sistema mínimo Arduino

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basado en hardware y software fácil de usar. Está dirigido a cualquier persona que hace proyectos interactivos.

Arduino es una herramienta para hacer que los ordenadores puedan analizar y controlar el mundo físico a través de su ordenador personal. Se trata de una plataforma de desarrollo de computación física de código abierto, basada en una placa con un sencillo microcontrolador y un entorno de desarrollo para crear software para la placa (Arduino, 2017).

Es posible utilizar Arduino para crear objetos interactivos, leyendo datos de una gran variedad de interruptores y sensores y así poder controlar una amplia gama de luces, motores y otros actuadores físicos. Los proyectos con Arduino pueden ser

autónomos o comunicarse con un programa que se ejecuta desde el ordenador (Arduino, 2017).



Fig. 4.3. Sistema mínimo Arduino UNO (Arduino, 2017).

En la tabla 4.1 se muestran las especificaciones técnicas de la placa Arduino:

<b>Microcontrolador</b>	<b>ATmega328</b>
<b>Voltaje de operación</b>	5V
<b>Voltaje de entrada (Recomendado)</b>	7-12V
<b>Entradas/salidas Digitales</b>	14 (de las cuales 6 proporcionan salidas PWM)
<b>Entradas analógicas</b>	6
<b>DC corriente para pines E/S</b>	40mA
<b>DC corriente para pin de 3.3V</b>	50mA
<b>Memoria flash</b>	32KB(ATmega328)
<b>SRAM</b>	2KB(ATmega328)
<b>EEPROM</b>	1KB(ATmega328)
<b>Velocidad de reloj</b>	16MHz

Tabla 4.1. Especificaciones técnicas Arduino uno (Arduino, 2017).

#### Descripción de la placa Arduino

En la figura 4.4 se observa dentro de un recuadro rojo la entrada de corriente y las salidas. Arduino puede ser alimentado mediante la conexión USB o mediante una fuente externa (se recomienda 7-12V), pero cualquiera que sea el caso se obtienen salidas de tensión continuas, esto debido a unos reguladores de tensión y condensadores de estabilización. Dentro del recuadro verde se aprecian los 14 pines digitales que pueden ser utilizados como entradas o salidas. Cada pin puede suministrar o recibir un máximo de 40mA y tiene una resistencia de pull-up de 20-50kΩ. En el recuadro amarillo se encuentran 6 entradas analógicas, cada una de las cuales ofrecen 10 bits de resolución es decir 1024 estados. Por defecto, tenemos una tensión de 5V, pero podemos cambiar este rango utilizando el PIN AREF y utilizando la función `analogReference()`, donde se le introduce una señal externa de corriente continua que sirve como referencia (Arduino, 2017).

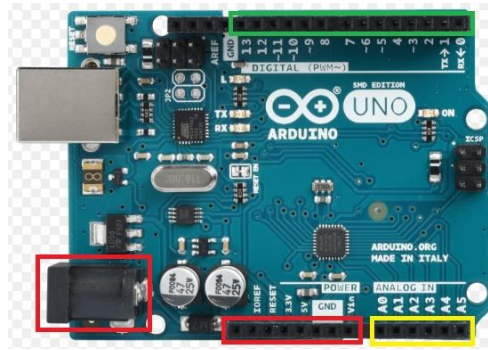


Fig. 4.4. Elementos que conforman la tarjeta Arduino Uno (Arduino, 2017).

El circuito mínimo Arduino tiene un costo en el mercado de aproximadamente **\$200**.

- Microcontrolador PIC16F887

El PIC16F887 es un producto conocido de la compañía Microchip. Dispone de todos los componentes existentes en la mayoría de los microcontroladores modernos. Por su bajo precio, un rango amplio de aplicaciones, alta calidad y disponibilidad, es una solución perfecta al aplicarlo para controlar diferentes procesos en la industria, en dispositivos de control de máquinas, para medir variaciones de procesos, etc. (Microchip Data Sheet).

Características básicas del PIC16F887:

Arquitectura RISC:

El microcontrolador cuenta con solo 35 instrucciones diferentes, mientras que otros controladores utilizan más de 200.

Todas las instrucciones son un ciclo excepto las de ramificación.

- Frecuencia de operación 0-20MHz.
- Oscilador interno de alta precisión con un rango de frecuencias de 8MHz a 31KHz seleccionado por software.
- Voltaje de la fuente de alimentación de 2V a 5.5V, 220 $\mu$ A a 4MHz.
- Ahorro de energía en modo suspensión.
- 35 pines de entrada/salida.
- Memoria ROM de 8K con tecnología flash.
- Opción de programación serial en el circuito.
- 256 bites de memoria EEPROM.
- 368 bytes de memoria RAM.
- Convertidor A/D. 14 canales con una resolución de 10 bits.
- 3 temporizadores/contadores independientes.
- Temporizador de perro guardián.
- Modulo comparador analógico con analógico o referencia de voltaje fijo de 0.6V o programable en el chip.

- Módulo PWM incorporado.
- Módulo USART mejorado.

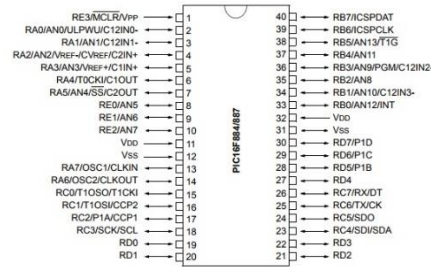


Fig. 4.5. Microcontrolador PIC16F887 (Microchip Data Sheet).

El precio aproximado en el mercado del PIC16F887 es de \$55.

Una cosa a considerar es que el PIC16F887 no puede alcanzar por si solo el fin que se ambiciona en este proyecto ya que para poder interactuar con los sensores y la bomba que hará circular el agua a través del sistema de filtrado, necesita de una memoria y puertos de entrada y salida. Crear la interfaz entre el microcontrolador y los periféricos implica un verdadero reto que, en vez de aportar a la efectiva realización de este proyecto, se convierte en un importante obstáculo.

Sin embargo, existen tarjetas de desarrollo basadas en el PIC16F887 que incorporan memoria, puertos de entrada y salida, como es el caso del siguiente sistema mínimo:

- Tarjeta PIC-DIP40 con Bootloader

Es un auxiliar excelente en el desarrollo y prueba de prototipos, ya que cuenta con la mayoría de las interfaces que las aplicaciones exigen.

La tarjeta de desarrollo PIC-DIP40 cuenta con un PIC16F887 con bootloader incluido lo que elimina la necesidad de comprar un programador externo y permite ser programado directamente vía serial por su puerto RS-232 a través de un conector DB9 o vía ICSP siendo compatible con PICKIT 2, PICKIT 3 y K150 (Microchip Data Sheet).

La tabla 4.2 describe las características del PIC-DIP40:

Microcontrolador	PIC16F887
Voltaje de alimentación	5V CD
Puerto serie programable por	RS232
Teclado	4 teclas independientes
Puerto ICSP	Compatible con PICKIT 2, 3 y K150
Interface	Pantalla LCD 16x2, 128x64, DS18B20
8 LEDs	Incluyen jumper de habilitación

Tabla 4.2. Características técnicas PIC-DIP40 (Microchip Data Sheet).

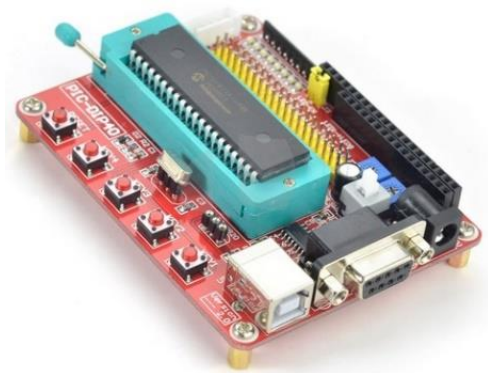


Fig. 4.6. Tarjeta de desarrollo DIP-PIC40 (Microchip Data Sheet).

El precio aproximado de la tarjeta PIC-DIP40 en el mercado es de \$400.

Considerando la información anterior es posible realizar una comparación entre ambos microcontroladores y seleccionar de entre ellos al que mejor se ajuste a las necesidades de este proyecto.

En este tenor, Arduino resulta ser más económico, también es más amigable ya que cuenta con una amplia gama de sensores, válvulas y tarjetas Wifi que serán de mucha utilidad a la hora de armar el prototipo, aunado a esto, es necesario complementar diciendo que, Arduino utiliza un lenguaje de programación (sin menospreciarlo claro está) relativamente más digerible, por lo tanto, es sin duda este sistema mínimo el que se utilizará para el desarrollo de dicho proyecto.

Paradójicamente la elección del microcontrolador, resuelve una pequeña cuestión, pero trae consigo una serie de nuevos conflictos que deben comenzar a tratarse de forma inmediata en esta mesa de debate. Esto es resultado de que Arduino uno, solo tiene 14 pines que pueden configurarse como entradas o salida digitales.

En un punto de este trabajo se planteó la necesidad de un panel de control manual, pues podría existir el escenario en el cual, por alguna razón, el acceso a la red resulte imposible, por ejemplo, que el enrutador se descomponga. En un escenario así el control vía remota sería obsoleto, por lo tanto, es fundamental prevenir este acontecimiento instalando un control manual en el sistema de filtrado.

Por su puesto que lo que se espera es que el sistema de control manual sea tan sencillo y fácil de operar para cualquier persona, por lo que el circuito debe responder al simple toque de un botón, para ejecutar sus acciones. Recapitulando, las acciones propuestas contemplaban la posibilidad de drenar el tanque principal, también la opción de refiltrar el agua contenida en el tanque de almacenamiento y por último ejecutar la instrucción de transportar el agua del tanque inferior al tanque superior.

Lo anterior supone que habrá un botón por cada operación, por lo que es necesario contemplar la necesidad de tener al menos 3 botones, más un cuarto como paro de

emergencia, también se debe tener en cuenta que en la toma de decisiones el sistema mínimo estará preguntando constantemente por 3 sensores y activará 2 electroválvulas además de la bomba de agua.

Hasta este punto necesitaremos 10 pines digitales de los 14 disponibles en la placa de Arduino sin embargo, para el control del módulo Wifi se ocupan 2 más, y los que se agreguen en el camino, por lo que el problema del que se hablaba en párrafos anteriores consiste básicamente en hacer rendir la cantidad de pines digitales que el sistema ofrece.

Dentro de la ficha técnica de Arduino se encontró información muy útil como lo es el hecho de contar con 6 entradas analógicas, cuando se analizó Arduino uno, se observó que estas entradas constan de 10 bits de resolución, referenciados a 5V. Esto implica que se tiene un rango con un máximo de 1024 unidades para representar estos 5V. En otras palabras, si se introduce una señal de 5V a cualquiera de las entradas analógicas de Arduino, este devolverá su equivalente que es el número 1024, si se disminuye el voltaje en la entrada, entonces se tendrá un número correspondiente a dicho voltaje y así sucesivamente.

El hecho anterior puede ser utilizado para crear un teclado analógico y ubicarlo en una sola de las 6 entradas analógicas de Arduino uno, liberando 4 pines digitales para su uso posterior, esto representa una gran ventaja ya que se necesitarán varios pines digitales para conectar los sensores y activar las válvulas del sistema de filtrado, tal vez así sea posible dar solución al cuestionamiento de la saturación de los pines digitales.

## 4.2 Armado del teclado analógico

Un teclado en general consta esencialmente de una fuente de voltaje de entrada, considerando el voltaje que Arduino acepta en sus entradas analógicas, se usará una fuente de 5V, algunos switches y varias resistencias. Como ya se ha dicho al menos se debe contar con 4 botones, por lo tanto, se habrá de dividir el voltaje de entrada en 4 valores; aunque es posible incluir más botones en esta aplicación no será así, pues se desea evitar que los valores de voltaje correspondientes a cada botón estén muy próximos entre sí pues eso podría generar lecturas erróneas.

Para desarrollar esta aplicación se dividirá en primer lugar el voltaje de entrada en 4, dando como resultado:

$$V_1 = 5V, \quad V_2 = 3.75V, \quad V_3 = 2.5V, \quad V_4 = 1.25V$$

Ahora, se sabe que:

$$5V \approx 1024$$

Por lo tanto:

$$3.75V \approx 768, \quad 2.5V \approx 512 \quad \text{y} \quad 1.25V \approx 256$$

Esos son los valores que Arduino uno asignará en cualquiera de sus entradas analógicas a cada uno de los voltajes propuestos. A continuación, para conseguir esos valores de voltaje únicamente se necesita construir un divisor de tensión, para poder encontrar los valores de las resistencias que se deben usar, ya que teóricamente un divisor de tensión puede devolver el voltaje que pasa a través de una resistencia, que se encuentra en serie con otro resistor y una fuente de voltaje en baja potencia.

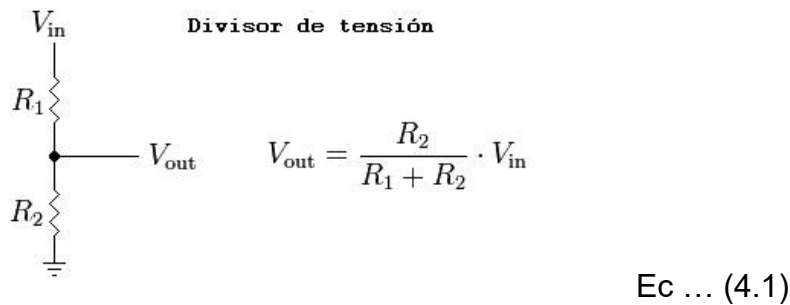


Fig. 4.7. Cálculo del divisor de tensión (Malvino, 2000)

En la figura 4.7, se aprecia la ecuación que describe el comportamiento de un divisor de tensión, así pues, haciendo uso de ella se realiza el cálculo del valor de  $R_1$ , que permitirá obtener el voltaje deseado sobre  $R_2$ .

Despejando ecuación 4.1 para conocer  $R_1$ :

$$R_1 = \left[ \left( \frac{R_2}{V_{out}} \right) V_{in} \right] - R_2 \quad \text{Ec ... (4.2)}$$

Entonces, una vez que se ha concluido el despeje, se procede a calcular los valores de  $R_1$  correspondientes a cada voltaje de salida propuesto.

Para  $V_{out} = 3.75V$ :

$$R_1 = \left[ \left( \frac{1k \Omega}{3.75V} \right) 5V \right] - 1k \Omega \Rightarrow R_1 = 333.33 \Omega$$

Para  $V_{out} = 2.5V$ :

$$R_1 = \left[ \left( \frac{1k \Omega}{2.5V} \right) 5V \right] - 1k \Omega \Rightarrow R_1 = 1k \Omega$$

Para  $V_{out} = 1.25V$ :

$$R_1 = \left[ \left( \frac{1k \Omega}{1.25V} \right) 5V \right] - 1k \Omega \Rightarrow R_1 = 3k \Omega$$

Como era de esperar no es necesario se realice el cálculo para  $V_1$  ya que este voltaje debe ser igual al de la fuente de entrada. También se aprecia que se ha dado un valor arbitrario a  $R_2 = 1k\Omega$ , y se ha hecho así pues  $1k\Omega$  es un valor típico en electrónica.

A continuación, para analizar el comportamiento del circuito y poder constatar que es el esperado, se realiza una simulación en Multisim; que es un software muy utilizado para la simulación de circuitos en electrónica. También se construirá el circuito en físico, con la finalidad de comparar los resultados teóricos y prácticos. Finalmente, se utilizará el monitor serial de Arduino, para observar los valores que se asignan para cada valor de voltaje introducido en el pin analógico A0.

Valor propuesto para $R_1$	Voltaje en Multisim	Voltaje Circuito físico	Valor asignado en Arduino
<b>0 <math>\Omega</math></b>	5 V	5.20 V	1023
<b>333.33 <math>\Omega</math></b>	3.75 V	3.88 V	710
<b>1 k<math>\Omega</math></b>	2.5 V	2.56 V	511
<b>3 k<math>\Omega</math></b>	1.25 V	1.28 V	257

Tabla 4.3. Comparativa entre los valores de voltaje que se obtienen de forma teórica y práctica

En la Tabla 4.3 se observa la similitud de los resultados obtenidos en el simulador y en el circuito físico, además en la columna de valores asignados por Arduino, se aprecia que los resultados son contundentes con los cálculos matemáticos. En el Anexo A, se encuentran los detalles de las simulaciones y del circuito físico, así como el programa con el cual, se le asignaron las instrucciones necesarias al microcontrolador Arduino para que leyera y mostrara los resultados en el monitor serial.

### 4.3 Etapa de alta potencia

Al realizar la elección entre los sistemas mínimos sugeridos, se dijo que trabajar con Arduino uno, sería una opción sencilla, ya que existen disponibles en el mercado una gran variedad de sensores y válvulas que utilizan corriente directa (CD) para funcionar, por lo cual Arduino uno, podría leerlos y controlarlos de forma simple en sus pines digitales. Sin embargo, hay un detalle importante en el diseño del filtro que debe tratarse con mayor cuidado y es, que necesita de una bomba sumergible para poder circular el agua a través del sistema de filtrado y hacia el tanque principal. Dicha bomba utiliza corriente alterna (AC) para funcionar, por lo que es necesario un circuito que permita el control de equipos que operan en alta potencia desde un dispositivo que genera una señal de baja potencia.

Lo anterior no representa un problema nuevo para la electrónica, pues hoy en día existen varios dispositivos electrónicos que pueden ayudar a realizar con éxito esta tarea. La elección del circuito que mejor se ajusta a las necesidades de este proyecto, se centra en un detalle muy importante. Se trata de la necesidad de

mantener aislada la etapa de baja potencia de la etapa de alta potencia; pues en caso contrario, un regreso de corriente desde la etapa de alta potencia, podría quemar al instante el circuito de baja potencia, que en este caso es el sistema mínimo Arduino uno. Tomando en cuenta lo anterior, es posible que los dispositivos electrónicos llamados Tiristores sean una opción efectiva. A continuación, se dará una breve explicación de su funcionamiento.

- Tiristores

La palabra tiristor viene del griego y significa “puerta”, puesto que se comporta como una puerta que se abre y permite el paso de corriente a través de ella. Un tiristor es un dispositivo semiconductor que utiliza realimentación interna para producir un nuevo tipo de conmutación. Los tiristores más importantes son los rectificadores controlados de silicio (SCR: *Silicon Controlled Rectifier*) y el triac. Al igual que los FET de potencia, el SCR y el triac pueden conmutar grandes corrientes. Por ello la principal aplicación de estos dispositivos es el control de grandes corrientes de carga para motores, calentadores, sistemas de iluminación y otras cargas semejantes (Malvino, 2000).

- El Rectificador Controlado de Silicio

El SCR es el tiristor que más se usa. Puede conmutar corrientes muy elevadas y, por ello se emplea en control de motores, hornos, sistemas de aire acondicionado y calentadores de inducción.

En la figura 4.21 Se observa un SCR formado por 2 transistores, también conocido como cerrojo de compuerta.

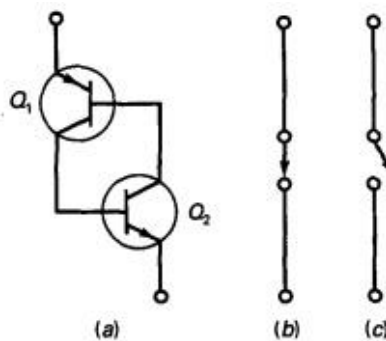


Fig. 4.8. Cerrojo formado por dos transistores (Malvino, 2000)

- Disparo para activar el cerrojo de la compuerta

Añadiendo un terminal de entrada en la base de  $Q_2$ , como se muestra en la figura 4.8 inciso a), se puede crear una manera de activar el cerrojo. Así es como funciona teóricamente: al abrirse el cerrojo, como lo hace en la figura 4.9 inciso b), el punto

de trabajo está en el extremo inferior de la recta de carga para continua. Para activar el cerrojo, es posible introducir un disparador (pulso afilado) en la base de  $Q_2$ , como se refleja en la figura 4.9 inciso a). El disparo incrementa momentáneamente la corriente de base de  $Q_2$ . Esto inicia la realimentación positiva, lo que lleva a ambos transistores a saturación. En este estado ambos transistores parecen, idealmente, cortocircuitos y el cerrojo permanece activo. En el caso ideal, el cerrojo tiene tensión cero cuando está activado y el punto de trabajo está en el extremo superior de la recta de carga (Malvino, 2000).

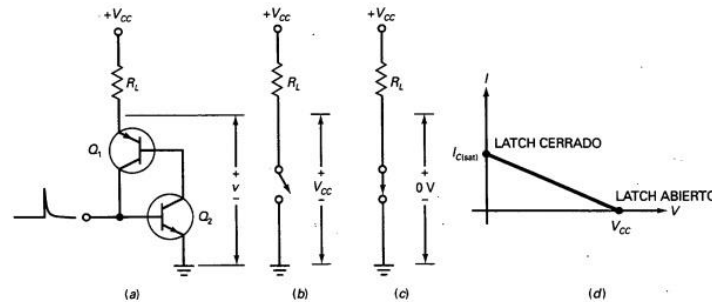


Fig. 4.9. Transistores de un cerrojo con disparo de entrada (Malvino, 2000)

- El Triac

El triac actúa como dos rectificadores controlados de silicio en paralelo e invertidos fig. 4.10 inciso a); este dispositivo es equivalente a dos cerrojos fig. 4.10 inciso b). Por ello, el triac puede controlar la corriente en cualquier dirección. Si  $V$  tiene la polaridad que se observa en la fig. 4.9 a), tenemos que aplicar un disparo positivo, activando el cerrojo izquierdo. Cuando  $V$  tiene la polaridad opuesta, se necesita un disparo negativo, activando el cerrojo de la derecha. La figura 4.10 inciso c) muestra el símbolo eléctrico para un triac (Malvino, 2000).

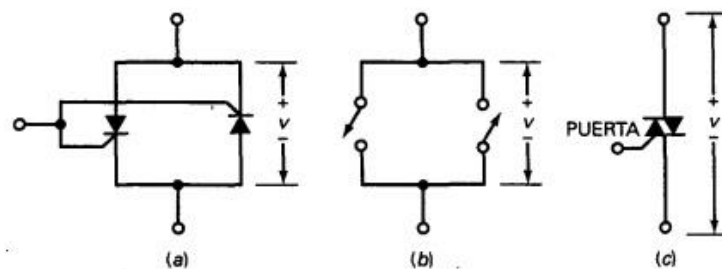


Fig. 4.10. Triac (Malvino, 2000)

Una ventaja de los triacs es que se le puede encontrar en una gran variedad de modelos que pueden soportar grandes corrientes, por ejemplo el Q4008L4 es un triac que soporta una corriente máxima de 25A y una tensión de 400V en AC. Aunque puede parecer mucho, se recomienda siempre utilizar un dispositivo que soporte 2 o 3 veces el voltaje y la corriente requerida por la carga, por lo que en

este caso dicho modelo de triac resulta una excelente opción para satisfacer las necesidades que esta aplicación demanda.

Sin embargo, ya que el triac es un dispositivo bidireccional, no resuelve el problema que se genera en caso de un regreso de corriente, por otro lado, necesitamos proporcionar una corriente de disparo que active el funcionamiento del triac, por lo que a continuación analizaremos otro dispositivo llamado optoacoplador.

- Optoacopladores

Los optoacopladores, también llamados elementos de acoplamiento optoelectrónicos, permiten transmitir señales entre dos circuitos de corriente separados galvánicamente entre sí. Entre los dos circuitos de corriente puede haber una diferencia de potencial de varios miles de volts. En el interior del optoacoplador hay un diodo luminoso que actúa de emisor y, por ejemplo, un fototriac o un fototriac que actúa de receptor. Para el transmisor se suelen utilizar generalmente diodos GaAs infrarrojos. Tienen un alto grado de rendimiento y son resistentes al envejecimiento. Van cerrados herméticamente a la luz hacia el exterior (Bastian, 2001).

Una ventaja muy grande en los optoacopladores es que se encuentran bien aislados, el diodo emisor de luz infrarroja y el fototriac, ya que la comunicación entre ellos es a través de la luz y nada más, por lo que resulta ser una excelente opción para conseguir el propósito de aislar las etapas de potencia, al mismo tiempo que entregamos la corriente de disparo necesaria para iniciar la realimentación positiva en los cerrojos del triac.

El MOC3022 es un tipo de optoacoplador formado por un led infrarrojo ópticamente acoplado a un switch bilateral de silicio (triac). Es recomendado para aplicaciones de  $115/240 V_{ac}(rms)$  como son: control de válvulas solenoides, control de motores, lámparas de balastros, entre otras más.

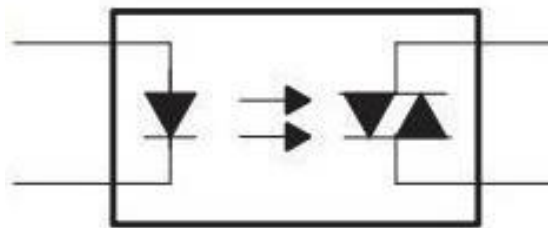


Fig. 4.11. Diagrama lógico MOC 3022 (Motorola Datasheet)

Debido a que el diodo led infrarrojo del MOC 3022, requiere de una fuente de alimentación no mayor a los  $1.5V$  y  $60mA$ , se convierte en una opción adecuada para este proyecto, ya que el sistema mínimo Arduino uno, tiene las características técnicas para satisfacer estos requerimientos.

Con base a la información anterior, se concluye que teóricamente el triac Q4008L4 y el MOC3022, forman el circuito adecuado para controlar desde el sistema mínimo Arduino uno, la bomba que transportará el agua a través del sistema de filtrado.

La bomba de agua juega un papel muy importante en este proyecto, sin embargo, la bomba por sí sola no es capaz de direccionar el agua por un camino en particular, por lo que, para ejecutar las acciones mencionadas, será necesario apoyarse de un conjunto de válvulas de paso para poder controlar el camino que debe seguir el flujo de agua.

Existen en el mercado un tipo de válvulas solenoides muy sencillas y económicas, que requieren ser alimentadas con un voltaje de 12v en corriente continua, este hecho las hace adecuadas para ser operadas a través del sistema mínimo Arduino. Ya que, aunque Arduino no ofrece más que 5 volts en sus salidas digitales, es posible con el uso de un regulador controlar desde Arduino estas válvulas.

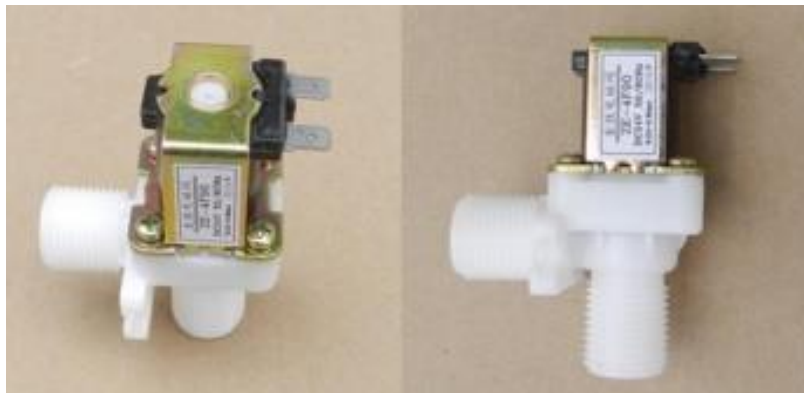


Fig. 4.12. Válvula solenoide de 12v (Obtenida de <http://aaf latinoamerica.com>)

Otra ventaja en estos dispositivos es que pueden acoplar fácilmente con una tubería de cobre o de PVC.

Las válvulas solenoides tienen un costo aproximado de **\$150** cada una.

Otra cuestión muy importante es que la bomba que se ha propuesto para el diseño del prototipo, es una bomba sumergible, por lo tanto, se debe tener en cuenta el hecho de que el nivel mínimo de agua no debe dejar al descubierto la bomba, ya que el agua controla la temperatura de la bomba cuando esta está operando y en ausencia de agua dicha bomba se quemaría por un sobrecalentamiento.

Para evitar que el nivel de agua descienda por debajo del límite recomendado, será necesario instalar un sensor de nivel de líquidos como el que se muestra en la siguiente imagen.



Fig. 4.13. Sensor de nivel de líquidos (obtenida de <http://aaflatinoamerica.com>)

Este sensor envía una señal digital, que puede ser leída sin problemas en cualquiera de los pines digitales de Arduino.

El sensor de nivel de líquidos tiene un costo en el mercado de \$43.

#### 4.4 Programación de Arduino para la construcción del prototipo

Como se mencionó con anterioridad, el prototipo que se propone en este capítulo, tiene como objetivo el apoyar en la evaluación del control inalámbrico del sistema de captación y filtrado de agua de lluvia, por lo que se limitarán sus funciones.

Se propone que el prototipo permita encender el filtro manual e inalámbricamente, cuando el microcontrolador reciba una señal, encenderá la bomba que conducirá el agua almacenada en el tanque secundario, hacia el tanque principal, el agua se drenará del tanque principal hacia el filtro por acción de la gravedad y tendrá como destino el tanque secundario nuevamente.

En la figura 4.14 se muestra el diagrama de flujo que ejemplifica la lógica que el sistema utilizará para la toma de decisiones en la ejecución de cada instrucción.

- En primer lugar, el sistema espera por una señal proveniente del control manual o del inalámbrico. Para el prototipo la única opción que se tendrá habilitada será la de filtrar.
- Si se recibe la opción de Filtrar, entonces se preguntará por el sensor de nivel, si el sensor de nivel tiene un valor lógico de 0, quiere decir que el tanque secundario no tiene suficiente agua por lo que la prioridad será proteger a la bomba e ignorará la instrucción. En caso contrario si el valor del sensor de nivel es un 1 lógico, entonces encenderá la bomba y enviará el agua hacia el tanque principal.
- La otra opción disponible en el prototipo será la de Paro, la cual tendrá la tarea de suspender cualquier acción que se esté ejecutando. Por lo tanto, una vez que el sistema reciba la instrucción de Filtrar, este no se detendrá hasta no recibir la orden de Paro.

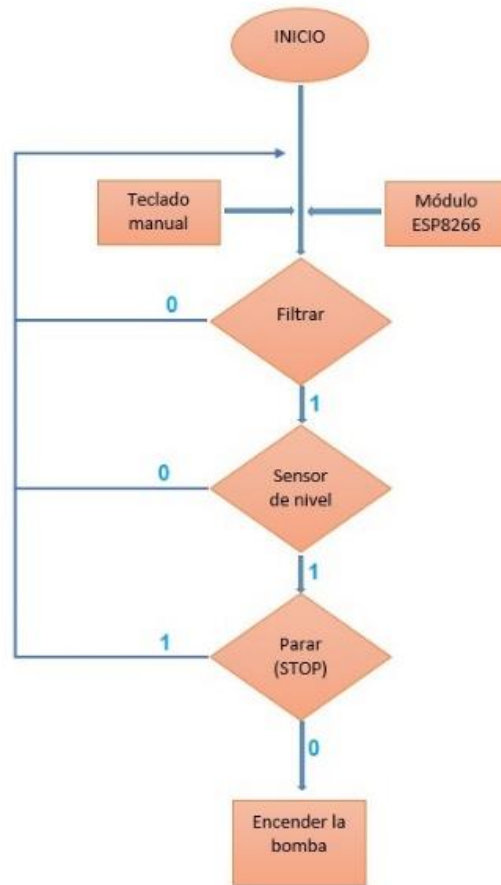


Fig. 4.14. Diagrama de flujo del programa de control en Arduino

#### 4.5 Módulo ESP8266

El ESP8266 es un módulo WiFi, de bajo costo, diseñado para agregar todas las ventajas de una conexión WiFi a un proyecto en el que existe un microcontrolador, a través de una conexión en serie Transmisor-Receptor Asíncrono Universal (UART: *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*). El UART es un dispositivo que controla los puertos y dispositivos en serie, permitiendo la comunicación entre este módulo y cualquier microcontrolador (ESP8266 Module Quick Start Guide).

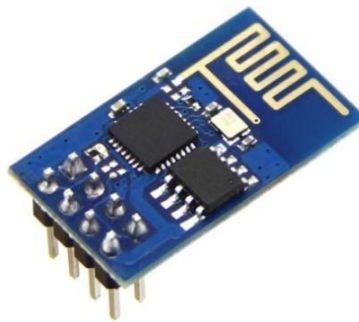


Fig. 4.15. Módulo ESP8266 (ESP8266 Module Quick Start Guide).

Características:

<b>Estándar WiFi</b>	<b>802.11 b/g/n</b>
<b>Paquetes incluidos</b>	TCP y UDP
<b>Modos</b>	Cliente y Servidor
<b>Sockets</b>	5
<b>Modo de Punto de Acceso</b>	P2P, Soft-AP
<b>Tamaño</b>	21 x 11 mm
<b>Interface</b>	TTL Serial
<b>Corriente de entrada</b>	60 mA
<b>Pines digitales</b>	2
<b>Microcontrolador programable</b>	Si
<b>Potencia de salida en modo 802.11b</b>	+19.5dBm
<b>Sensibilidad</b>	-80dBm
<b>Ganancia en la antena</b>	1.5 dBi

Tabla 4.4. Características técnicas del módulo ESP8266 (ESP8266 Module Quick Start Guide).

Este módulo permite cerrar la brecha que existe entre el control manual del filtro de agua de lluvia y la red local del usuario, pues antes de introducirlo en este proyecto, no había una manera concreta de acceder al microcontrolador de forma inalámbrica. Una de las principales ventajas de este dispositivo, es su gran compatibilidad con el sistema mínimo arduino, incluso arduino tiene una salida de voltaje que suministra 3.3 v, que es precisamente el voltaje de alimentación demandado por el módulo ESP8266.

Para conseguir el propósito de este proyecto, se hará uso del módulo ESP8266, basado en el estándar 802.11 que como ya se ha visto, es el estándar que define la red inalámbrica o red WiFi.

El módulo ESP8266 fue seleccionado por su funcionalidad y bajo costo. Además, este módulo satisface por mucho todas las necesidades que en el desarrollo de este proyecto se presentaron.

Algo muy interesante que se ha observado en el desarrollo de este proyecto es que el módulo ESP8266 no solo se puede programar utilizando comandos AT, sino que es posible cargar un algoritmo directamente en el microcontrolador que el módulo contiene, utilizando el IDE de Arduino.

Lo anterior representa una gran ventaja, ya que ofrece la oportunidad de operar un gran número de actuadores, como son leds, sensores, válvulas, motores, etc. Utilizando únicamente el módulo ESP8266 y aprovechando su potente microcontrolador y sus pines digitales, los cuales se pueden configurar como entradas o salidas.

Para los objetivos de este proyecto, dichos pines resultan insuficientes, por lo que el módulo Wifi, será el encargado de la comunicación inalámbrica, mientras que el sistema Arduino, se encargará del control de los procesos. Aunque la posibilidad de

omitir el sistema mínimo Arduino en un gran número de aplicaciones es una realidad y representa un panorama excitante para cualquier persona interesada en desarrollar aplicaciones inalámbricas y más aún porque la familia de módulos ESP8266 ha crecido mucho y a la fecha cuenta con módulos muy completos, potentes y con un gran número de pines digitales.

En este proyecto se utilizará el módulo ESP8266 configurándolo como un servidor que almacenará una página web muy sencilla, a través de la cual el usuario enviará instrucciones al sistema mínimo Arduino, al mismo tiempo que desde la misma podrá conocer el estado del filtro.

Al conectarse el módulo ESP8266 a la red local del usuario, se tendrá la posibilidad de acceder al módulo a través de cualquier dispositivo capaz de visualizar la página web, como puede ser: un celular, una Tablet o una computadora.

Una vez que el usuario comienza a enviar o recibir información desde su dispositivo móvil hacia el sistema de filtrado, se habrá de entender que cada uno de los puntos descritos en el capítulo III se están llevando a cabo, con la finalidad de establecer un enlace dedicado entre el modem y el módulo WiFi. Si la comunicación entre el usuario y el sistema de filtrado inalámbrico se da sin errores, entonces se infiere que el enlace es estable.

No obstante, entre los dispositivos WiFi existen factores que pueden impedir la creación del enlace y que están relacionados con las pérdidas que la señal sufre al propagarse a través del medio e igualmente al interactuar con los distintos obstáculos que interfieran en su camino.

Recordemos que en un enlace en espacios abiertos la potencia de la señal se reduce por el ensanchamiento del frente de onda en lo que se conoce como Pérdida en el Espacio libre. La potencia de la señal se distribuye sobre un frente de onda de área cada vez mayor a medida que nos alejamos del transmisor, por lo que la densidad de potencia disminuye, tal como se muestra en la figura 4.16 (Physics, 2011).

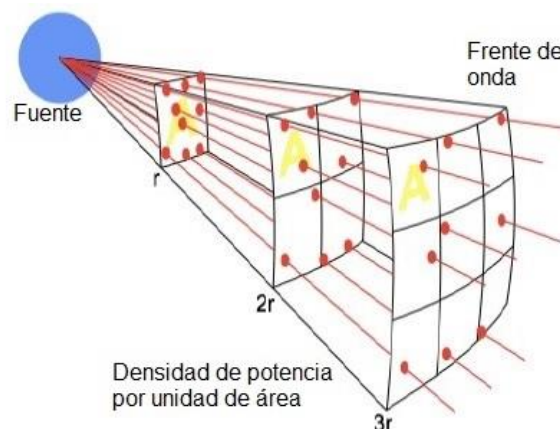


Fig. 4.16. Densidad de potencia (obtenida de [http://www.upv.es/antenas/Densidad\\_pot\\_radiada.htm](http://www.upv.es/antenas/Densidad_pot_radiada.htm)).

En un enlace Interior, además de considerar el ensanchamiento del frente de onda, resulta necesario tener en cuenta que a raíz de que la potencia de transmisión de los dispositivos utilizados en una red inalámbrica personal es muy pequeña, todos los objetos dentro de la habitación, así como los pisos y paredes, generan pérdidas de trayectoria.

Lo anterior es un factor importante que debe ser tratado con cautela ya que en el caso de este proyecto se contempla que el sistema de filtrado inalámbrico quede en la parte externa de la casa, con lo que el enlace podría verse comprometido. Por lo tanto, será necesario analizar de forma teórica la viabilidad del enlace propuesto en este capítulo. Para lograr el objetivo de anticipar la viabilidad del enlace, se recurrirá a un modelo de propagación para ambientes interiores.

En el caso de los sistemas radioeléctricos de interiores, la predicción de la propagación difiere en cierta medida de la que se efectúa en relación con los sistemas de exteriores. En interiores, la cobertura depende notablemente de la geometría de los edificios, cuyos límites (paredes o pisos) afectan además a la propagación (UIT-R 1238, 1997).

#### 4.6 Modelo de pérdida de trayectoria UIT-R 1238

En el modelo descrito en este punto se considera la pérdida a través de varios pisos a fin de tener presentes características tales como la reutilización de frecuencias entre distintos pisos. Los coeficientes de pérdida de potencia debida a la distancia que se indican en la tabla 4.5 tienen en cuenta implícitamente la transmisión a través de paredes, así como a través de obstáculos y por encima de estos, así como otros factores de pérdidas que pueden manifestarse en un solo piso de un edificio (UIT-R 1238, 1997).

El modelo de pérdida de trayectoria es:

$$L_{total} = 20 \log f + N \log d + L_f(n) - 28 \text{ dB} \quad \text{Ec ... (4.3)}$$

Donde:

$N$ : Coeficiente de pérdida de potencia debida a la distancia

$f$ : Frecuencia (MHz)

$d$ : Distancia de separación (m) entre la estación de base y la portátil

$L_f$ : Factor de pérdida de penetración en el suelo (dB)

$n$ : Número de pisos entre la estación de base y la portátil

En las siguientes tablas se indican los parámetros típicos basados en el resultado de algunas medidas que se han realizado.

Frecuencia	Edificio residencial	Edificio de oficinas	Edificio comercial
900 MHz	-	33	20
1.2 – 1.3 GHz	-	32	22
1.8 – 2.0 GHz	28	30	22
4 GHz	-	28	22
60 GHz <sup>2</sup>	-	22	17

Tabla 4.5. Coeficiente de pérdida de potencia  $N$  (UIT-R 1238, 1997).

Frecuencia	Edificio residencial	Edificio de oficinas	Edificio comercial
900 MHz	-	9(1 piso) 19(2 pisos) 24(3 pisos)	-
1.8 – 2.0 GHz	$4n$	$15+4(n-1)$	$6+3(n-1)$

Tabla 4.6. Factores de pérdida de penetración en el subsuelo,  $L_f$  (dB), siendo  $n$  el número de pisos penetrados (UIT-R 1238, 1997).

Frecuencia	Edificio residencial	Edificio de oficinas	Edificio comercial
1.8 – 2.0 GHz	8	10	10

Tabla 4.7. Estadísticas de desvanecimiento debido a sombras, desviación típica (dB) (UIT-R 1238, 1997).

En las diferentes bandas de frecuencia en que no se disponga de un coeficiente de pérdida de potencia aplicable a los edificios residenciales, puede utilizarse el correspondiente a los edificios de oficinas (UIT-R 1238, 1997).

Con la información anterior y sabiendo que el modem que se va a utilizar opera en el rango de los 2.4 GHz y que para el análisis práctico se considerara una pared entre el modem y el filtro inalámbrico y una distancia de 15m, entonces es posible calcular las pérdidas por trayectoria.

$$L_{total} = 20 \log(2.4 * 10^3) + (28) \log(15) + (4)(1) - 28 \text{ dB} = 76.53 \text{ dB} \quad \text{Ec ... (4.4)}$$

Para este caso en particular, el enlace se realizará utilizando el modem RB951Ui-2HnD, el cual tiene las siguientes características especificadas por el fabricante:

<b>Ganancia de la antena</b>	<b>2.5 dBi</b>
<b>Wireless 2.4 GHz estándar</b>	802.11 b/g/n
<b>Velocidad de transmisión</b>	54 Mb/s
<b>Potencia Tx</b>	25 dBm
<b>Sensibilidad del receptor</b>	-80 dBm

Tabla 4.8. Características técnicas del modem (Obtenido de <https://mikrotik.com/product/RB951Ui-2HnD>).

<sup>2</sup> Para llegar a la frecuencia de 60 GHz se parte de la hipótesis de la propagación dentro de una sola sala o espacio y no se tiene en cuenta en modo alguno la transmisión a través de las paredes. La absorción gaseosa en torno a los 60 GHz es significativa para distancias superiores a unos 100 m, lo que puede afectar a las distancias de reutilización de frecuencias (Recomendación UIT-R P. 676).

En la tabla 4.4 de las especificaciones técnicas del módulo ESP8266, podemos observar que la sensibilidad del módulo WiFi, es igual a -80 dBm. Esto quiere decir que para que en el receptor se reciba información útil, es necesario que la potencia de la señal que arriba al receptor, esté por encima del umbral de sensibilidad especificado, de este modo será posible garantizar que el enlace inalámbrico es viable.

Para conocer la potencia en el receptor, es necesario realizar un cálculo tomando en cuenta todas las ganancias y atenuaciones o pérdidas que se involucren en el enlace entre el transmisor y el receptor. A este cálculo se le conoce como presupuesto de potencias o link Budget.

#### 4.7 Cálculo del presupuesto de potencias

Como se ha mencionado, el cálculo del presupuesto de potencias involucra varios factores como son:

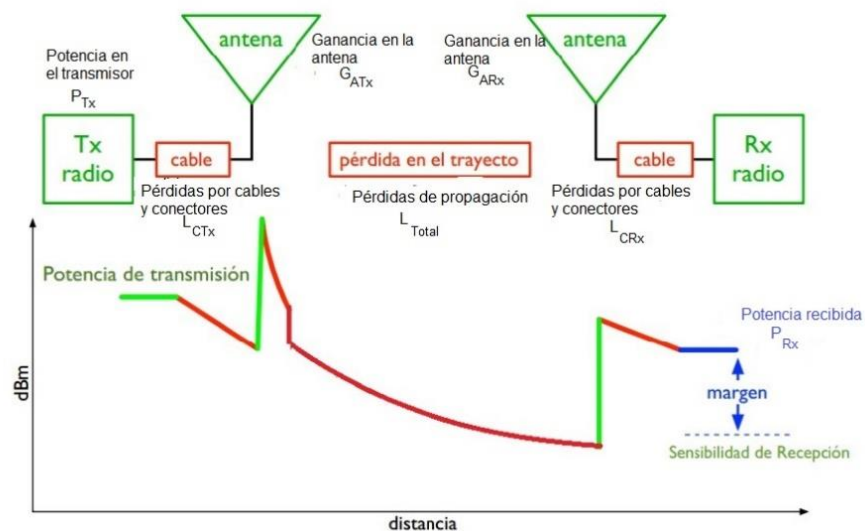


Fig. 4.17. Pérdidas en interiores con una pared entre Tx y Rx (Physics, 2011)

La figura 4.17 muestra el comportamiento de un enlace en interiores, considerando una pared de por medio entre el transmisor y el receptor, este escenario es precisamente el que se ha contemplado para este proyecto, ya que se piensa que solo exista una pared obstaculizando la comunicación entre el modem y el sistema de filtrado inalámbrico.

En la gráfica de la figura 4.17 podemos observar que la señal sale con cierta cantidad de potencia, después tiene una pequeña caída la cual proviene del cable y el conector entre la antena y el circuito eléctrico, enseguida se observa un aumento producto de la ganancia que aporta la antena transmisora, una vez en el medio la señal se ve atenuada conforme avanza, en esta etapa las pérdidas son ocasionadas por los obstáculos que la señal encuentra a su paso, la abrupta caída

que la señal presenta en la gráfica la comprendemos como el momento en el que la señal se encuentra con la pared o la loza, cuando la señal llega a la antena receptora, tenemos una ganancia en potencia, en seguida una pérdida nuevamente ocasionada por cables y conectores.

Otra forma de escribir el análisis anterior es a través de la siguiente ecuación:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{ATx} - L_{CTx} - L_{Total} - \sigma + G_{ARx} - L_{TRx} \quad \text{Ec ... (4.5)}$$

Con:

$P_{Rx}$  : Potencia recibida

$P_{Tx}$  : Potencia del transmisor

$G_{ATx}$  : Ganancia en la antena transmisora

$L_{CTx}$  : Pérdidas por cables y conectores en el transmisor

$L_{Total}$  : Pérdidas de propagación

$\sigma$  : Margen por obscurecimientos

$G_{ARx}$  : Ganancia en la antena receptora

$L_{TRx}$  : Pérdidas por cables y conectores en el receptor

Ahora que se conocen los elementos a considerar dentro del presupuesto de potencias, es posible realizar los cálculos para conocer el valor de la potencia que se recibirá en el modem, recordemos que para garantizar el enlace es necesario que la potencia recibida sea mayor a la sensibilidad en el receptor por un margen de al menos 10 dB, aunque para un enlace crítico se recomiendan 20 dB (Physics, 2011).

En este caso se considerará un margen de obscurecimientos que es el proporcionado por el modelo que se ha seleccionado para calcular las pérdidas en el trayecto, también se tomará en cuenta el valor de 2.25 dB recomendado para pérdidas en cables y conectores en IEEE 802.11, este valor solo es válido para conectores y cables de alta calidad.

A continuación, se utilizará el software MatLab para poder analizar de forma gráfica el comportamiento de la señal al propagarse en un espacio interior.

La figura 4.18 muestra la gráfica que se obtiene al variar la distancia de 0 a 25 m. Se debe considerar que las pérdidas por trayectorias dependen de la distancia, de forma directamente proporcional, por lo que, al aumentar la distancia, también aumenta el valor de las pérdidas.

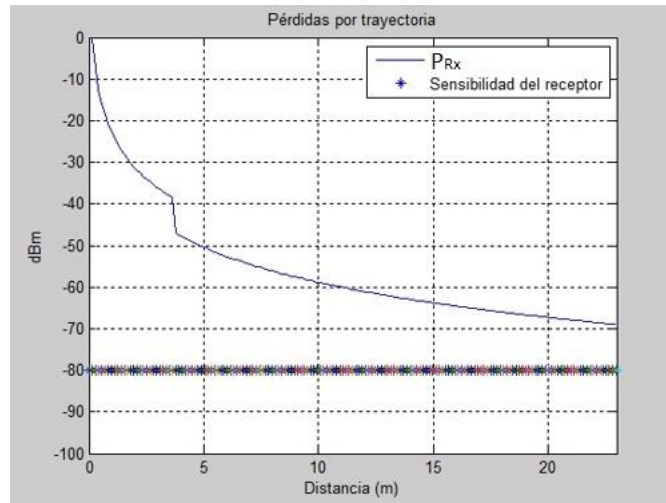


Fig. 4.18. Potencia en el receptor

En la figura 4.18 se observa como la señal decae de forma abrupta al encontrarse con la pared, comportamiento descrito en el modelo para interiores que se explicó con anterioridad, la línea continua que se observa a -80 dBm ejemplifica el límite de sensibilidad permitido. Teniendo en cuenta los resultados teóricos se procederá a realizar un estudio práctico que permita confirmar que en la implementación tendremos un comportamiento que se apege a los resultados obtenidos en el análisis teórico. Para conseguir el fin propuesto en el párrafo anterior se utilizará una aplicación diseñada para sistemas Android (*WiFi Analyzer*), que nos permitirá medir la intensidad de la señal a través de un teléfono celular durante el periodo de toma de muestras.

Un criterio recomendable para llevar a cabo la obtención de muestras es tomar entre 36 y 50 muestras en un intervalo de 20 a 40 longitudes de onda (Lee, 1995).

Se sabe que:

$$\lambda = \frac{c}{f} \Rightarrow \lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2.4 \cdot 10^9 \text{ 1/s}} = 0.125 \text{ m} \quad \text{Ec ... (4.5)}$$

Si se consideran 40 longitudes de onda, entonces:

$$40(0.125 \text{ m}) = 5 \text{ m}$$

Entonces para conocer el número de muestras que se deben tomar se realiza el siguiente cálculo:

$$\frac{5 \text{ m}}{36} \approx 0.14 \text{ m o bien } 14 \text{ cm}$$

El resultado anterior sugiere que se debe tomar una muestra cada 14 cm, por lo que, para una distancia de 10 m, se habrán de tomar entre 72 muestras y así sucesivamente.

A continuación, se muestran algunos de los valores en dBm obtenidos cada 5 mediciones en el estudio práctico.

Distancia (cm)	$P_{Rx}$	Distancia (cm)	$P_{Rx}$	Distancia (cm)	$P_{Rx}$	Distancia (cm)	$P_{Rx}$	Distancia (cm)	$P_{Rx}$
100	-28	450	-48	800	-55	1150	-63	1500	-63
170	-29	520	-45	870	-60	1220	-63	1570	-66
240	-30	590	-48	940	-60	1290	-64	1640	-67
310	-35	660	-50	1010	-61	1360	-65	1710	-68
380	-47	730	-53	1080	-60	1430	-66	1780	-70

Tabla 4.9. Valores empíricos de potencia en el receptor

Como se aprecia en la tabla 4.9 las muestras tienen un comportamiento decreciente, lo cual indica que las pérdidas aumentan conforme aumenta la distancia, sin embargo, se observa también que en ocasiones los valores se mantienen e incluso aumentan, esto es normal ya que en los desvanecimientos por trayectorias se involucran los mecanismos de propagación, los cuales pueden generar que en un punto una suma destructiva atenúe la señal y en otro la suma sea constructiva. Ahora se montarán las dos gráficas en una misma imagen con la finalidad de poder apreciar su similitud.

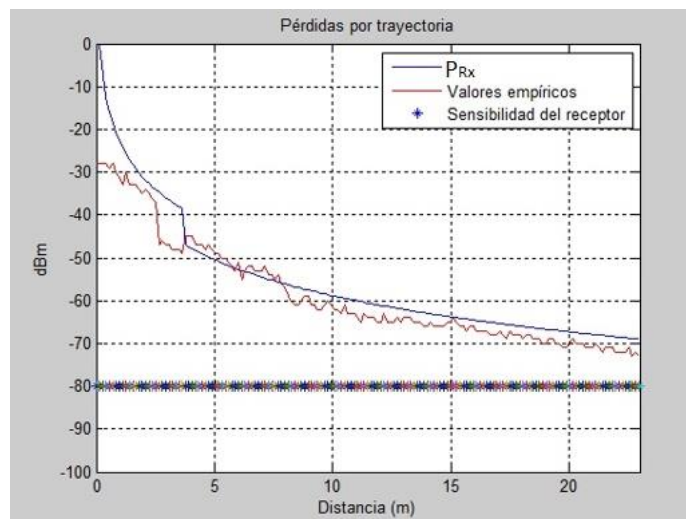


Fig. 4.19. Comparación entre modelo teórico y empírico.

En la figura 4.19 se ha podido constatar que en la práctica el comportamiento de la señal es el que se anticipó mediante el modelo teórico, por lo que se comprueba la eficiencia del enlace, también es posible observar que teóricamente el enlace podría mantenerse en un radio de más de 20 metros. Sin embargo, la recomendación es que la potencia recibida esté por encima del umbral de la sensibilidad del receptor cuando menos por 10 dBm, de este modo gráficamente se observa que el alcance máximo del enlace estaría en el rango de los 15 a los 20 m.

También se debe considerar que el escenario en el que se han realizado las mediciones es una bodega vacía, lo cual mejora las condiciones de propagación de

la señal, pues en una habitación común, existirán muebles, los cuales generarán pérdidas en mayor o menor medida, dependiendo en su mayoría del material con el que estén constituidos.

Después de realizado el análisis teórico, resulta conveniente hacer una prueba de conectividad entre el modem y el módulo ESP 8266, con lo cual se demostrará de forma práctica las conclusiones del análisis teórico. Por otro lado, esta última prueba también proporcionará la información necesaria para concluir la factibilidad del control inalámbrico que con tanto ahínco se ha propuesto en este proyecto.

En primer lugar, se utilizará un equipo de cómputo capaz de conectarse a través de WiFi a una red local de forma inalámbrica, con la finalidad de conocer las redes de las que se dispone en este lugar.



Fig. 4.20. Redes disponibles

En la figura 4.20 se observa que en esta ubicación existen 3 puntos de acceso disponibles, aquí es pertinente detenerse un poco para resaltar el hecho de que según lo que se estudió en el capítulo 3, lo que ha ocurrido es que el equipo del cual nos estamos auxiliando ha enviado una serie de tramas baliza y son precisamente estos 3 puntos de acceso los que han contestado a dicha solicitud. Se ha enmarcado de color amarillo la red que corresponde al modem que se está analizando y que se ha denominado con el nombre de “EL CALVARIO” y a su vez es en la que el equipo de cómputo se encuentra conectado, esta información será de gran utilidad a la hora de conectar el módulo ESP 8266.

A continuación, se utilizará el sistema mínimo Arduino para conectar el módulo ESP 8266 a la red local y a través del monitor serial se visualizarán las etapas involucradas en este proceso. Arduino uno, tiene dos puertos destinados a la transmisión y recepción de información al interactuar con hardware como es el caso del módulo WiFi que se está utilizando, sin embargo, es posible utilizar cualquiera de los pines digitales de los que se dispone, únicamente se necesita generar un

pequeño programa en el cual se le indique a Arduino qué pines se destinarán a la transmisión y recepción de información, dicho programa podrá consultarse en el Anexo A.

Ahora, se realizará la primera prueba para saber si ha sido posible establecer la conexión entre Arduino y el módulo ESP 8266.

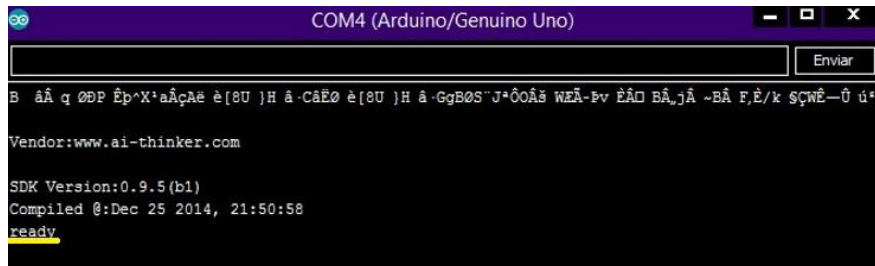


Fig. 4.21. Conexión entre Arduino y módulo ESP 8266

En la figura 4.21 se observa que al correr el programa cargado en Arduino y al alimentar al módulo WiFi, se despliega en el monitor serial una cadena de caracteres que finalizan con la palabra “ready”, que es la forma en como el módulo contesta indicando que está listo para recibir o transmitir información.

Ahora se ha solicitado a través del monitor serial al módulo ESP 8266 que muestre las redes disponibles a su alcance. En la imagen 4.22 se observa entre otras la red “EL CALVARIO”; recordemos que cuando se hizo esta misma prueba con la computadora se mencionó que este fue el nombre que se le dio al modem que se está utilizando en este proyecto.

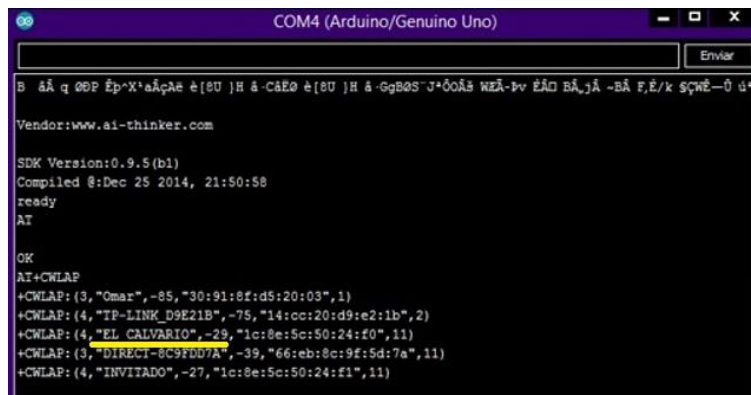


Fig. 4.22. Redes Disponibles.

Se debe tener en cuenta que en esta ocasión es el módulo ESP 8266 el que está enviando la trama baliza para poder conocer los puntos de acceso que se encuentran en su perímetro.

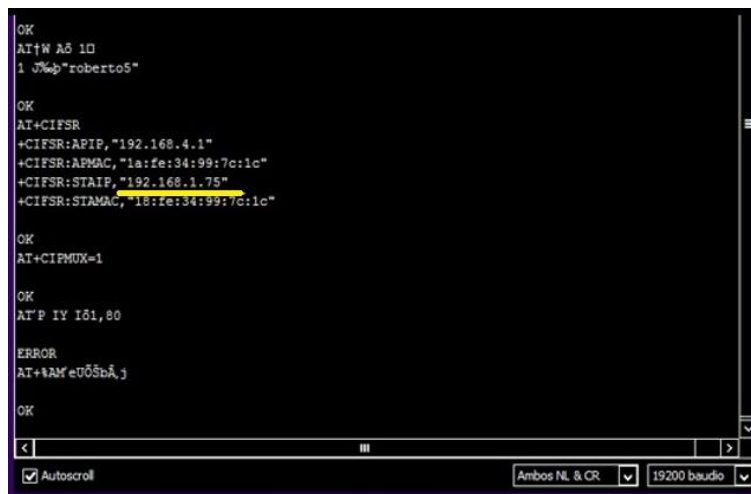
El siguiente paso ha sido introducir el nombre de la red y su contraseña para que el módulo ESP 8266 pueda conectarse a la red deseada, en la imagen 4.23 se observa una respuesta afirmativa (OK), lo que indica que ya se cuenta con conexión.



```
COM4 (Arduino/Genuino Uno)
Enviar
B ÅÄ q QDP Êp·X'aÅçAe ê[8U ]H á·C&E0 ê[8U ]H á·GqB0S·J*Ô0Å3 WZÄ·Pv ÊÄ0 BÄ,jÄ -BÄ F,É/k sçwÉ-Û ü+!
Vendor:www.ai-thinker.com
SDK Version:0.9.5 (b1)
Compiled @:Dec 25 2014, 21:50:58
ready
AT
OK
AT+CWLAP
+CWLAP:(3, "Omar", -85, "30:91:8f:d5:20:03", 1)
+CWLAP:(4, "TP-LINK_D9E21B", -75, "14:cc:20:d9:e2:1b", 2)
+CWLAP:(4, "EL CALVARIO", -29, "1c:8e:5c:50:24:f0", 11)
+CWLAP:(3, "DIRECT-8C9FDD7A", -39, "66:eb:8c:9f:5d:7a", 11)
+CWLAP:(4, "INVITADO", -27, "1c:8e:5c:50:24:f1", 11)
OK
AT+WM A5 ID
1 %p
OK
```

Fig. 4.23. Módulo ESP 8266 conectado a la red.

Ahora vamos a declarar al módulo ESP8266 como un servidor, al realizar esta acción, se podrá utilizar la dirección IP que se le ha asignado al módulo, para comunicarse con él, simplemente introduciendo dicha dirección en cualquier navegador de internet, en la figura 4.24, se puede observar la dirección IP asignada al módulo Wifi.



```
OK
AT+WM A5 ID
1 %p"roberto5"
OK
AT+CIFSR
+CIFSR:APIP, "192.168.4.1"
+CIFSR:APMAC, "1a:fe:34:99:7c:1c"
+CIFSR:STAIP, "192.168.1.75"
+CIFSR:STAMAC, "18:fe:34:99:7c:1c"
OK
AT+CIPMUX=1
OK
AT+P IY I01,80
ERROR
AT+IAM'eU05pÄ,j
OK
```

Fig. 4.24. Módulo ESP 8266 como servidor.

Por último, se utilizará la dirección IP 192.168.1.75, para realizar una prueba, con la cual será posible cerciorarse que se tiene una conexión fiable, la cual permite mantener al sistema mínimo Arduino conectado a la red, a través del módulo ESP 8266. Esta prueba consistirá simplemente en enviar información desde una computadora conectada a internet, hacia el sistema mínimo Arduino. Se usará el monitor serial, para leer el mensaje enviado.

En la figura 4.25 se muestra la dirección IP del módulo Wifi, seguida de una diagonal y el mensaje "Hola control inalámbrico", únicamente con la variante de que se han rellenado los espacios con el caracter "\_".

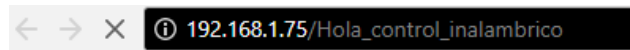


Fig. 4.25. Mensaje enviado desde el navegador



Fig. 4.26. Comunicación con el módulo ESP 8266 a través de Internet

Finalmente, en la figura 4.26, se muestra lo que se ha recibido en el monitor serial. La primera línea resaltada indica que el módulo se encuentra conectado a la red local, en la segunda línea subrayada se observa precisamente el mensaje que se envió desde el navegador y que el módulo ESP 8266 recibió a través de una conexión inalámbrica, la tercera línea muestra la dirección IP que se le asignó al módulo WiFi, por último, se observa una línea que indica que la conexión es del tipo “Keep-alive”, lo cual significa que la conexión debe mantenerse activa de forma permanente.

Después de realizar la práctica anterior se ha probado la factibilidad de controlar el sistema de filtrado de forma inalámbrica, ya que se ha logrado con éxito la transmisión y recepción de información desde un host como podría ser un celular, una Tablet, una PC, etc., hacia el sistema mínimo Arduino, haciendo uso del módulo ESP 8266.

También se ha conseguido la conexión entre el módulo ESP 8266 y el modem RB951Ui-2HnD utilizando la tecnología WiFi, confirmando la viabilidad del enlace y permitiendo con ello tener acceso a la red local.

Después de lo anterior, se ha decidido retomar la idea del prototipo con el cual este proyecto culminaría. Ahora se tienen los insumos necesarios para armar el prototipo, así como también se cuenta con una forma de comunicación vía remota a través de la cual el usuario puede controlar el encendido y apagado del sistema de filtrado utilizando un dispositivo como puede ser un celular, tablet o computadora.

En la figura 4.27 se ilustra un diagrama a bloques, el cual describe las etapas involucradas en el proceso de control inalámbrico desde un dispositivo conectado a Internet, hacia el prototipo de filtrado controlado vía remota, el procedimiento será el siguiente.

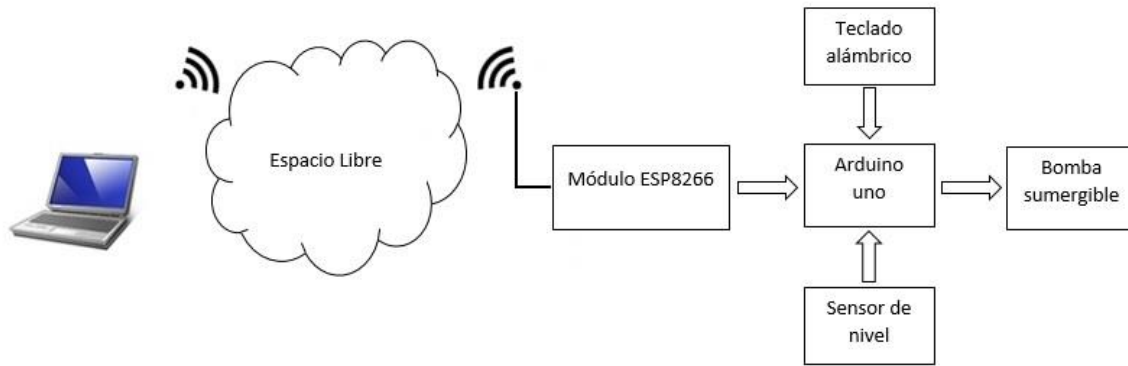


Fig. 4.27. Diagrama a bloques del sistema de control.

Al encender el sistema de filtrado, la fuente de alimentación abastecerá al módulo Wifi y al sistema mínimo Arduino, en seguida ambos dispositivos comenzarán a correr los programas que han sido almacenados en sus memorias previamente. En el programa del módulo Wifi, la primera instrucción le indica a cuál red debe intentar conectarse, para conseguir este propósito, se llevarán a cabo los protocolos descritos en el capítulo 3, por su parte Arduino se queda en espera de una instrucción proveniente del teclado manual o del control inalámbrico.

Al recibir una instrucción, Arduino lee el valor del pin correspondiente al sensor de nivel y dependiendo de este, ejecuta o no la acción. Recordemos que la única instrucción habilitada en el prototipo, es la de filtrar o parar, por lo que Arduino se limita a encender o apagar la bomba del tanque secundario. Aquí es en donde la denominada etapa de potencia, cumple su función, ya que a través del MOC y del TRIAC, brinda seguridad al microcontrolador evitando regresos de corriente, al mismo tiempo que alimenta a la bomba con 120 volts en corriente alterna.

En la figura 4.28 se observa el prototipo armado, además se encuentran señalados los elementos que lo compone, a excepción del microcontrolador y el módulo ESP8266, que se encuentran en su interior.

Cabe señalar que en el prototipo, no se ha instalado un filtro verdadero, sino que a manera de ejemplo se ha colocado un accesorio en la posición en la que se ubicaría el filtro real, también se observa, que el control manual contiene 3 botones, esto es porque uno de los botones es un switch que controla el encendido del sistema de filtrado más no ejecuta ninguna instrucción, por el contrario, los otros dos botones sirven para iniciar la función de filtrar y la función de parar, negro y rojo respectivamente. También, como se mencionó con anterioridad, en el control manual se tienen 3 leds, que se encienden cuando se está ejecutando la instrucción correspondiente.

Los leds juegan un papel importante en la evaluación del prototipo, ya que a través de ellos podremos determinar, si se están ejecutando las instrucciones enviadas desde el control manual o el inalámbrico.

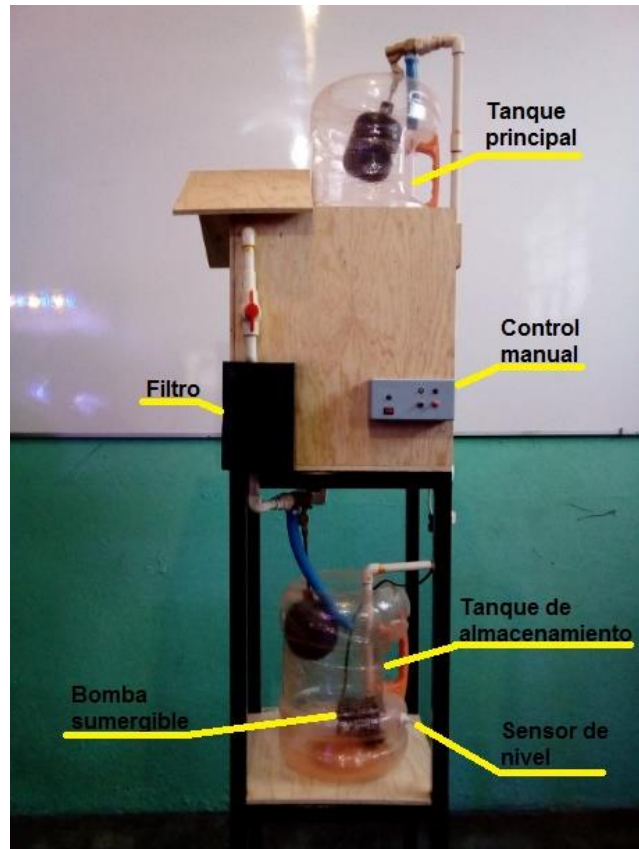


Fig. 4.28. Prototipo del sistema de filtrado controlado vía remota.

#### 4.8 Evaluación del prototipo

En primer lugar, en la figura 4.29 se observa que al cambiar el estado del switch ha cerrado, el led verde enciende indicando que el sistema de filtrado también esta encendido.



Fig. 4.29 Sistema de filtrado encendido.

Ahora en la figura 4.30 (a) vemos que cuando se presiona el botón negro, el cual es el encargado de activar la función de filtrar, el led blanco encenderá y el sistema de filtrado comenzará a circular el agua a través del filtro, dicha acción no se suspenderá a menos que se presione el botón rojo o botón de paro y entonces el led rojo encenderá por unos segundos tal como se muestra en la figura 4.30 (b).



Fig. 4.30 (a)

4.30(b)

Finalmente se verificará el funcionamiento del control inalámbrico, para lo cual es necesario revisar que el módulo ESP8266 está conectado a la red llamada “EL CALVARIO”. En la figura 4.31 se observa en el monitor serial el mensaje con el cual se confirma la conexión.

```
Connecting to EL CALVARIO
.....
WiFi connected
Server started
Use this URL to connect: http://192.168.1.70/
```

Fig. 4.31 Modulo ESP8266 conectado a la red como servidor.

En la figura 4.31 también podemos ver la dirección IP que se le ha asignado al módulo Wifi, por lo tanto, se introducirá dicha dirección en el navegador de internet, para tener acceso al módulo ESP8266 en su modalidad de servidor y así poder controlar el sistema de filtrado usando los botones que se crearon para activar la función de filtrar y la de parar.

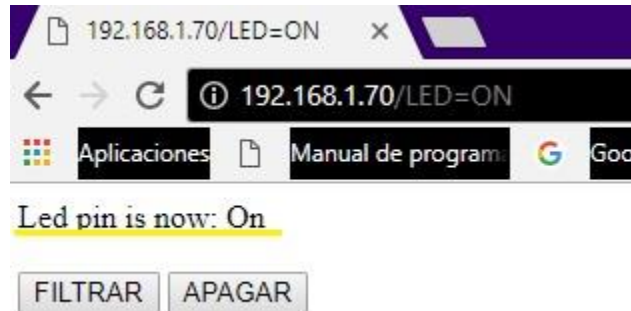


Fig. 4.32(a)

```
WiFi connected
Server started
Use this URL to connect: http://192.168.1.70/
new client
GET /LED=ON HTTP/1.1
Client disconnected
```

Fig. 4.32(b)

En la figura 4.32(a), se observa que al introducir la dirección IP en el navegador, seguida de la palabra “LED=ON”, se accede a través de la red al módulo Wifi y se le asigna el estado de uno lógico al pin que se programó como salida en el módulo ESP8266 y que se encuentra conectado a uno de los pines de entrada en Arduino, esta acción inicia la función de filtrar. En la figura 4.32(a) se visualiza resaltado con una línea amarilla el estado del pin digital del que se ha hecho mención en las líneas anteriores.

Una forma de comprobar que las instrucciones que se envían desde el control inalámbrico hasta el modulo Wifi, se reciben correctamente, es visualizar en el monitor serial lo que se está recibiendo en el pin Rx del módulo ESP8266, en la figura 4.32(b) se observa en la quinta línea el mensaje proveniente del control inalámbrico, el cual le indica al módulo que debe enviar un voltaje de 3.3v.

A continuación, se enviará desde el control inalámbrico la instrucción de parar el filtrado, por lo que en la figura 4.33(a) se visualizara que el estado del pin cambia a “Low” o bien cero lógico y respectivamente la figura 4.33(b), deberá mostrar una línea en el monitor serial que contenga esta indicación. Cabe mencionar que para esta nueva instrucción ya no es necesario introducir la dirección IP en el navegador, indicando el nuevo estado del pin al que llamamos led, bastará con presionar el botón “APAGAR” e igualmente para encender el filtro solo será necesario presionar el botón de “FILTRAR”.

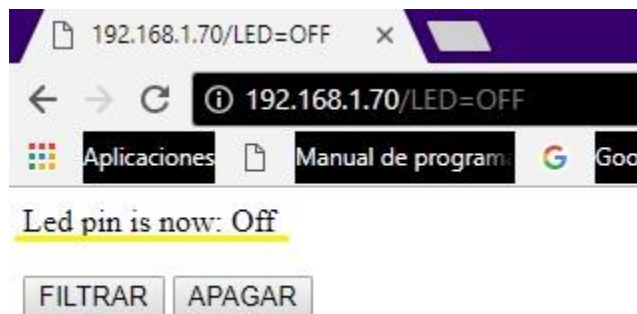


Fig. 4.33(a)



Fig. 4.33 (b)

Con estas pruebas se ha verificado, el correcto funcionamiento del prototipo, al ejecutar de forma precisa cada instrucción proveniente tanto del control manual como del inalámbrico.

## 4.9 Presupuesto

Por último, se presenta el listado general de elementos que han de conformar al sistema de filtrado, toda vez que se desee implementarlo en una vivienda, para ello se hará uso de la información recabada a lo largo de este capítulo, también se presentará la relación de costos y el total requerido para adquirir dichos elementos.

- **Presupuesto**

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Total
Bomba de agua	1	\$475	\$475
Tinaco Fortoplas	1	\$750	\$750
Arduino	1	\$200	\$200
Módulo ESP 8266	1	\$100	\$100
Filtro de agua	1	\$1530	\$1530
Electroválvulas	4	\$190	\$760
Sensores	2	\$43	\$86
Tira de tubo de ½"	3	\$30	\$90
Tira de tubo de 1"	1	\$40	\$40
Cople unión	1	\$4	\$4
Tee	3	\$4	\$12
Codo 90°	10	\$4	\$40
Válvula de paso	1	\$25	\$25
Cemento para PVC 473ml	1	\$53	\$53
Limpiador para PVC 118ml	1	\$50	\$50
Adaptador macho	1	\$3	\$3
Reducción	1	\$6	\$6
Botones y compo- nentes electrónicos		\$250	\$250
Cable y otros gastos	1	\$876	\$876
Mano de obra	1	\$2500	\$2500
			Total: \$7850

Tabla 4.10. Elementos necesarios para la construcción del sistema de filtrado inalámbrico

El presupuesto que se muestra en la tabla 4.10 contiene lo necesario para implementar el sistema de filtrado de este proyecto en una casa de 2 pisos, con una altura aproximada de 6m, sin embargo, se sabe que esta no es una medida estándar, por tal motivo este presupuesto está sujeto a cambios que dependen principalmente del entorno en el que se pretenda implementar el equipo, sin embargo, se contempla que los cambios sean mínimos.

Aun así, el presupuesto es alentador ya que se encuentra por debajo del que presenta Isla Urbana en su paquete más económico, teniendo en cuenta también que este proyecto aporta mayores beneficios y es escalable a cualquier entorno.

Se observa un campo al final del presupuesto que se refiere al concepto de cable y otros gastos, esto es debido a que no se tiene un estimado de cuanto cable, ni de cuál es el más adecuado para esta aplicación y también se contempla que pueda existir dependiendo del entorno algún gasto extra.



## Conclusiones

Con el constante incremento de la población a nivel mundial, es evidente que la demanda de los recursos naturales seguirá en aumento y, aunque es necesario tomar medidas para controlar el consumo y la correcta utilización de los recursos, sabemos que particularmente en cuestión de agua potable esto resulta muy difícil ya que es un recurso que irónicamente es poco valorado por el ser humano y con gran frecuencia mal utilizado e incluso desperdiciado.

Sin embargo, en este proyecto se ha presentado la captación de agua de lluvia como una opción, que puede ayudar a minimizar el impacto producido por la sobre explotación del agua en la Ciudad de México. Ya se han demostrado los grandes beneficios que la captación de agua potable ha aportado en otros lugares, en los cuales se han implementado mecanismos de captación de agua de lluvia, ejemplos de ello los podemos encontrar por todo el mundo y siempre con testimonios favorables.

El capítulo primero, nos ha brindado un gran escenario en el cual la captación de agua de lluvia es el actor principal, brindando una importante reserva de agua limpia, que, aunque no es correcto considerarla potable, puede ser empleada en un gran número de actividades en el hogar y la industria.

De esta forma surge la necesidad de distinguir, cuándo el agua es apta para el consumo humano y cuándo no. Sin embargo, esta diferenciación no es cosa sencilla, se involucran en ella una serie de factores. En el capítulo segundo, se investigaron todos los agentes patógenos que se relacionan de alguna forma con el agua y que merman la calidad de nuestra salud, e incluso aquellos tan peligrosos que cada año cobran la vida de miles de personas a nivel mundial.

También en este capítulo se recabó la información necesaria para la selección o el diseño de un filtro que permita obtener los estándares de calidad que la OMS sugiere para el agua destinada al consumo humano.

Sin embargo, existe mucha gente u organizaciones atacando el problema de la escasez de agua en la Ciudad de México, con interesantes propuestas que sin duda resultan valiosas. No obstante, este proyecto se muestra superior ya que proporciona el plus de involucrar los avances tecnológicos en materia de comunicación inalámbrica.

En el capítulo tercero y cuarto se analizaron los procesos involucrados en la comunicación inalámbrica a través de la tecnología WiFi, primero de forma teórica y después confirmando los resultados obtenidos a través de pruebas que culminaron en la construcción de un prototipo, que tuvo la finalidad de evaluar la factibilidad del intercambio de información a través de una red inalámbrica entre el sistema mínimo Arduino y un dispositivo móvil. La obtención de resultados favorables nos ha permitido asegurar la viabilidad de la construcción de un sistema

de filtrado controlado inalámbricamente, lo cual desde un principio fue el objetivo general de este proyecto.

Aunque el objetivo del prototipo que se ha diseñado, solo es evaluar la transferencia de información entre el sistema de filtrado controlado de forma inalámbrica y un dispositivo móvil (lo que hemos denominado como un control inalámbrico, pues permite enviar instrucciones a nuestro microcontrolador desde un celular por ejemplo), implícitamente también garantiza la viabilidad de la implementación del proyecto en una vivienda, puesto que la electrónica involucrada en el prototipo es la misma que se requiere para una aplicación en tamaño real, ya que el verdadero cambio lo encontramos en las tuberías, el tanque de almacenamiento y la potencia de la bomba.

Aunque el proyecto pretendía originalmente ofrecer un nivel de pureza en el agua tratada y que fuera óptimo para el consumo humano, no es posible asegurar que después de la etapa de filtrado, el agua captada podrá considerarse potable ya que durante la elaboración del proyecto hemos obviado los resultados que ofrecerá el filtro, ya que no es competencia de la Ing. en Sistemas Electrónicos y de Telecomunicaciones el análisis químico y biológico necesario para garantizar la potabilidad del agua captada.

Lo que si podemos garantizar es que la reserva de agua que este proyecto aporta permitirá satisfacer las necesidades de agua requeridas en el riego de plantas, aseo de las viviendas, descarga de agua en el WC, etc. Igualmente, podemos garantizar que la implementación en masa de este proyecto ayudará en gran medida a contrarrestar las consecuencias que la sobre explotación de los acuíferos genera, así como también se intuye que la masificación de este proyecto ayudará a minimizar el impacto producido por las inundaciones en las temporadas de lluvia.

## Anexo A

El sistema de filtrado que se propone en este proyecto puede llegar a ser muy complejo en términos de programación, ya que se ha sugerido que incluya varias funciones como lo es la de Filtrar, Drenar, Parar, etc. Por lo tanto, se utilizará un diagrama de flujo para ayudar a visualizar los bucles necesarios al momento de comenzar con la programación.

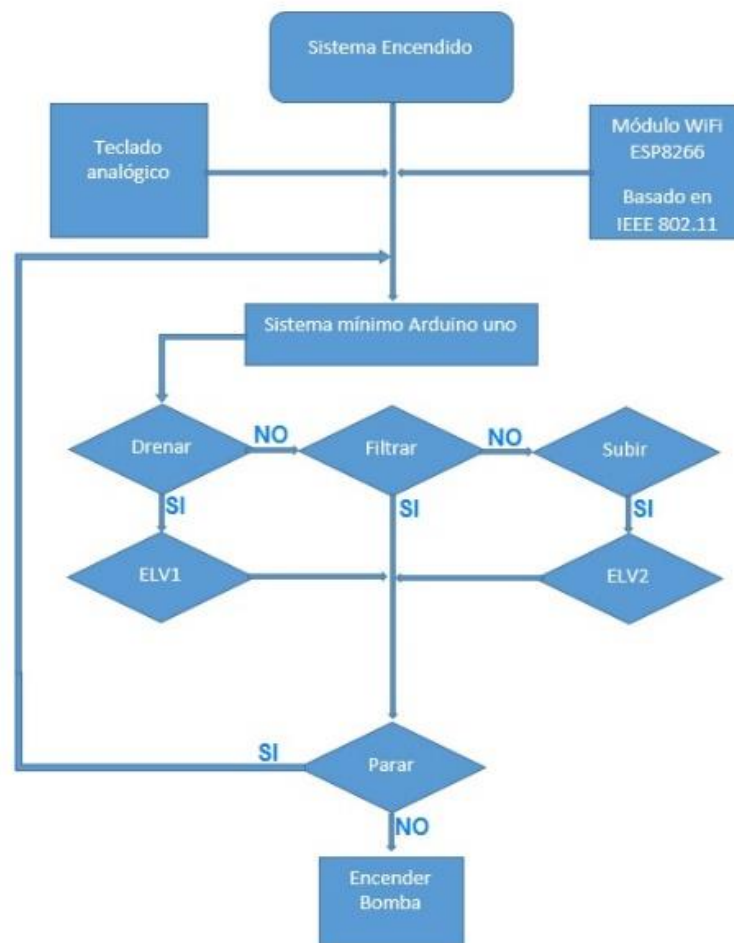


Fig. A.1. Diagrama de flujo del sistema de filtrado inalámbrico.

A continuación, se muestra parte del algoritmo de programación. En la figura A.2 se observa el void loop() que es la función dentro de la cual se programan las instrucciones en Arduino. En las primeras líneas se inicializan todas las variables dejándolas apagadas. Después se observan una serie de condicionales los cuales realizan las funciones descritas en el diagrama de flujo de la figura A.1. También se muestra la programación de la función drenar y en ella se aprecia el momento en el que se encienden y apagan los actuadores.

## Anexo A

```

void loop() {
  digitalWrite(arrancador,HIGH);
  digitalWrite(ledelev1,HIGH);
  digitalWrite(ledelev2,HIGH);
  digitalWrite(ledarran,HIGH);
  digitalWrite(off,HIGH);
  digitalWrite(elev1,HIGH);
  digitalWrite(elev2,HIGH);
  digitalWrite(on,LOW);

  tecla = teclado(); //Se pregunta por alguna instrucción
  if (x != 50){
    if (tecla == salir) // Si la instrucción es la de paro
      apagar();          // se apagan detiene las acciones

    if (tecla == drenar) // Si la instrucción es drenar
      drenartanque();    // se manda llamar la función drenar

    if (tecla == refill) // Si la instrucción es refiltrar
      refiltrar();      // se manda llamar la función refiltrar

    if (tecla == filtrar)// Si la instrucción es filtrar
      subiratanque();   // se manda llamar la función filtrar
  }
}

void drenartanque(){
  while (tecla < salir){ // Mientras no se presione la tecla de paro
    tecla = teclado();
    if (tecla < salir){
      digitalWrite(elev1,LOW); // Se enciende la electroválvula 1
      digitalWrite(ledelev1,LOW); // Se enciende un led indicando
      for (int i = 0; i <= x; i++){ // que se esta drenando el tanque
        tecla = teclado(); // se drena por un tiempo dando
        if (tecla == salir){ // oportunidad a que el agua llegue
          i = x; // al tanque secundario antes de
          // encender la bomba
        }
      }
      for (int i = 0; i <= 15; i++){
        tecla = teclado();
        if (tecla == salir){
          i = 15;
        }
        aux = digitalRead(senniv); // Se pregunta por el sensor de nivel
        delay(100); // que protege a la bomba
        if (aux == LOW){ // Si el nivel es el optimo
          digitalWrite(arrancador,LOW); // Se enciende la bomba
        }else{digitalWrite(arrancador,HIGH); // No es seguro por lo tanto
        // no se enciende la bomba
        }
      }
    }
    tecla = salir; // Se ha presionado el botón de paro
  }
}

```

Fig. A.2. Parte de la programación del sistema de control

Para verificar que el comportamiento del circuito del teclado sea el deseado, al utilizar los valores calculados en el divisor de tensión para  $R_1$ , se generará la simulación de dicho circuito en la herramienta Multisim.

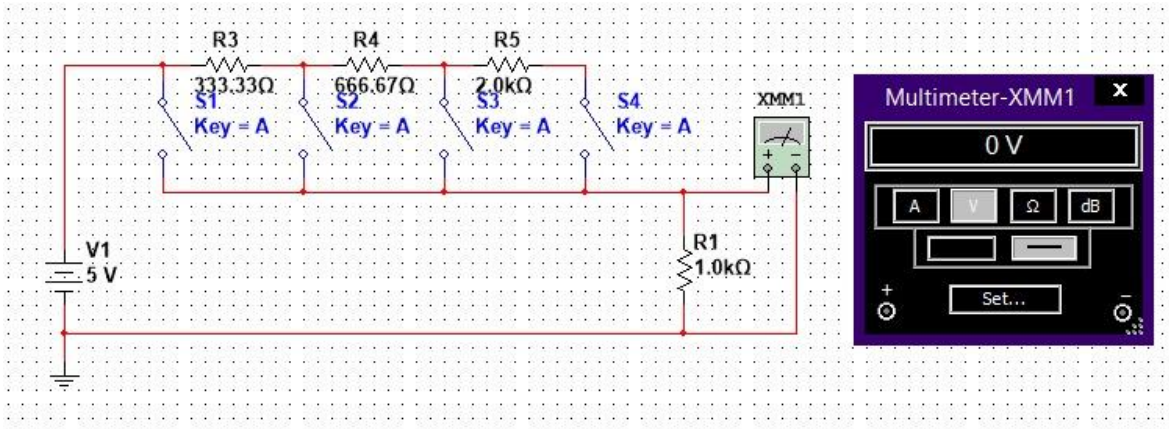


Fig. A.3. Teclado analógico sin presionar ningún botón, simulado en Multisim

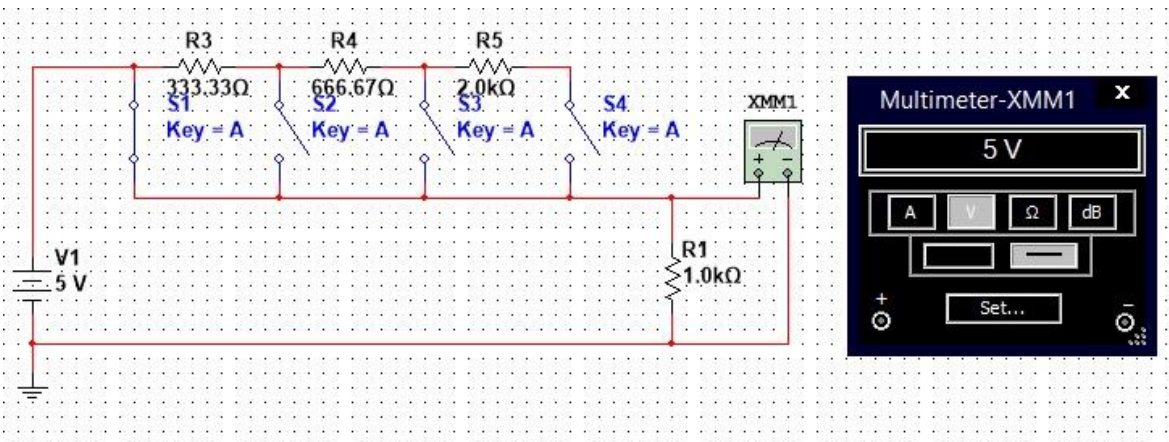


Fig. A.4. Teclado analógico botón 1 simulado en Multisim

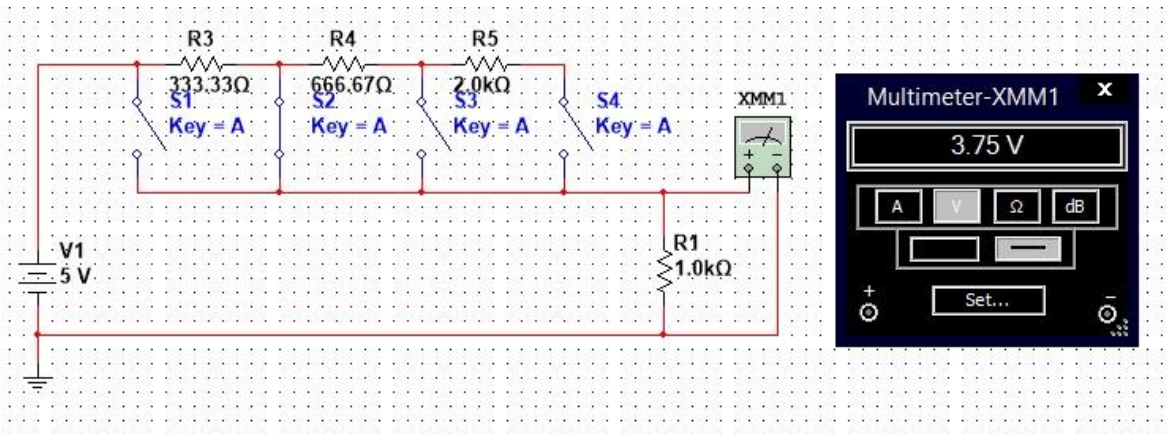


Fig. A.5. Teclado analógico botón 2 simulado en Multisim

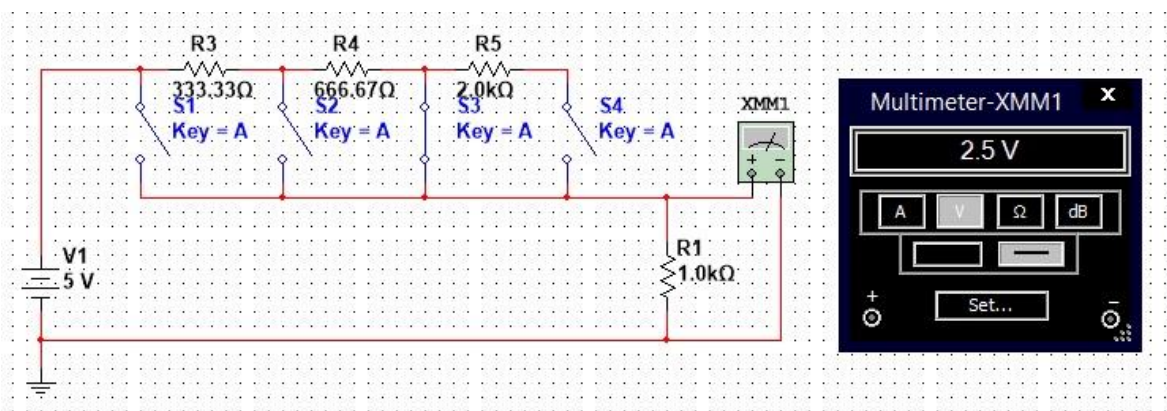


Fig. A.6. Teclado analógico botón 3 simulado en Multisim

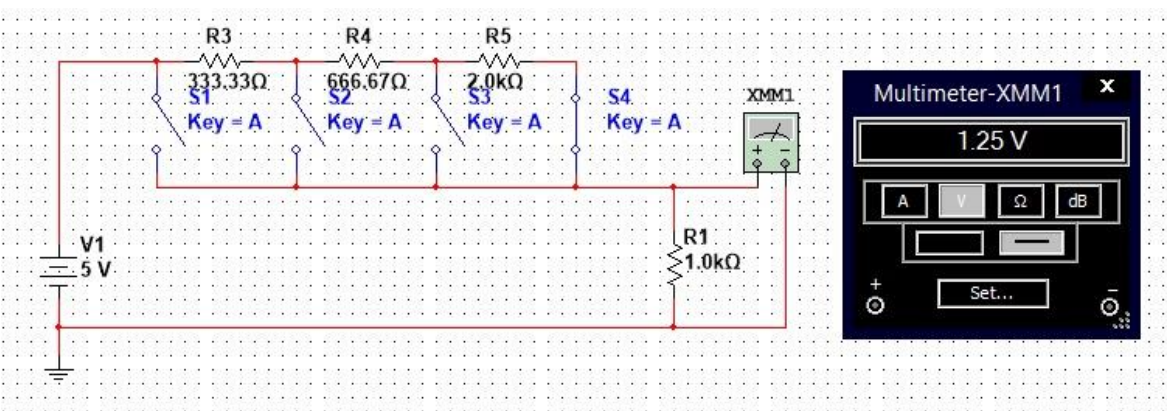


Fig. A.7. Teclado analógico botón 4 simulado en Multisim

Las figuras A.1-5, confirman que los valores para  $R_1$ , derivados de los cálculos en el divisor de tensión, son los correctos para poder obtener los voltajes de salida deseados en el teclado, ahora solo queda llevar a la práctica esta simulación para verificar que, en físico también se obtendrán los mismos resultados.

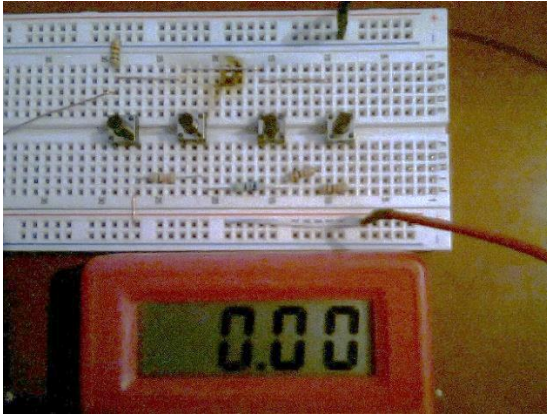


Fig. A.8. Teclado analógico

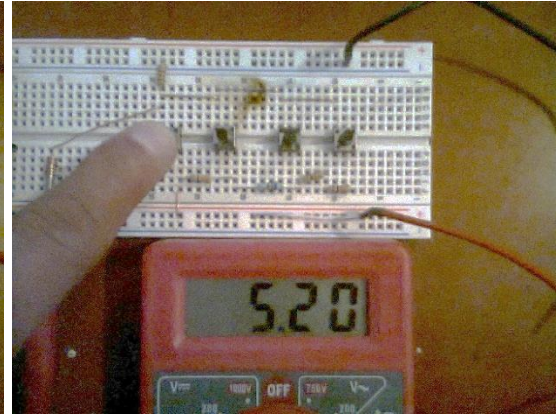


Fig. A.9. Teclado analógico botón 1

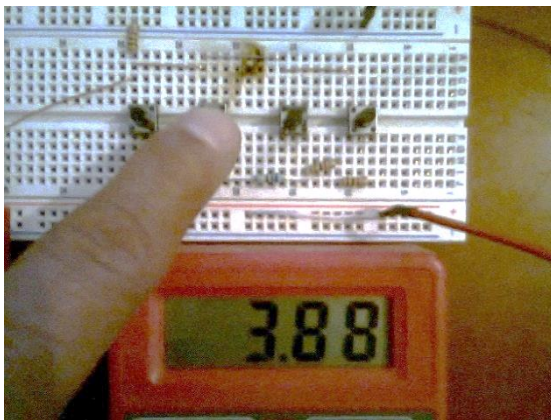


Fig. A.10. Teclado analógico botón 2

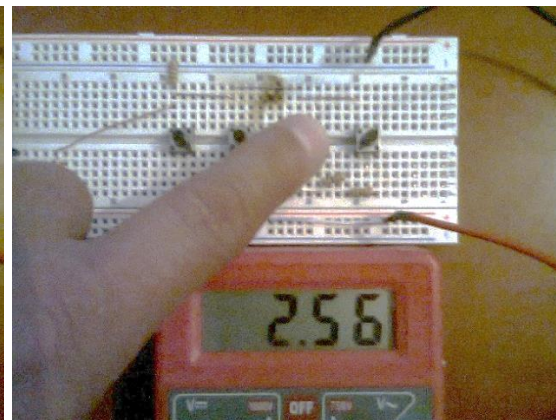


Fig. A.11. Teclado analógico botón 3

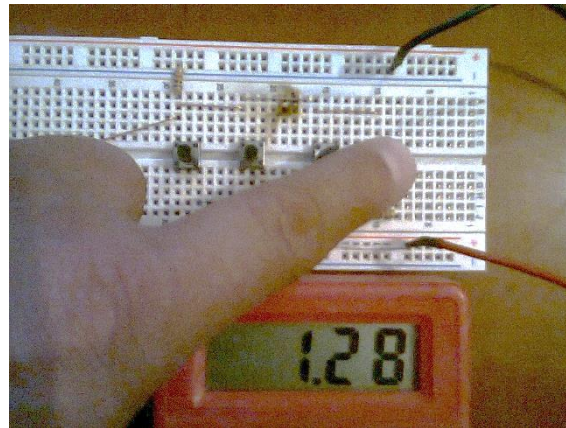


Fig. A.12. Teclado analógico botón 4

Las Figuras A.6–10, demuestran que el circuito implementado físicamente se comporta según lo esperado, variando muy poco con respecto de la simulación, esto debido a la fuente de alimentación que proporciona un voltaje ligeramente mayor a los 5V; tal como se puede apreciar en la figura A.7, además de que las resistencias de  $333.33\Omega$  y la de  $666.67\Omega$ , no existen en el mercado, por lo que se han utilizado los valores más próximos a estos, que son  $330\Omega$  y  $680\Omega$  respectivamente.

Ahora lo único que queda por confirmar es que los valores que Arduino uno asignará en su entrada analógica son los que se han anticipado, esto es importante pues se necesita conocer estos datos a la hora de programar el teclado. Por tal motivo se necesita comenzar a revisar la estructura e instrucciones básicas en la programación de Arduino uno. Existen muchos manuales que sirven bien a este propósito, así como también se pueden revisar los ejemplos que vienen en el mismo software de programación de Arduino uno, e incluso en el sitio web oficial de Arduino existen muchos ejemplos didácticos y foros de discusión en los que cualquier persona interesada en aprender a programar Arduino puede participar (<https://www.arduino.cc/>).

A continuación, en la figura A.11 se muestra un sencillo programa que permite leer en el monitor serial de Arduino uno, el valor que se genera en la entrada analógica definida como A<sub>0</sub>, al pulsar alguno de los botones del teclado.

```
int x = 0;
int a = 0;
int Drenar = 1;
int Filtrar = 2;
int Refiltrar = 3;
int salir = 4;
void setup(){
  Serial.begin(9600); // Se inicializa el monitor serial
} // a 9600 baudios
void loop(){
  a = analogRead(0); // Se lee el valor en A0
  if(a > 100){ // Si el valor en A0 es mayor que 100
    if(a >= 1000) // Si es >= que 1000 se pulso la
      x = Drenar; // opción Drenar
    if(a >= 700 & a < 1000) // Si está entre 700 y 1000 se
      x = Filtrar; // pulso Filtrar
    if(a >= 400 & a < 700) // Si está entre 400 y 700 se
      x = Refiltrar; // pulso Refiltrar
    if(a > 200 & a < 400) // Si está entre 200 y 400 se
      x = Salir; // Pulso el Paro del sistema
    delay(50); // Se hace una pausa de 50 milisegundos
    return x; // Se devuelve el valor almacenado en x
  }
  Serial.println(x); // Se Muestra x en el monitor serial
  delay (500);
}
```

Fig. A.13. Lectura del monitor serial

En el código presentado en la figura A.11, es en donde encuentran utilidad los valores que Arduino ha asignado para cada voltaje reportado en la entrada analógica A<sub>0</sub>, ya que han servido para fijar los límites de operación de cada botón.

A continuación, en la figura A.12, se muestran los valores de las lecturas en el pin A<sub>0</sub>, al presionar cada botón del teclado.



Fig. A.14. Lectura de los Botones 1, 2, 3 y 4 en el pin A<sub>0</sub> usando el monitor serial

La figura A.12, ayuda a confirmar que los resultados obtenidos coinciden satisfactoriamente con los cálculos realizados en el capítulo 4, aunque existen ligeras variaciones, la proximidad de los resultados teóricos y prácticos verifica 2 aspectos importantes en el diseño del teclado analógico. En primer lugar, ayuda a definir el rango sobre el cual se debe programar cada botón en Arduino, y en segundo lugar confirma que entre los botones existe una separación considerable, por lo que la posibilidad de que al presionar un botón se confunda con otro es mínima.

En la figura A.13 se muestra el algoritmo de programación, para que el sistema mínimo Arduino ejecute efectivamente las funciones implementadas en el prototipo

```
void filtrar() {
  if (arrancador == HIGH){ //Si la bomba está trabajando salir de esta rutina
    n = digitalRead(senniv); //Revisar el sensor de nivel
    while (n == 1) { //Mientras el sensor de nivel tenga valor de 1
      digitalWrite(arrancador, LOW); //Encender la bomba
      digitalWrite(ledarran, LOW); //Encender un led
      tecla = teclado; //Preguntar por el teclado
      y = digitalRead(inalámbrico); //Preguntar por el control inalámbrico
      if (tecla == 2 || y == 1) { //Si se recibe la instrucción de parar desde el teclado o
        n = 1; //desde el control inalámbrico, se detiene cualquier
      } //proceso y se termina este ciclo
      apagar();
    }
  }
}
```

Fig. A.15. Algoritmo de la instrucción Filtrar en Arduino

Con el programa que se muestra en la figura A.14 es posible leer la información que se recibe o transmite a través de los pines 2, 3 Tx y Rx respectivamente.



```
Prueba_de_conectividad Arduino 1.6.12
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

Prueba_de_conectividad

#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial PINES(2,3);
String N;
char x;

void setup(){
  Serial.begin(19200);
  PINES.begin(19200);
}

void loop() {
  N = ".";
  if (PINES.available()){
    x = PINES.read();
    Serial.print(x);
  }
  if (Serial.available()){
    x = Serial.read();
    PINES.print(x);
  }
}
```

Fig. A.16. Leer desde ESP 8266 y escribir en monitor serial (Obtenido de <https://www.prometec.net>)



## Bibliografía

(s.f.).

Arduino. (15 de 8 de 2017). Obtenido de <https://www.arduino.cc>

Ballén Suárez José Alejandro, G. G. (2006). Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia. Seminario Iberoamericano Sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua (pág. 12). San Paulo: VI SEREA.

Bernard, S. (2011). Comunicaciones Digitales. California: Prentice Hall.

CISCO System Inc. (2006). Fundamentos de Redes inalámbricas. Madrid: Pearson Educación S.A.

ENA. (2000). Estudio Nacional del Agua. Bogotá: D.C.

ESP8266 Module Quick Start Guide. (s.f.).

Hidropluviales, S. (22 de Junio de 2016). Soluciones Hidropluviales. Obtenido de <http://hidropluviales.com/productos/>

INEGI. (2002). Estadísticas del Medio Ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana. Distrito federal.

Kurose, F. J., & Ross, W. K. (1996). Redes de computadoras un enfoque descendente. Paerson.

Lee, w. C. (1995). Wireless & Cellular Telecommunications: 3th edition. Mc Graw Hill.

Malvino, A. P. (2000). Principios de electrónica. Madrid: Mac Graw Hill.

Peter, B. (2001). Electrotecnia. Madrid: Akal S.A.

Physics, I. C. (2011). Cálculo del Presupuesto de Potencia. Material de apoyo para entrenadores en redes inalámbricas.

Red del Agua UNAM. (1 de Abril de 2014). Sistemas de Captación de Agua de Lluvia. Impluvium, pág. 34.

Salud, O. M. (31 de Marzo de 2017). Organización Mundial de la Salud. Obtenido de <http://www.who.int/es/>

Salud, S. d. (1994). NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994., (pág. 7). Ciudad de México.

Sciences, N. A. (2007). El Agua Potable Segura es Esencial. Obtenido de <https://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/Overview/index.html>

- Sciences, N. A. (16 de Mayo de 2016). El agua potable es Esencial. Obtenido de <https://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/Treatment/Treatment-Processes.html>
- Stalling, W. (2004). Comunicaciones y redes de computadoras. Prentice-Hall.
- Tomasi, W. (2003). Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. México: Pearson.
- UIT, A. d. (1997). Datos de propagación y modelos de predicción para la planificación de sistemas de radiocomunicaciones de interiores.
- Universidad De Cadiz. (12 de Noviembre de 2016). Iniciando con Arduino uno. Obtenido de <http://www.uca.es>
- Urbana, I. (22 de Junio de 2016). Isla Urbana el agua donde se necesita. Obtenido de [www.islaurbana.org](http://www.islaurbana.org)
- Villareal, F. J. (1 de Abril de 2014). Sistemas de Captación de Agua de Lluvia. Impluvium, pág. 41.
- W., L. C. (2008). Sistemás de comunicaciones digitales y analógicos. México: Pearson.