



Università  
Ca' Foscari  
Venezia

Corso di Laurea  
in informatica (CT3)

Classe L-31 scienze e tecnologie informatiche

# Underwater wireless sensor networks

**Relatrice**

Prof.ssa Maria Simonetta Balsamo

**Laureando**

Mirco Venerba

872653

**Anno Accademico**

2020 / 2021

---

# INDICE

---

Abstract.....	5
1. Introduzione.....	7
1.1. L'evoluzione .....	8
1.2. Caratteristiche principali.....	8
1.3. Applicazioni e servizi .....	9
2. Reti subacquee.....	11
2.1. I componenti della rete.....	11
2.1.1. Il nodo o sensore sottomarino.....	11
2.1.2. Gestione raccolta dei dati .....	13
2.1.3. Gestione inoltro dei dati .....	13
2.1.4. Gestione elaborazione dei dati .....	14
2.1.5. Sottosistema di gestione dei dati e di supporto decisionale.....	15
2.2. L'architettura delle reti .....	16
2.2.1. L'architettura 2d .....	16
2.2.2. L'architettura 3d .....	17
2.2.3. L'architettura 3d statica.....	17
2.2.4. L'architettura 3d dinamica.....	18
2.3. Topologia di rete .....	20
2.3.1. Topologia centralizzata .....	20
2.3.2. Topologia distribuita .....	21
2.3.3. Topologia multi hop.....	23
2.4. Tipologia di segnali.....	24
2.4.1. Segnale radio.....	25
2.4.2. Segnale ottico.....	25
2.4.3. Segnale acustico.....	26
2.5. I criteri di progettazione .....	26
3. I protocolli delle UWSN.....	28
3.1. MAC: Media Access Control.....	28

3.1.1.	Protocolli basati su divisione del canale .....	29
3.1.1.1.	FDMA (Frequency Division Multiple Access) .....	29
3.1.1.2.	TDMA (Time Division Multiple Access) .....	31
3.1.1.3.	CDMA (Code Division Multiple Access) .....	32
3.1.1.4.	SDMA (Space Division Multiple Access) .....	34
3.1.2.	Protocolli ad accesso casuale .....	36
3.1.2.1.	Aloha .....	36
3.1.2.2.	CSMA (Carrier Sense Multiple Access) .....	37
3.1.3.	ARQ (Automatic Repeat Request) .....	39
3.1.4.	FEC (Forward Error Correction) .....	42
3.2.	Protocolli di routing .....	44
3.2.1.	Protocolli localization free .....	44
3.2.2.	Protocolli localization based .....	45
3.2.3.	Protocolli vector based .....	45
3.2.3.1.	Protocollo VBF (Vector Based Forwarding) .....	46
3.2.3.2.	Protocollo HH-VBF (Hop by Hop Vector Based Forwarding) .....	47
3.2.3.3.	Protocollo ES-VBF (Energy Saving Vector Based Forwarding) .....	47
3.2.3.4.	Protocollo C-VBF (Cluster Vector Based Forwarding) .....	48
3.2.4.	Protocolli depth based .....	48
3.2.4.1.	Protocollo DBR (Depth Based Routing) .....	49
3.2.4.2.	Protocollo EE-DBR (Energy Efficient Depth Based Routing) .....	50
3.2.4.3.	Protocollo D-DBR (Directional Depth Based Routing) .....	50
3.2.4.4.	Protocollo DS-DBR (Delay Sensitive Depth Based Routing) .....	50
3.2.4.5.	Protocollo DSEE-DBR (Delay Sensitive Energy Efficient Depth Based Routing) .....	51
3.2.4.6.	Protocollo DSM-DBR (Dynamic Sink Mobility Depth Based Routing) .....	52
3.2.5.	Protocolli clustered based .....	52
3.2.5.1.	Protocollo HydroCast (Hydraulic Pressure Based Any cast Routing) .....	53
3.2.5.2.	Protocollo DUCS (Distributed Underwater Clustering Scheme) .....	54
3.2.6.	Protocolli AUV based .....	54
3.2.6.1.	Protocollo Mobicast .....	55
4.	Valutazione delle prestazioni .....	57
4.1.	Consumo energetico .....	59
4.2.	Affidabilità e ritardo .....	60
4.3.	Throughput .....	61
4.4.	Perdita di pacchetti e di percorso .....	62
5.	Le piattaforme di simulazione e sperimentazione .....	63

5.1. Le componenti .....	63
5.1.1. Software .....	63
5.1.2. Modem acustici .....	64
5.1.3. I nodi sottomarini .....	65
5.2. I criteri di progettazione .....	66
5.3. Le tipologie .....	68
5.3.1. Simulazione a livello di laboratorio .....	69
5.3.1.1. Aqua-Lab .....	69
5.3.1.2. Upper .....	70
5.3.1.3. Seanet .....	70
5.3.1.4. Aqua-Sim .....	71
5.3.1.5. UW-Buffalo .....	71
5.3.2. Simulazione a breve termine .....	72
5.3.2.1. Aqua-Net .....	72
5.3.2.2. SeaLinux .....	72
5.3.2.3. UnetStack .....	73
5.3.2.4. Desert .....	73
5.3.2.5. SunSet .....	74
5.3.3. Simulazione a lungo termine .....	74
5.3.3.1. SeaWeb .....	74
5.3.3.2. Ocean-TUNE .....	75
5.3.3.3. SunRise .....	75
6. Conclusioni e sviluppi futuri .....	77
6.1. Le sfide aperte e le ricerche future .....	77
6.2. SensIs project .....	80
6.3. Conclusioni .....	82
Indice delle figure .....	83
Indice delle tabelle .....	84
Indice degli acronimi .....	85
Bibliografia .....	87

# Abstract

Questa tesi tratta l'argomento delle reti sottomarine, o Underwater Sensor Networks (UWSN). Introduce i principali aspetti di progettazione di questo tipo di reti dalle applicazioni e i relativi servizi, ai problemi critici di progetto, alle componenti, alle architetture e alle relative topologie fino ad arrivare alle tipologie di segnali usati, alla gestione dei protocolli, ai criteri di progettazione ed infine alla valutazione delle prestazioni ed alcuni esempi di progetti.

La motivazione principale della scelta di questo argomento della mia tesi è l'interesse per il fondale marino, ancora luogo in parte inesplorato e conoscerlo bene sarebbe utile per molte attività e alcune di queste sono:

- La navigazione;
- Lo sfruttamento minerario;
- La variazione delle correnti;
- Le maree;
- La salvaguardia della flora e della fauna;
- Le conseguenze dei cambiamenti climatici;
- Le previsioni di eventi catastrofici.

La tesi si colloca in questo ambito introducendo le UWSN e i suoi aspetti caratteristici.

Questa tipologia di rete di sensori rappresenta un sottoinsieme delle Wireless Sensor Networks (WSN). Quest'ultime sono costituite da un insieme di nodi o sensori wireless, posizionati in una determinata area geografica, che sono in grado di rilevare, memorizzare, elaborare ed infine trasmettere dati in maniera reciproca per poter così osservare dei fenomeni ed eventi di interesse in maniera coordinata per raggiungere fini comuni.

Questo nuovo tipo di interconnessione ha ampi utilizzi in diversi ambiti quali l'agricoltura, la gestione ambientale, la gestione industriale, le applicazioni militari, le applicazioni di assistenza e supporto. La loro struttura, progettazione e componenti dipendono dall'ambiente in cui queste reti sono richieste ed implementate.

Osserviamo che le Wireless Sensor Networks (WSN) si suddividono principalmente in: WSN terrestri tipicamente utilizzate per il monitoraggio ambientale, sorveglianza militare, WSN sotterranee adatte alla prevenzione catastrofi, la gestione estrazione da giacimenti, WSN multimediali l'implementazione di audio e video mediante microfoni e telecamere e le WSN subacquee usate per la raccolta dati oceanografici e la gestione stazioni offshore.

Quest'ultima tipologia è nata principalmente per fornire analisi dei dati in tempo reale per superare il precedente approccio che avveniva mediante deposito di un dispositivo di memorizzazione sotto il livello del mare e successiva raccolta e analisi che non poteva fornire previsioni real-time. Per questo motivo nasce l'esigenza delle reti di sensori wireless WSN anche in ambito marino prendendo il nome di Underwater Sensor Networks (UWSN). Tuttavia, una buona progettazione ed uso di tale tipologia di reti presenta ancora molte sfide aperte che illustriamo nell'ultimo capitolo della tesi.

La tesi è composta da sei capitoli dove ciascuno rappresenta una macroarea. In ogni capitolo analizziamo per la specifica macroarea le singole componenti in dettaglio e in particolare:

- Il primo capitolo introduce le reti di sensori, le motivazioni che portano alla loro progettazione e implementazione per poi arrivare a specializzarsi in quelle sottomarine per le quali verranno introdurre le applicazioni e i servizi;
- Il secondo capitolo introduce l'architettura delle reti di sensori in ambito marino discutendo quali sono le componenti, le tipologie di strutture, le topologie delle reti, le tipologie di segnali maggiormente utilizzate e adatte per concludere con i criteri di progettazione;
- Il terzo capitolo illustra i protocolli e i relativi vantaggi e svantaggi delle reti di sensori in ambito marino suddividendoli in due tipologie: quelli appartenenti al sottolivello MAC e quelli al livello network dove entrambi i livelli sono contenuti nel modello ISO/OSI;
- Il quarto capitolo introduce la valutazione delle prestazioni di queste reti, i diversi indici di prestazione, tra i quali consideriamo la durata della rete, la gestione del consumo energetico, il throughput e la perdita di pacchetti e di percorso.
- Il quinto capitolo illustra le piattaforme di simulazione e sperimentazione mediante la descrizione delle sue componenti, delle sue tipologie ed infine dei criteri di progettazione;
- Infine, l'ultimo capitolo riporta le conclusioni dello studio delle reti di sensori in ambito marino e una discussione di quali sono le sfide ancora aperte in questo ambito ed un esempio di progetto attuale.

# 1. Introduzione

Nella superficie della Terra, il terzo pianeta più distante dal Sole, si trova acqua in tutti e tre gli stati: liquido, solido e gassoso che insieme formano circa il 71% della sua estensione, di cui circa il 97% è costituito dagli oceani, circa il 2% si trova nelle calotte polari e nei ghiacciai e circa solo l'1% si trova nei laghi, nei fiumi, nelle falde acquifere, nelle falde sotterranee e nell'atmosfera.

Poiché gli oceani coprono la maggior parte della superficie terrestre, e con la rapida crescita della popolazione sulla Terra, e con la diminuzione delle risorse terrestri, ci si sta portando verso luoghi inesplorati che possono essere i fondali marini, le calotte polari ecc.

Negli ultimi anni, molte ricerche si sono focalizzate nella comunicazione sottomarina perché questo rappresenta un elemento fondamentale per poter progettare, sviluppare e migliorare applicazioni e servizi.

Occorre infatti stabilire una comunicazione sicura ed affidabile tra tutti i componenti dell'infrastruttura che devono essere in grado di comunicare e cooperare e di scambiarsi informazioni. È necessario poter scambiare messaggi fra le stazioni collocate geograficamente in diverse posizioni, ad esempio su diverse coste di un oceano.

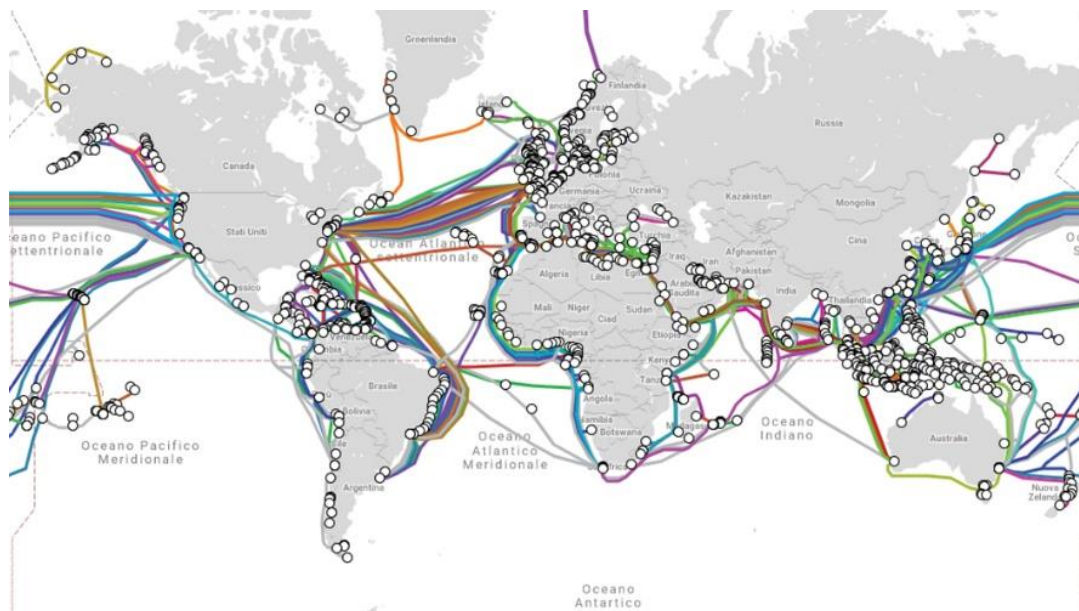


Figura 1: Comunicazione sottomarina cablata

Tutto ciò, si può osservare nella figura 1 che rappresenta la comunicazione subacquea realizzata fino ad oggi tramite cavi di comunicazione.

## 1.1. L'evoluzione

Di conseguenza, negli ultimi due decenni lo sviluppo delle reti ha portato notevoli miglioramenti, tra i quali si possono osservare la nascita di un nuovo tipo di interconnessione, monitoraggio ed elaborazione basato su un sistema distribuito di nodi wireless, che si chiamano sensori, denominato Wireless Sensor Network (WSN) e questo è stato illustrato nel documento [Coutinho 2018].

Questa tipologia di infrastruttura di rete si caratterizza da un'architettura distribuita di nodi o sensori, posti in un'area di interesse, che cooperano per poter raccogliere, memorizzare, analizzare e comunicare dati dell'ambiente circostante per poter monitorare alcuni eventi di proprio interesse.

Al giorno d'oggi, le reti distribuite sono utilizzate in larga scala, partendo dall'ambito dell'agricoltura, passando per quello militare, quello industriale, quello ambientale fino ad arrivare in ambito marino e queste ultime si chiamano reti sottomarine, o meglio Underwater Sensor Network (UWSN).

Le UWSN consistono solitamente in un insieme di stazioni di diverso tipo: le stazioni a terra denominate stazioni onshore, le stazioni sulla superficie dell'acqua denominate stazioni offshore, i veicoli subacquei autonomi AUV e ROV sotto il livello del mare ed infine i sensori o nodi sotto la superficie dell'acqua che servono per costituire il grafo di comunicazione.

## 1.2. Caratteristiche principali

La figura 1 illustra la tipologia di comunicazione usata in ambito sottomarino fino ad oggi e si può osservare che è prevalentemente quella via cavo o cablata e questo lo si può osservare mediante i segmenti presenti nella figura in quanto ciascuno denota un collegamento cablato tra due luoghi. Tutto questo è dovuto principalmente ad una serie di difficoltà da superare, sono stati e saranno necessari molti studi e ricerche in quanto le differenze tra la comunicazione marina e quella terrestre sono elevate e alcune di queste vengono spiegate nei paragrafi successivi.

Il primo problema da tenere in considerazione è il consumo energetico, molto più elevato nella comunicazione marina rispetto a quella terrestre in quanto in tutti i componenti quali sensori e trasmettitori, la durata della batteria è molto limitata e la loro sostituzione o ricarica è molto costosa e poco pratica da effettuare.

Per questo, una figura molto importante e in fase di studio, è data dalle risorse alternative, quali energia solare ed eolica, con la progettazione di meccanismi per la loro raccolta, gestione ed assegnazione. L'utilizzo efficiente dell'energia è uno dei punti critici nella fase di progettazione dell'intera infrastruttura, in particolare scelte di progetto, quali a titolo esemplificativo la densità dei nodi in una determinata area, la loro posizione iniziale e la loro posizione futura.



Il secondo problema è dato dalla tipologia di segnale con le relative caratteristiche quali la trasmissione, la larghezza di banda, l'efficienza, la velocità di trasmissione, l'interferenza ambientale ed acustica, il mezzo di comunicazione ed infine la velocità di propagazione. Osserviamo che mettendo a confronto la comunicazione marina con quella terrestre, sfruttano due tipologie di segnali diversi, la prima sfrutta il segnale acustico mentre la seconda sfrutta il segnale radio, e questo principalmente a causa dell'elevata dispersione e difficoltà di assorbimento del segnale radio e ottico in ambiente marino.

Il terzo problema consiste principalmente nell'architettura di rete e la relativa localizzazione tra le componenti. Le reti sottomarine sono progettate in due modi. Il primo consiste nell'uso di componenti statiche, ad esempio ancorate a delle banchine oppure a delle boe nel fondale, mentre il secondo consiste in componenti dinamiche, sfruttando le caratteristiche dell'ambiente circostante l'infrastruttura, quali le correnti e le onde superficiali, o dispositivi avanzati e autonomi.

Proprio per quest'ultima caratteristica la localizzazione di ciascuna componente dell'infrastruttura della rete diventa più difficoltosa. L'interfacciamento e l'implementazione della gestione del GPS non rappresentano un'alternativa valida in quanto sono caratterizzati da un'elevata dissipazione di energia e attenuazione del segnale.

Proprio per questo motivo, è importante definire nuovi algoritmi di geolocalizzazione, nuove tipologie architetture, nuovi protocolli di comunicazione e di routing in quanto i dati raccolti, se non correlati ad una posizione specifica, non sono totalmente analizzabili perché non si riesce a costruire l'intero ambiente circostante l'area d'interesse.

### **1.3. Applicazioni e servizi**

Come descritto nel documento [Coutinho 2018] alcuni esempi di applicazioni e servizi per reti sottomarine spaziano su molti campi, fra i quali, a titolo esemplificativo: le applicazioni per la sorveglianza tattica e la difesa della costa, per la gestione dell'off-shore, per il monitoraggio ecologico e chimico, per il monitoraggio dei processi geologici sul fondo dell'oceano, per l'esplorazione scientifica, per la raccolta di dati oceanografici, per la prevenzione delle catastrofi, per la navigazione assistita, per l'esplorazione subacquea senza equipaggio, per la biologia marina e l'internet of underwater things o IoUT.

Di seguito nella tabella 1 si possono osservare alcuni esempi per ciascuna tipologia di applicazione e/o servizio.

<b>Categoria</b>	<b>Esempi</b>
La sorveglianza tattica e la difesa della costa	Per lo sfruttamento commerciale, la sorveglianza militare, la sorveglianza acquatica
La gestione dell'off-shore	Per l'attività di estrazione relativa ad un giacimento petrolifero, gas naturale, condensati, pale eoliche
Il monitoraggio ecologico e chimico	Per l'ossigenazione, la temperatura, l'inquinamento, la salinità, la torbidità
Il monitoraggio dei processi geologici sul fondo dell'oceano	Per l'erosione, sedimentazione, attività mineraria, trivellazioni
L'esplorazione scientifica	Per i processi fisici, chimici, geologici e biologici
La raccolta di dati oceanografici	Per il video streaming, gestione della biodiversità, localizzazione delle imbarcazioni, radar, maree, vento e onde marine
La prevenzione delle catastrofi	Per le eruzioni sottomarine, attività sismiche e conseguenti maremoti
La navigazione assistita	Per l'identificazione di rocce e iceberg o altre tipologie di corpi presenti sul fondo del mare e/o oceano
L'esplorazione subacquea senza equipaggio	In quanto le condizioni subacquee non sono adatte per l'esplorazione umana dovuta all'alta pressione dell'acqua, all'imprevedibilità delle missioni, all'impossibilità di acquisire un'adeguata conoscenza degli eventi che accadono nell'ambiente circostante
La biologia marina	Per lo studio dell'ecosistema marino
L'Internet of Underwater things o IoUT	Per trattare l'evoluzione di oggetti e servizi in ambito sottomarino che si rendono riconoscibili e acquisiscono una propria identità nel mondo digitale e una capacità elaborativa grazie al fatto di poter comunicare, inviare, ricevere ed elaborare dati

Tabella 1: Lista di applicazioni e servizi delle UWSN con relativi esempi

## 2. Reti subacquee

In questo capitolo illustriamo le reti di sensori wireless in ambito sottomarino discutendo diversi punti partendo dalle componenti e dalle diverse architetture fino ad arrivare alle topologie delle reti, alle tipologie di segnali maggiormente utilizzati e adatti per poi concludere discutendo i criteri di progettazione.

### 2.1. I componenti della rete

Prima di descrivere in dettaglio le componenti del sistema, definiamo tre concetti fondamentali. Il primo definisce cosa rappresenta un nodo o sensore, il secondo definisce quali sono le sue caratteristiche ed infine il terzo definisce quali sono le sue componenti.

#### 2.1.1. Il nodo o sensore sottomarino

Un nodo rappresenta un'unità di elaborazione, di archiviazione e di comunicazione wireless posizionata rispetto ad un piano tridimensionale nel mare, ovvero potrebbe essere la relazione tra latitudine, longitudine e profondità, in grado di monitorare la regione di interesse od eventuali eventi di interesse.

Questi ultimi si dividono principalmente in tre tipologie. La prima consiste in nodi fissi, ovvero nodi che vengono attaccati a banchine oppure a boe ancorate nel fondo del mare. La seconda è caratterizzata da nodi mobili, si muovono sfruttando la dinamicità dell'acqua come correnti, onde superficiali oppure quando i sensori sono collegati ai veicoli autonomi subacquei AUV e ROV. Infine, la terza in nodi semimobili che vengono ancorati ad alcune boe che vengono sistemate in un'area prescelta da un'imbarcazione e lasciate statiche per alcuni periodi per eventuali studi, ricerche e monitoraggi.

Alcuni esempi di applicazioni potrebbero essere la raccolta dei dati oceanografici, il monitoraggio chimico, fisico ed ecologico dell'ambiente circostante l'intera infrastruttura di rete.

Un nodo sottomarino, chiamato sensore nelle UWSN, è formato da diversi componenti. Il primo consiste in una cpu, onboard computer, che serve a interfacciarsi a tutti i moduli presenti. La seconda è una memoria, dispositivo che serve per poter memorizzare i dati registrati dai sensori. La terza è costituita da un modem acustico, dispositivo che consente di comunicare in modalità wireless con onde acustiche in real-time e questo viene usato principalmente per lo scambio di dati inerente al monitoraggio, alla riconfigurazione, al rilevamento e al rapporto di guasti e dispositivi malfunzionanti. La quarta si compone di un componente per l'alimentazione. Ed infine l'ultima è

formata da un insieme di sensori dove ciascuno misura delle proprietà specifiche, come per esempio l'inquinamento, la salinità, la densità e la temperatura, e successivamente tramite delle interfacce li comunica alla cpu per le successive fasi di elaborazione e memorizzazione.

La figura 2 mostra la relazione tra questi quattro componenti. Si osservano principalmente due parti. La prima è quella centrale che corrisponde all'unità centrale di elaborazione, cpu e la seconda è composta da periferiche quali memoria, modem acustico, alimentazione e sensori.

La funzionalità principale di questa tipologia di infrastruttura di rete è svolta dai sensori, dove ciascuno misura delle proprietà specifiche dell'ambiente circostante quali inquinamento, salinità e ph. Per la successiva funzione di comunicazione con l'unità centrale si usano delle interfacce, quali canali di comunicazioni e protocolli. La fase di raccolta ed elaborazione dei dati svolta dalla cpu con la successiva fase di memorizzazione nella periferica in quanto le UWSN sono caratterizzate da una comunicazione non continua che può essere causata da alcune interferenze quali vita marina, gestione di impianti off-shore in quella determinata posizione. Infine, c'è la comunicazione dei dati raccolti ed elaborati rispetto ad un nodo di riferimento, che può essere sia una stazione di base e sia un nodo successivo per arrivare alla destinazione sfruttando un percorso multi hop.

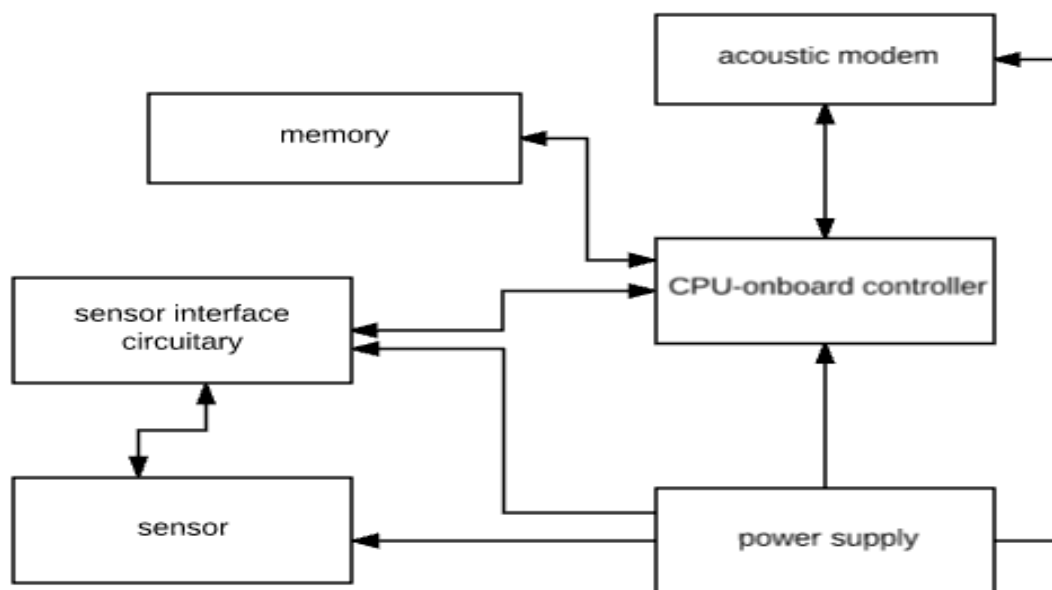


Figura 2: Componenti di un sensore sottomarino

Una conseguenza di quanto detto consiste nella definizione delle operazioni che vengono svolte all'interno delle UWSN e queste sono: la gestione della raccolta dei dati, dell'elaborazione dei dati, dell'inoltro dei dati ed infine il sottosistema di gestione dei dati e di supporto decisionale. Descriviamo ora in dettaglio le quattro componenti.

### **2.1.2. Gestione raccolta dei dati**

La prima componente dell'infrastruttura consiste nella raccolta dei dati. I nodi vengono distribuiti dove si intende effettuare il monitoraggio e il controllo di una particolare regione di interesse o di eventuali eventi di interesse. Ciascun nodo possiede dei sensori e ciascuno raccoglie dati rispetto ad una particolare caratteristica e proprietà come ad esempio l'inquinamento, la salinità, il ph, l'ossigeno disciolto, la temperatura, la densità. in formato analogico.

Successivamente entra in azione il trasduttore che è usato per convertire il segnale da analogico in digitale per l'elaborazione, sfruttando la capacità elaborativa della cpu, e comunicazione, sfruttando il modem acustico.

Un fattore chiave in questo processo di raccolta dei dati è il risparmio energetico in quanto in tutti i componenti quali sensori e trasmettitori, la durata della batteria è molto limitata e la loro sostituzione o ricarica è molto costosa e poco pratica da effettuare. Per tale motivo è nata la seguente nuova tecnica "parziale" di raccolta dei dati.

Si può osservare che l'ambiente marino, non è caratterizzato da una continua variazione molto altalenante delle sue proprietà e caratteristiche e per questo motivo, operazioni come la rilevazione continua, l'inoltro continuo di tutti i dati raccolti ed elaborati ad altri nodi e stazioni non è necessario e quindi basterebbe definire degli intervalli temporali per effettuare tali operazioni ed altri intervalli temporali per spostare lo stato dei vari nodi e delle stazioni su uno stato di ibernazione per simulare uno stato di sospensione di attività per ridurre al minimo il consumo di energia e migliorare la durata e la gestione della rete.

### **2.1.3. Gestione inoltro dei dati**

La seconda componente consiste nella comunicazione dei dati raccolti. Ci sono diverse tipologie di decisione sull'invio delle rilevazioni dei sensori rispetto ad un altro nodo o ad un'altra stazione di riferimento che può essere sia onshore che offshore. Nella comunicazione, un ruolo significativo è il risparmio energetico e di conseguenza bisogna decidere come, quanto, quando, a chi e perché comunicare per poter avere un inoltro selettivo riducendo così il numero di rilevamenti, di trasmissioni e di ricezioni raggiungendo una quantità minima di consumo energetico. Per questo scopo sono proposte due tecniche principali.

La prima consiste nell'invio dei dati quando essi non sono contenuti in determinati intervalli prefissati e quindi appartengono ad una tipologia di dati che si può chiamare "stato di allerta del sistema".

Un esempio di questa tipologia di invio di dati potrebbe essere la seguente. Dato un sistema che deve analizzare l'inquinamento dell'oceano, in fase di pianificazione e progettazione, sono stati definiti i seguenti intervalli numerici che identificano le varie categorie di inquinamento: rischio alto da 7 a 10, rischio medio da 4 a 6 ed infine basso rischio da 1 a 3. Di conseguenza in relazione alla categoria di appartenenza si decide come gestire il livello di rischio. Se il rischio fosse basso e quindi non c'è uno stato di allerta, il sistema non effettua invii di pacchetti in quanto i dati appartengono alla soglia della normalità e non c'è nessun cambiamento nell'area e nell'evento di interesse. Se il rischio fosse medio, si potrebbe pensare semplicemente come un invio alla stazione di base come report per l'analisi dei dati. Invece se il livello di rischio fosse alto, si potrebbe pensare come duplice invio, uno rispetto alla stazione di base mentre l'altro rispetto ai nodi che appartengono alla struttura del nodo che ha letto tale valore per poter magari aumentare il numero di rilevazioni per analizzare l'andamento futuro di quella specifica area ed evento di interesse.

La seconda tipologia di decisione sull'invio delle rilevazioni consiste in una architettura di rete multi hop per poter inoltrare lo stesso messaggio sfruttando la tecnica dello store and forward. Tale tecnica significa "memorizza ed inoltra" e nella quale un pacchetto prima di poter essere ritrasmesso nel collegamento in uscita deve essere stato totalmente ricevuto. La caratteristica di questa tipologia è anziché fare un invio di lunga portata, fare una serie di invii lungo un cammino di nodi per arrivare fino al nodo di destinazione, ciascuno di minor distanza. Tutto questo porta ad una distanza di propagazione minore, una minor potenza di trasmissione ed una maggior velocità di trasmissione data la struttura della rete sottoforma di insieme di nodi collegati reciprocamente.

#### **2.1.4. Gestione elaborazione dei dati**

La terza componente consiste nell'elaborazione dei dati. Solitamente questa fase viene svolta dalle stazioni che rappresentano un nodo chiave nell'architettura di rete.

Le UWSN si possono suddividere in due parti principali, la parte marina e la parte terrestre. La parte marina corrisponde all'intera infrastruttura sotto il livello del mare mentre la parte terrestre consiste nell'infrastruttura di un'azienda o dell'ente che si occupa della sua gestione, manutenzione e controllo.

Di conseguenza un punto chiave dell'infrastruttura di rete è quel nodo che rappresenta un collegamento tra le due componenti, in quanto ciascuna rete sfrutta segnali diversi. La rete sottomarina sfrutta il segnale acustico mentre la rete terrestre, e le stazioni sopra il livello del mare, sfruttano il segnale radio. Per questo motivo devono essere in grado di riconoscere entrambi i segnali, e proprio per questo rappresentano un punto chiave dell'infrastruttura e della gestione dell'analisi dei dati.

Tali punti svolgono operazioni come la ricezione dei dati dai vari nodi subacquei della rete ed eventualmente da altre stazioni, l'eliminazione di eventuali duplicati, l'eliminazione di eventuali informazioni errate, il recupero delle informazioni più significative e rilevanti rispetto alla tipologia di analisi e controllo che si sta svolgendo, la correzione di eventuali errori ed infine la conversione del segnale da acustico a radiofrequenza e viceversa.

Una nuova tipologia di dato da elaborare è stata introdotta dalla nascita delle nuove architetture dinamiche delle reti di sensori subacquei, nate per poter modificare "in corsa" la topologia di rete risolvendo eventuali problemi dovuti alle ostruzioni da attività biologiche, alla vita marina, alle interferenze dovute alle imbarcazioni, ad altri impianti offshore, oppure per monitorare e controllare un nuovo fenomeno, un nuovo evento od una nuova area sottomarina oppure per creare un nuovo collegamento tra altre due infrastrutture già esistenti senza intervenire manualmente e fisicamente.

Questa nuova tipologia di architettura si basa su alcune nuove figure come i veicoli autonomi subacquei, AUV e ROV. Di conseguenza dalle stazioni di base, è possibile il loro controllo remoto, a distanza, regolando una loro nuova posizione, quale latitudine, longitudine e profondità introducendo una nuova tipologia di dato da elaborare.

### **2.1.5. Sottosistema di gestione dei dati e di supporto decisionale**

L'ultimo componente consiste in un sistema di gestione dei dati e di supporto decisionale e principalmente risiede in una stazione di terra. Esso svolge due funzionalità principali. La prima consiste nel ciclo di vita dei dati e la seconda consiste nell'interazione tra uomo, stazione di riferimento e dati.

Il ciclo di vita dei dati inizia dalla loro raccolta dalle stazioni di mare, poi c'è la fase di memorizzazione in una base di dati e successivamente l'elaborazione e analisi sfruttando metodi statistici, aritmetici e ponderati. L'ultima fase consiste nella standardizzazione dei dati, ossia quell'operazione che si può definire mediante un processo di reingegnerizzazione convertendo la struttura dei dati in un formato standard, mantenendo le caratteristiche inalterate, per la possibile archiviazione e riuso futuro.

La seconda funzionalità si basa nell'interazione tra l'utente finale o operatore, la stazione di riferimento e i dati che sono contenuti nella base di dati. Questo è implementato seguendo il paradigma client e server, architettura mediante la quale un client si connette ad un server per la fruizione di un certo servizio quale gestione dei dati, accesso a determinate risorse e scambio di informazioni.

Un esempio in questo contesto dell'architettura client server è la seguente. La stazione di riferimento rappresenta un punto critico, infatti consiste nel collegamento tra le due architetture, quella marina e quella terrestre. La si può immaginare come un server con installati alcuni applicativi, alcuni dei quali vengono usati per la raccolta dei dati dai nodi marini, altri vengono usati per l'elaborazione e la memorizzazione, mentre altri sfruttano un'interfaccia grafica GUI per permettere l'accesso, la gestione dei dati ed eventuale reportistica al client che si connette. Un esempio di client potrebbe essere il seguente: una persona addetta alla manutenzione o alla gestione dell'infrastruttura sottomarina, si connette tramite un qualche protocollo di rete alla stazione di riferimento e sfrutta i suoi applicativi per vederne l'utilizzo ed effettuare le relative operazioni.

## **2.2. L'architettura delle reti**

Negli ultimi anni anche la ricerca nella comunicazione sottomarina sta facendo molti passi avanti, stanno emergendo le Underwater Sensor Network UWSN, sistema distribuito di sensori wireless subacquei. Le reti di sensori sottomarini si dividono principalmente in tre tipologie architetture: l'architettura 2d, l'architettura 3d statica e l'architettura 3d dinamica.

### **2.2.1. L'architettura 2d**

L'architettura 2d richiede solo due dimensioni, e di conseguenza si hanno i riferimenti rispetto ad un piano orizzontale come per esempio la latitudine, la longitudine e la distanza reciproca di tutti i componenti dell'infrastruttura.

Questo porta degli svantaggi in quanto manca una visione d'insieme dell'intero sistema e dell'ambiente circostante e avviene solo il monitoraggio e l'elaborazione dei dati appartenenti ad una curva di livello di profondità  $p$ .

La figura 3 illustra mediante un insieme di piani bidimensionale, prima visti dall'alto e poi in un piano tridimensionale, un modello di questa tipologia architetture e si può osservare che sono reti separate e di conseguenza manca una visione dell'intero sistema. Per questo motivo sono nate prima le architetture 3d statiche e successivamente quelle dinamiche.



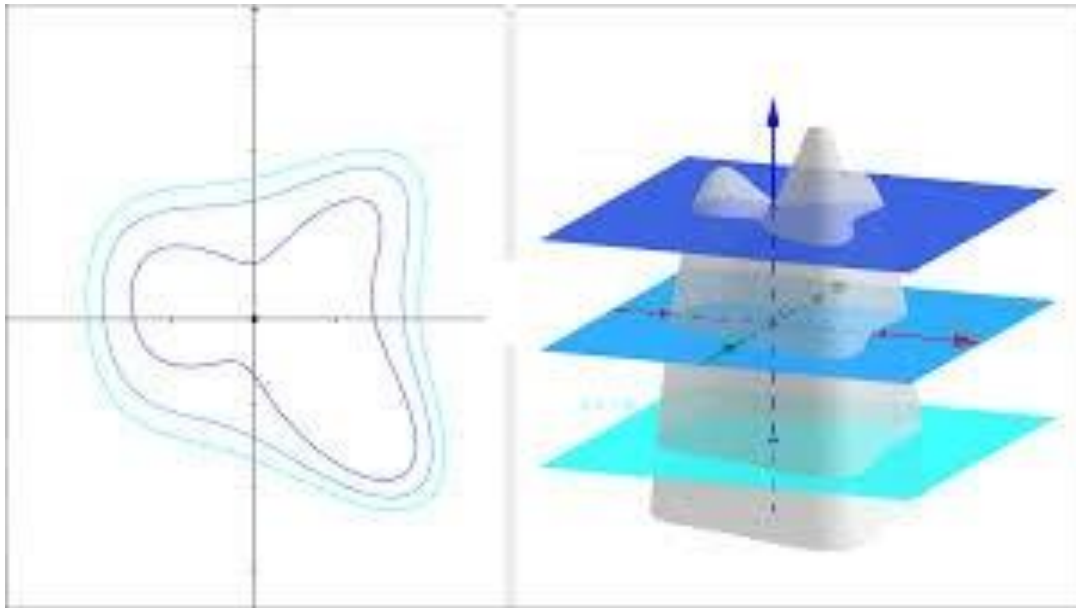


Figura 3: Esempio di architettura 2d

### 2.2.2. L'architettura 3d

L'architettura 3d richiede oltre alle due dimensioni, anche una terza che corrisponde alla profondità, e i nodi della rete vengono distribuiti in diversi livelli verticali e orizzontali.

Dato che le UWSN sono reti sottomarine, soffrono di un problema specifico di non garantire una copertura ottimale a causa di possibili ostacoli. Questi possono essere causati da ostruzioni derivanti da attività biologiche, e più in generale vita marina e interferenze di attività umane, per esempio dovute alle imbarcazioni e ad impianti offshore. Questa tipologia architetture si suddivide in due modelli diversi, il primo statico e il secondo dinamico, il secondo evoluzione del primo.

### 2.2.3. L'architettura 3d statica

Nelle reti basate su un'architettura 3d statica, i nodi sono disposti a varie profondità e la loro posizione rimane fissa nel tempo.

La figura 4 illustra un esempio di comunicazione della architettura 3d statica. Si possono osservare diverse componenti, tra le quali la stazione onshore collegata via satellite ed inoltre rispetto ad una stazione offshore. Inoltre, si può osservare che la stazione offshore è collegata all'intera infrastruttura sottomarina che è composta da soli sensori con posizione fissa ossia ancorati nel fondale.

Possiamo osservare alcuni svantaggi di questa scelta architetture ovvero eventuali ostruzioni da attività biologiche sia di deposito con il conseguente innalzamento del fondale marino e la

successiva non raggiungibilità della comunicazione in quel nodo, e sia nel canale comunicativo tra due nodi dovuto ad interferenze di attività umane come, per esempio, trivellazioni per l'attività mineraria oppure dovuto più in generale alla vita marina.

Per superare tali inconvenienti, le reti più recenti sono state progettate con architettura 3d dinamica.

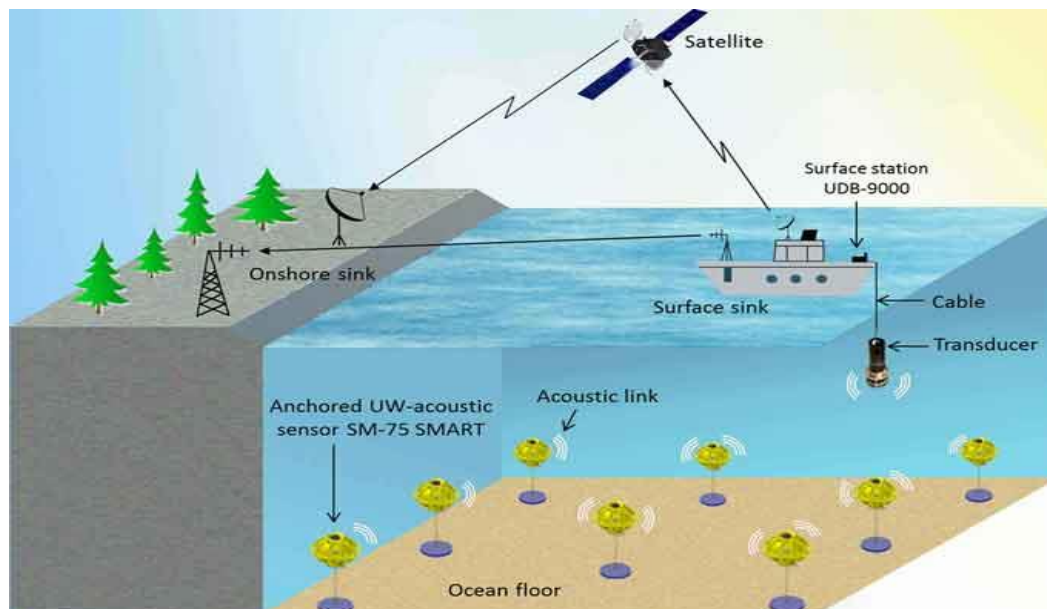


Figura 4: Esempio di architettura 3d statica

## 2.2.4.L'architettura 3d dinamica

L'architettura 3d dinamica differisce da quella statica per la capacità di riprogettazione e questo è dovuto alla realizzazione di sensori autonomi, detti veicoli autonomi subacquei AUV o ROV.

Questo rende ogni singolo componente dell'architettura indipendente e "intelligente" implementando la possibilità di variane la posizione sia in maniera automatica che in maniera manuale evitando i difetti dell'architettura statica.

La variazione automatica sfrutta per esempio la capacità o l'incapacità di comunicare e quindi gli stati connesso/non connesso per decidere in che vincoli temporali muovere la componente. La variazione manuale sfrutta per esempio le correnti marine, le onde superficiali per riprogettare la rete in maniera automatica e in relazione agli eventi nel contesto circostante dell'intera infrastruttura. In questo modo possiede una proprietà di configurazione automatica per la riprogrammazione e per la riprogettazione.

Un esempio di questa tipologia architetturale è illustrato nella figura 5 che rappresenta un'architettura dinamica della quale sono mostrate le componenti caratteristiche. Il primo consiste nel veicolo autonomo subacqueo e il secondo consiste in reti subacquee non collegate tra loro e sfruttano il primo componente per comunicare.

Il veicolo autonomo subacqueo consiste in un aliante o simili a bassa potenza oppure non motorizzato. È utile per massimizzare la copertura del sensore in un'area molto più estesa in quanto contiene anch'esso un nodo subacqueo interno che può usare per disconnettersi dalla rete attuale e connettersi ad un'altra rete disponibile pur cambiando la propria posizione, quale latitudine, longitudine e profondità rendendo possibile il trasferimento di pacchetti tra reti eterogenee e sconnesse.

Nella figura 5 osserviamo un esempio di questa caratteristica. In particolare, la figura mostra due reti principali, sconnesse tra di loro. La prima, a sinistra, ha una topologia a stella dove tutti gli endpoint sono connessi alla componente centrale. La seconda, a destra, con topologia magliata parzialmente connessa dove quasi tutti i nodi sono collegati reciprocamente. L'esempio in figura mostra la presenza di un veicolo autonomo subacqueo, che si disconnette dalla rete di sinistra si dirige alla rete di destra, ossia quella di destinazione, rendendo possibile il trasferimento, se pur limitato, di pacchetti.

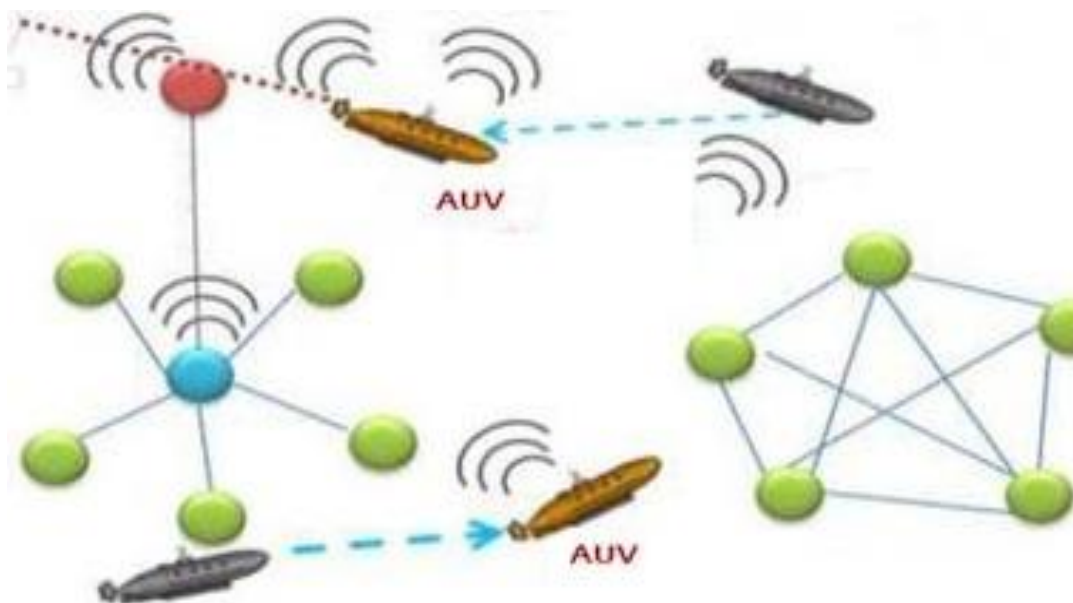


Figura 5: Esempio di architettura 3d dinamica

## 2.3. Topologia di rete

Un altro concetto fondamentale nelle UWSN, come in tutte le altre reti, è la topologia. Questa consiste nel modello geometrico che corrisponde alla disposizione logica e fisica di tutti i componenti della rete. Rappresenta una scelta importante in fase di progettazione e sviluppo in quanto determina e influenza le dimensioni, la forma, il numero di componenti, il numero di interconnessioni, l'affidabilità, i costi, l'espandibilità, il consumo energetico e la complessità della rete. Di conseguenza, ne determina vantaggi e svantaggi.

Tre sono le principali topologie di rete in ambito marino. La prima consiste in una rete centralizzata dove la comunicazione avviene mediante un nodo principale detto hub. La seconda è rappresentata da una rete distribuita caratterizzata, da un numero elevato di interconnessioni in quanto ciascun nodo svolge sia le operazioni di client e di server. L'ultima si compone di una rete multi hop con la caratteristica di favorire la comunicazione sfruttando un cammino composto da vari salti, detti hop, usando algoritmi di routing per la gestione dell'instradamento dei pacchetti in maniera efficiente.

### 2.3.1. Topologia centralizzata

Nella topologia di rete in ambito marino centralizzata. Si osservano due figure principali: un insieme di elaboratori chiamati endpoint che usufruiscono di servizi che sono installati in macchine remote e un'unità centrale, hub, con il compito di gestire la comunicazione tra i vari endpoint.

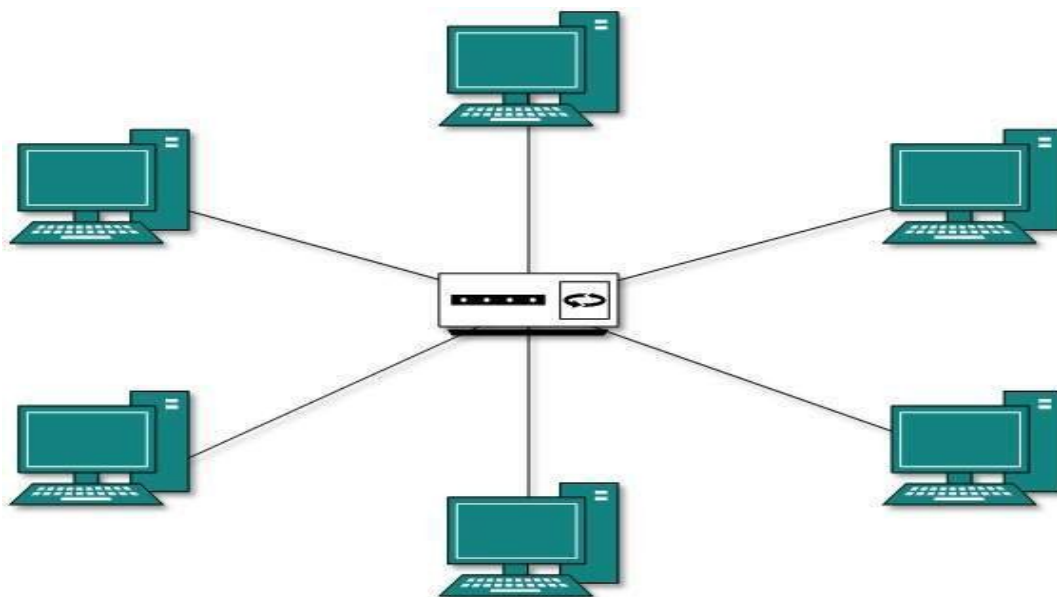


Figura 6: Esempio di topologia di rete centralizzata

La figura 6 illustra un esempio di configurazione di una rete centralizzata nella quale gli elaboratori sono collegati ad una stazione principale. Nelle reti marine, osserviamo che tale topologia sia particolarmente adatta per le reti nelle acque profonde in quanto la figura principale è composta da una boa situata sul livello del mare che collega le due reti eterogenee, quella marina e quella subacquea. Di conseguenza questo ruolo può essere svolto dalla stazione principale della rete, che è collegata contemporaneamente a tutti le componenti della rete subacquea tramite modem acustico e allo stesso tempo, tramite un modem radio, alla stazione onshore di riferimento.

In questa topologia si possono osservare diversi vantaggi e svantaggi.

Fra i vantaggi di questa topologia ci sono:

- La facilità di installazione e configurazione;
- Il collegamento alla stazione principale rispetto ad un altro endpoint per far sì che qualche problema in un nodo non influisca sulle prestazioni dell'intera rete;
- L'aggiunta di nuovi nodi senza interruzioni della rete rendendo efficiente l'espandibilità e la scalabilità e la sicurezza del trasferimento di pacchetti in quanto viaggiano solo attraverso delle stazioni prescelte.

Invece alcuni svantaggi di questa topologia sono:

- La criticità di alcuni nodi centrali rispetto agli endpoint in quanto il numero massimo di connessioni, il carico trasmissivo, la velocità di trasmissione e la larghezza di banda dipendono direttamente dalla componente centrale. In altre parole, la possibilità che tali nodi costituiscano colli di bottiglia può limitare prestazioni e affidabilità della rete;
- La dimensione della rete perché composta da nodi caratterizzati da un modem acustico e il range del segnale acustico è limitato e di conseguenza la rete non può coprire distanze elevate.

### **2.3.2. Topologia distribuita**

Lo sviluppo dei sistemi distribuiti e l'elaborazione distribuita è oggetto di ricerca e sviluppo da tempo. Progettare la gestione della rete in modo distribuito è sia naturale e sia motivato dagli svantaggi della topologia centralizzata sopra citati.

La caratteristica principale della topologia e gestione della rete completamente distribuita è rappresentata dall'inesistenza di una gerarchia tra i nodi, in quanto ciascuna stazione è funzionalmente equivalente alle altre perché offre servizi sia da client che da server.

L'idea di fondo è la seguente. Un sistema distribuito è caratterizzato da un insieme di applicazioni e servizi logicamente indipendenti, ma in relazione riguardo i relativi reindirizzamenti dei dati di input e di output. Questa relazione è dovuta allo scopo principale di questa topologia, in quanto si mira a perseguire obiettivi comuni sfruttando un'infrastruttura di comunicazione software e hardware.

Lo si può osservare mettendo a confronto i ruoli che possono assumere i vari applicativi in relazione al calcolatore dove sono installati. Si possono osservare tre figure principali. La prima consiste nella figura del client ovvero quando vengono utilizzati dati e servizi installati su una macchina remota. La seconda consiste nella figura del server quando si mettono a disposizione i propri servizi e i propri dati ad altre macchine. Ed infine la terza consiste nella figura dell'actor quando vengono svolte funzioni sia da client che da server.

Un primo esempio lo si può vedere nella figura 7. Si può osservare che la topologia di rete è parzialmente magliata in quanto ciascun calcolatore può essere connesso con altre stazioni comunicando e cooperando per rendere possibili servizi in maniera coordinata per raggiungere fini comuni.

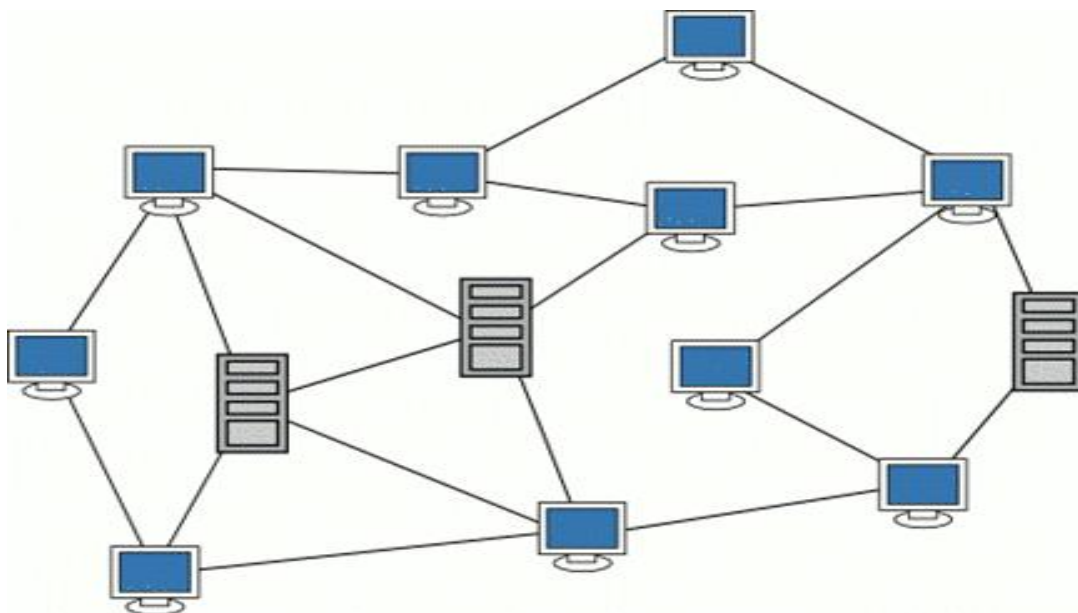


Figura 7: Esempio di topologia distribuita

Alcuni esempi di vantaggi possono essere i seguenti:

- La concorrenza e la trasparenza, ossia una molteplicità di processi che sono in esecuzione nello stesso istante di tempo su macchine diverse per raggiungere obiettivi comuni sfruttando risorse comuni non accorgendosi di lavorare con più macchine ma bensì con una macchina soltanto;
- Elevata affidabilità e tolleranza ai guasti in quanto la rete è molto ridondante e si possono stabilire eventuali percorsi in caso ci sia un guasto ad una stazione per non aver l'intero sistema non funzionante ma solamente un eventuale rallentamento;
- Integrazione ed eterogeneità in quanto questi sistemi sono in grado di far comunicare stazioni eterogenee sfruttando canali di comunicazioni comuni;
- Scalabilità, ossia la possibilità di ampliare il numero di componenti e tipo per far crescere il sistema, senza doverne variare la struttura e i protocolli.

Alcuni svantaggi sono i seguenti:

- Complessità della progettazione del software in quanto bisogna gestire comunicazioni sincronizzate, esecuzione concorrente e di conseguenza bisogna gestire standard di comunicazione e standard per la multiplatforma;
- Sicurezza in quanto non c'è più una stazione centrale da proteggere ma c'è l'intero sistema da mettere in sicurezza per evitare intercettazione di dati e servizi;
- La comunicazione e la complessità del sistema in quanto la topologia è magliata e la comunicazione è dinamica e di conseguenza possono esserci sbilanciamenti nell'uso delle risorse e per questo motivo si ha la necessità di sfruttarle in maniera corretta, omogenea e distribuita.

### 2.3.3. Topologia multi hop

L'ultima topologia di rete in ambito marino è un'evoluzione delle reti precedenti e questa è rappresentata da una rete multi hop. La caratteristica principale di questa topologia consiste nello sfruttare la tecnica dello store and forward, una tecnica di commutazione di pacchetto che consiste nel suddividere l'informazione da trasmettere in più pacchetti di dimensione ridotte trasmessi individualmente ed in sequenza.

Per questo motivo tale topologia è caratterizzata dal fare una serie di invii lungo un cammino di nodi facendo dei salti chiamati hop per arrivare fino al nodo di destinazione, facendo così degli inoltri di minor distanza anziché fare un invio di lunga portata.

Dato il maggior quantitativo di pacchetti, sono di fondamentale importanza gli algoritmi di routing che consistono nell'effettuare il corretto instradamento dei pacchetti verso il nodo di destinazione. Infatti, una figura importante in questa topologia è rappresentata dalle tabelle di instradamento che consistono in un elenco di rotte per arrivare ad una determinata destinazione in relazione al numero di nodi contenuti nel percorso tra la stazione di partenza e la stazione di arrivo oppure in relazione alla distanza tra la stazione sorgente e la stazione destinataria.

La figura 8 illustra un esempio di questa topologia con un insieme di nodi come una rete distribuita parzialmente magliata dove ciascun nodo può essere connesso reciprocamente ad altri nodi. Nel momento in cui si trasferisce un'informazione dai nodi, viene creata una serie di pacchetti di dimensione ridotta da spedire singolarmente ed in sequenza. Successivamente, tramite gli algoritmi di routing e sfruttando le tabelle di instradamento, di cui tratteremo nel capitolo successivo, viene determinata una sequenza di nodi come percorso per trasmettere la sequenza di pacchetti dal nodo sorgente fino al nodo destinazione per la successiva costruzione del pacchetto originario nell'endpoint di destinazione.

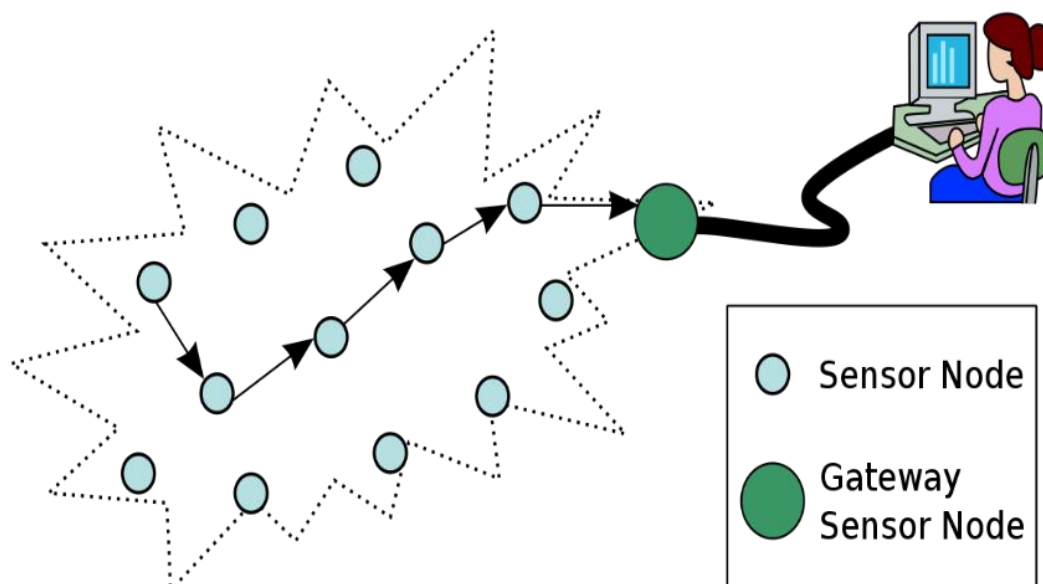


Figura 8: Esempio di rete multi hop

## 2.4. Tipologia di segnali

Le UWSN consistono in un insieme di nodi o sensori subacquei comunicanti. La progettazione e realizzazione di una rete sottomarina ha diversi punti critici dovuti alle differenze rispetto alla comunicazione terrestre. Fra queste il costo, la potenza di trasmissione, la memoria ma quella più significativa è rappresentata dalla comunicazione nel canale sottomarino perché si contraddistingue



da un'attenuazione maggiore rispetto al canale terrestre. Le principali tipologie di segnali per le reti UWSN sono le seguenti: il segnale radio, ottico ed acustico.

### **2.4.1. Segnale radio**

Il segnale radio è rappresentato da un insieme di onde con frequenze nell'intervallo 3KHz-300GHz e viaggiano rispettivamente da 100Km a 1mm. Ricordiamo che la frequenza e la relativa distanza di trasmissione sono inversamente proporzionali. Di conseguenza questa tipologia di segnale è in grado di propagarsi nell'ambiente sottomarino solo con frequenze estremamente basse altrimenti con frequenze elevate si potrebbe comunicare con una distanza di trasmissione molto ridotta rispetto all'ambiente circostante dell'infrastruttura. Per questo motivo questa tipologia di segnale non viene usata per la comunicazione su lunghe distanze dovuto sia alla proprietà inversamente proporzionale frequenza-distanza e sia alla natura conduttiva dell'acqua in quanto riduce la lunghezza d'onda del segnale.

### **2.4.2. Segnale ottico**

Il segnale ottico usa la luce come mezzo trasmissivo. Per usare la comunicazione ottica bisogna sfruttare tre componenti principali. La prima consiste in un trasmettitore con il compito di codificare il pacchetto ricevuto dalla stazione sorgente in un segnale ottico per poi trasferirla verso il ricevitore destinatario. La seconda è caratterizzata dal canale trasmissivo con il compito di trasferire il pacchetto sottoforma di segnale ottico dal trasmettitore fino al ricevitore. Ed infine la terza componente è composta da un ricevitore che è il dispositivo con il compito di decodificare il messaggio ricevuto sottoforma di segnale ottico e inoltrarlo alla stazione di destinazione.

Tuttavia, il segnale ottico in ambito marino viene utilizzato generalmente per brevi distanze come, per esempio, la gestione portuale in quanto anche se non è caratterizzato da forti attenuazioni come le altre due tipologie di segnale, è soggetto allo scattering della luce.

Questo fenomeno consiste nella riemissione di fasci di luce quando il segnale ottico colpisce un insieme di particelle disperse nell'ambiente circostante che possono essere di grandezza variabile e di stato variabile come solide, gassose e liquide. Questa riemissione è diversa nell'angolazione e nell'intensità in relazione alla grandezza e allo stato delle particelle colpite e alla lunghezza d'onda del fascio di luce incidente.

Di conseguenza, questa caratteristica porta una degradazione del segnale e proprio per questo motivo il range di comunicazione sfruttando il segnale ottico è molto limitato in ambiente marino e una conseguenza di tutto ciò consiste nell'uso del segnale acustico.

### 2.4.3. Segnale acustico

Il segnale acustico è la tipologia principale usata in ambito marino principalmente per due fattori. La bassa frequenza che l'acustica sfrutta nel range 20Hz-20KHz, comporta una minore attenuazione, perché minore è la frequenza minore sarà l'attenuazione. Il secondo motivo è la velocità di propagazione in quanto l'onda acustica si propaga più velocemente nei liquidi rispetto all'aria e maggiore è la profondità maggiore sarà la velocità di propagazione.

Tuttavia, il segnale acustico riscontra una serie di problemi fra i quali:

- L'effetto doppler che è caratterizzato da un cambiamento della frequenza e della lunghezza d'onda in relazione al cambiamento di posizione della sorgente rispetto alla stazione di destinazione;
- La propagazione multipath, ossia un fenomeno di propagazione del segnale acustico su più percorsi per arrivare fino alla stazione di destinazione che può essere causato da condizioni atmosferiche ed eventuale riflessione;
- Il fenomeno della rifrazione che consiste in un cambio di direzione del segnale in quanto viene distorto il percorso di propagazione dovuto alla bassa frequenza delle onde acustiche;
- Il rumore che consiste in un insieme di segnali indesiderati e imprevisti che si sovrappongono al segnale originale provocando un'alterazione del pacchetto trasferito con una possibile perdita d'informazione ed alcuni esempi possono essere i seguenti quali turbolenze, interferenze dovute al passaggio di navi, vita marina, moto delle onde marine, rumore termico ed infine eventuali trivellazioni nel fondo marino.

Anche se la comunicazione acustica è la tipologia di comunicazione più usata in ambito marino, per i suoi limiti anche questo segnale ha bisogno di una fase di raccolta dei dati e di una fase di filtraggio ed elaborazione per ovviare ai vari problemi sopra indicati. Sono ancora molte le sfide aperte per poter rendere l'acustica un segnale identificabile senza errori, pur rimanendo il mezzo di comunicazione più adatto in ambiente marino.

## 2.5. I criteri di progettazione

Dopo aver brevemente introdotto alcune caratteristiche delle architetture e delle topologie delle UWSN si può osservare che per una corretta progettazione e implementazione di una rete di sensori sottomarini bisogna saper gestire alcuni punti di fondamentale importanza, fra i quali citiamo i seguenti:

- La scalabilità dell'infrastruttura, ovvero la capacità di diminuire o aumentare il carico elaborativo in relazione alle necessità, alle nuove disponibilità di materiali strumenti e servizi in relazione ad un aumento di domande per potersi adattare al meglio alle nuove richieste.
- La gestione e il controllo topologico, ovvero riuscire ad avere una visione d'insieme dell'infrastruttura in un qualunque momento per poter avere la consapevolezza di conoscere la struttura, posizione e canali di comunicazione tra i vari nodi che compongono l'infrastruttura di rete.
- La gestione della localizzazione dei singoli nodi e la gestione dell'instradamento dei pacchetti, in quanto l'ambiente marino è molto dinamico con possibili variazioni dell'intera infrastruttura. Per evitare rallentamenti e malfunzionamenti occorre definire appropriate strategie per avere una visione d'insieme in un qualunque momento.
- La gestione energetica, perché ogni componente usato in un'infrastruttura delle UWSN è alimentato a batterie e il risparmio energetico è una sfida aperta in questo ambito per l'implementazione di nuovi strumenti e servizi per poter sfruttare le risorse rinnovabili.
- La gestione dell'elaborazione in maniera centralizzata o distribuita, a seconda delle funzionalità che si vogliono abbinare a ciascun componente dell'infrastruttura quali funzioni da client, da server o miste.

### 3. I protocolli delle UWSN

Come descritto nel capitolo precedente le UWSN stanno emergendo in molti usi e applicazioni, tra i quali possiamo vedere il monitoraggio ambientale, l'esplorazione scientifica, la prevenzione delle catastrofi e molto altro.

Purtroppo, attualmente ci sono ancora molti limiti e sfide aperte e questo è dovuto principalmente alla differenza con la comunicazione terrestre, tra le quali la gestione energetica, la mobilità involontaria e la localizzazione delle componenti dell'infrastruttura di rete ed infine la tipologia di segnale da usare.

La differenza principale consiste nella mobilità involontaria, ovvero la capacità di ciascun componente dell'infrastruttura di rete di muoversi liberamente in base a diversi eventi e fenomeni ambientali, tra i quali si possono osservare le correnti marine, la tipologia del fondale marino e le condizioni atmosferiche.

Questo può causare con il passare del tempo una dispersione dei nodi e sensori all'interno dell'ambiente marino e questo fa sì che eventuali collegamenti che erano presenti in un istante  $T$ , potrebbero non essere più presenti in un altro istante successivo  $T'$  oppure viceversa.

Per tali motivi le reti di sensori sottomarini possono cambiare frequentemente sia nell'aspetto topologico che nella quantità e qualità dei collegamenti. Di conseguenza la progettazione di un protocollo di rete efficiente, affidabile e dinamico per l'ambiente sottomarino è una sfida molto impegnativa.

Per poterli analizzare bisogna tenere in considerazione che stiamo trattando l'ambiente sottomarino e questo è caratterizzato da una larghezza di banda limitata, elevati ritardi di propagazione, corta portata del segnale acustico ed una minore risorsa energetica per le componenti. Inoltre, solitamente la comunicazione è rapida e il tempo di inattività di un utente è maggiore del tempo che un utente trascorre in fase di trasmissione.

Questi motivi aprono una sfida nell'accesso multiplo e condiviso del canale (MAC) per consentire a più elaboratori di condividere in maniera equa ed efficace un canale di comunicazione.

#### 3.1. MAC: Media Access Control

Questo rappresenta un sottolivello del livello Data Link del modello ISO/OSI, detto sottolivello MAC. Esso contiene protocolli che si occupano della competizione tra calcolatori (stazioni) su un canale

broadcast chiamato anche multiaccess channel o random access channel e questo è stato illustrato nel documento [Shengming 2018].

In un canale trasmissivo, la competizione riguarda la gestione del turno di comunicazione tra le varie stazioni per far sì che esse non trasmettano contemporaneamente altrimenti i segnali si disturberebbero. Di conseguenza l'allocazione e la gestione del canale condiviso è il passo principale per la gestione dell'infrastruttura di rete ed essa può avvenire in due tipologie, statica e dinamica.

L'allocazione statica del canale trasmissivo consiste in una preallocazione di banda adatta ad un ambiente fisso e non variabile nel tempo con un numero di utenti e data rate costanti. In questa tipologia si possono osservare alcune tecniche di suddivisione del canale basate sulla Frequency Division Multiple Access (FDMA), sul Time Division Multiple Access (TDMA) e sul Code Division Multiple Access (CDMA). Però questa soluzione ha alcuni svantaggi, tra i quali spreco di banda quando un utente non trasmette o incapacità di gestire il flusso di traffico bursty.

Perciò si usa un'allocazione dinamica che consiste in una soluzione adattativa basandosi sull'adattamento alle diverse esigenze di trasmissione. Per tale motivo, bisogna fare delle precisazioni riguardo le stazioni, la trasmissione, la suddivisione del tempo e la gestione delle collisioni.

In questa tipologia di allocazione il canale è unico ed è presente un insieme di stazioni che comunicano reciprocamente con frame generati ed inviati in determinati intervalli di tempo. Per questo motivo se due o più stazioni trasmettono nello stesso istante di tempo nel canale si verifica una collisione ed è necessaria una ritrasmissione. Diversi protocolli per gestire le reti di questo tipo sono definiti per la gestione del tempo continuo o suddiviso in slot ed un eventuale ascolto del canale prima di trasmettere (carrier sense e no carrier sense). Alcuni esempi di questa tipologia illustrati nel documento [Heidemann 2012] possono essere i seguenti: Aloha, CSMA, CSMA/CD e CSMA/CA.

### **3.1.1. Protocolli basati su divisione del canale**

#### **3.1.1.1. FDMA (Frequency Division Multiple Access)**

Frequency Division Multiple Access (FDMA) è un protocollo basato su divisione del canale condiviso suddividendo la banda originale in sottobande di larghezza equivalente dove ciascun sottocanale ha una frequenza per la relativa trasmissione. Una conseguenza di tutto ciò è la possibile trasmissione contemporanea in più canali in quanto usando frequenze diverse non si avranno interferenze. Da tutto questo deriva la formazione di molteplici sottocanali dove ognuno è di dimensione fissa e con

larghezza di banda imitata e come osserviamo nei paragrafi successivi quando il traffico è bursty il relativo canale degrada portando così inefficienza e inflessibilità.

Un esempio di rappresentazione di questa tipologia è riportato in figura 9. Osserviamo che la banda originale viene suddivisa in tre sottobande quali  $f_0$ ,  $f_1$  e  $f_2$  dove ciascuna viene dedicata ad una singola trasmissione A, B e C.

Questo protocollo ha dei vantaggi quali l'assenza di sincronizzazione in quanto ogni trasmissione ha una frequenza dedicata con il conseguente uso dell'intera banda dedicata per la relativa trasmissione, la semplicità di implementarlo rispetto alle risorse hardware e software che possediamo, l'assenza di temporizzazione e di sincronizzazione dato che la trasmissione avviene su determinate frequenze di segnale, la riduzione dei costi e delle collisioni e la possibilità di includere delle bande di guardia per evitare interferenze multicanali.

Però anche questo protocollo ha degli svantaggi tra i quali si possono osservare l'inattività del canale se non vi è trasmissione, la riduzione della banda nei sottocanali rispetto a quella originale, il mantenimento di canali attivi anche se non vi è trasmissione con la conseguente riduzione della banda utilizzabile in quel determinato momento  $T$ , i maggiori costi per la strumentazione necessaria quale filtri passa banda per eliminare le interferenze, la staticità del bit rate all'interno dei singoli canali e la permanente frequenza dei sottocanali.

Tuttavia, l'ambiente marino soffre di un'attenuazione e di una distorsione del segnale maggiore rispetto all'ambiente terrestre e questo prende il nome di fading del segnale. Inoltre, questa tecnica di suddivisione del canale basandosi sulle frequenze del segnale portano alla definizione di più sottocanali di dimensione fissa con una larghezza di banda minore e un problema che deriva da esso è l'inflessibilità e l'inefficienza quando il traffico di rete è bursty. Per tali motivi il solo protocollo FDMA non è adatto alle reti sottomarine ma nei prossimi paragrafi discutiamo di un suo uso abbinato ad altri protocolli per renderlo maggiormente efficiente.

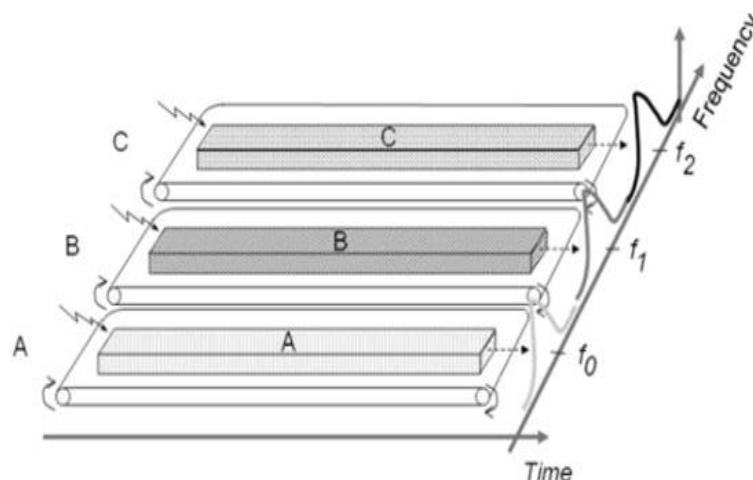


Figura 9: Esempio di FDMA

### 3.1.1.2. TDMA (Time Division Multiple Access)

Time Division Multiple Access (TDMA) è un protocollo basato su divisione del canale condiviso sfruttando il time slotting ossia la suddivisione del tempo in parti di durata equivalente dove ciascuna viene dedicata ad una trasmissione differente a cadenza periodica. Una conseguenza di tutto ciò è la discontinuità della trasmissione e l'obbligatorietà di una sincronizzazione continua.

La figura 10 riporta un esempio di questo protocollo. Notiamo che è presente un unico canale di trasmissione con l'intera larghezza di banda disponibile con frequenza  $f_0$ . Inoltre, sono presenti tre trasmissioni quali A, B e C dove queste vengono gestite a intervalli temporali su tale canale. Per questo motivo per poterle gestire è molto importante la sincronizzazione per includerle correttamente all'interno dei relativi slot temporali per evitare così le interferenze.

Alcuni vantaggi di questa tipologia sono:

- L'unica frequenza per la trasmissione;
- L'equità nella gestione degli slot temporali in relazione alle diverse trasmissioni;
- La possibilità di usare gli intervalli di guardia per evitare interferenze multicanali;
- Il supporto alle trasmissioni con velocità variabile in quanto all'interno di uno slot temporale si ha a disposizione l'intera banda del canale condiviso;
- È consentita la gestione dinamica dell'assegnazione degli slot temporali in relazione alla durata e alla frequenza.

Tuttavia, alcuni svantaggi includono:

- La discontinuità nella trasmissione in quanto un trasferimento di dati può essere contenuto in più slot di tempo in relazione alla quantità di dati da trasferire;
- La complessità della sincronizzazione con un elevato overhead e la relativa diminuzione della larghezza di banda per la trasmissione;
- L'obbligatorietà di attendere uno slot libero per la trasmissione e in caso tutti fossero occupati aspettare il primo disponibile;
- L'elevato ritardo di propagazione del segnale in ambito marino;
- La richiesta di potenze più elevate dovute al carico maggiore;

- Una elaborazione maggiore per la sincronizzazione delle trasmissioni.

Questa tipologia di protocollo in ambiente marino non è adatta per alcuni motivi, fra i quali la necessità di una sincronizzazione rigorosa in quanto la trasmissione può avvenire mediante molteplici slot di tempo e l'elevato ritardo di propagazione del segnale in ambiente marino. Di conseguenza con questo metodo occorre considerare la gestione della temporizzazione mediante l'invio di segnali periodici e una maggior dimensione degli intervalli di tempo dovuto all'elevato ritardo di propagazione del segnale. Tutto questo porta a lunghi periodi di tempo senza o con una minima trasmissione e una conseguente inefficienza di questo protocollo in ambiente marino. Per tali motivi il solo protocollo TDMA non è adatto alle reti sottomarine, tuttavia nei prossimi paragrafi discutiamo come può essere impiegato con un suo uso abbinato ad altri protocolli per renderlo maggiormente efficiente.

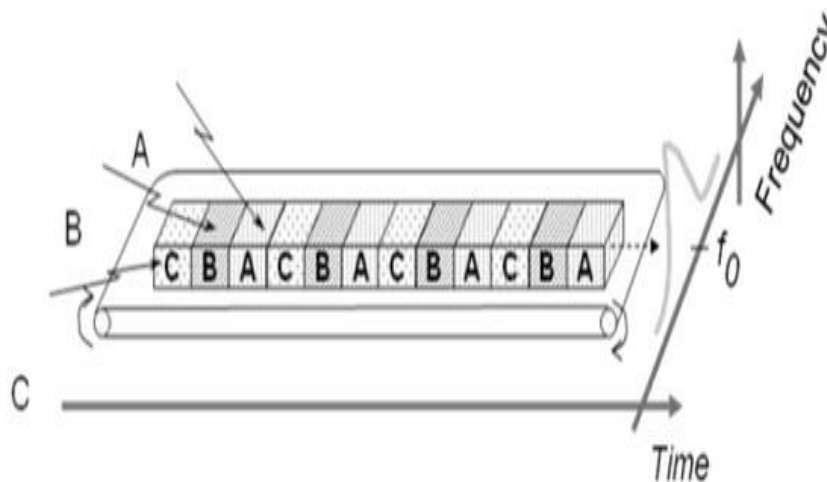


Figura 10: Esempio di TDMA

### 3.1.1.3. CDMA (Code Division Multiple Access)

Code Division Multiple Access (CDMA) è un protocollo basato su divisione del canale condiviso sfruttando la divisione della trasmissione mediante dei codici univoci che vengono assegnati ai trasmettitori dei relativi flussi di dati per la successiva identificazione ed elaborazione. Per questo motivo sono consentite più trasmissioni nello stesso canale condiviso sull'intera larghezza di banda disponibile in maniera continua senza suddivisione del contenuto da inviare in pacchetti.

Un esempio di questo protocollo è mostrato nella figura 11. Notiamo che il canale è unico per tutte le trasmissioni ed è accessibile mediante un'unica frequenza  $f_0$  ed inoltre tutti i sottocanali di trasmissione Channel1, Channel2, ..., ChannelN sono allocati nello stesso tempo  $t$  e sono identificabili mediante diversi codici assegnati ai relativi trasmettitori.



I vantaggi di questo protocollo includono:

- La maggior velocità di trasferimento e la maggior larghezza di banda rispetto a TDMA e FDMA;
- La maggiore disponibilità di banda nel canale di trasmissione;
- La continuità di trasmissione;
- La maggior sicurezza in quanto la trasmissione sul canale può essere violata solo conoscendo il codice relativo al determinato flusso che si vuole violare;
- I minori costi progettuali, implementativi e di gestione.

Però anche questo ha degli svantaggi che sono i seguenti:

- La difficoltà di sincronizzazione che è dovuta all'elaborazione del segnale per la decodifica del codice di identificazione di tale flusso di dati;
- Il maggior rumore in un ambiente con molteplici flussi in quanto quelli non appartenenti all'utente attuale provocano solamente interferenze;
- Il codice che deve essere deciso a priori in relazione all'intera infrastruttura di rete altrimenti provocherebbe ritardi e interferenze.

Tuttavia, questa tipologia di protocollo ha una vulnerabilità che consiste nel near-far problem. Questo, detto anche problema del vicino-lontano, è caratterizzato dall'uso di segnali di forte intensità anche per destinazioni vicine rendendo complesso per un ricevitore catturare i segnali con minore intensità perché provenienti da una distanza maggiore e attenuati in relazione alle caratteristiche dell'ambiente circostante come possono essere le correnti e le onde superficiali, i dispositivi avanzati e autonomi appartenenti alla rete, il movimento di eventuali navi nelle vicinanze ed infine eventuali estrazioni da giacimenti nel fondale marino.

Una soluzione è un algoritmo per il controllo della potenza con la conseguente riduzione dell'intensità del segnale in uscita in relazione alla distanza dalla destinazione in modo che si possa implementare un flusso di dati affidabile senza creare molteplici interferenze. Notiamo che la riduzione della potenza di uscita del segnale implica la riduzione del consumo energetico e questo è un punto essenziale per le reti sottomarine. Per tale motivo questo protocollo CDMA sembra essere una promettente tecnica di accesso multiplo al canale condiviso in ambiente marino.

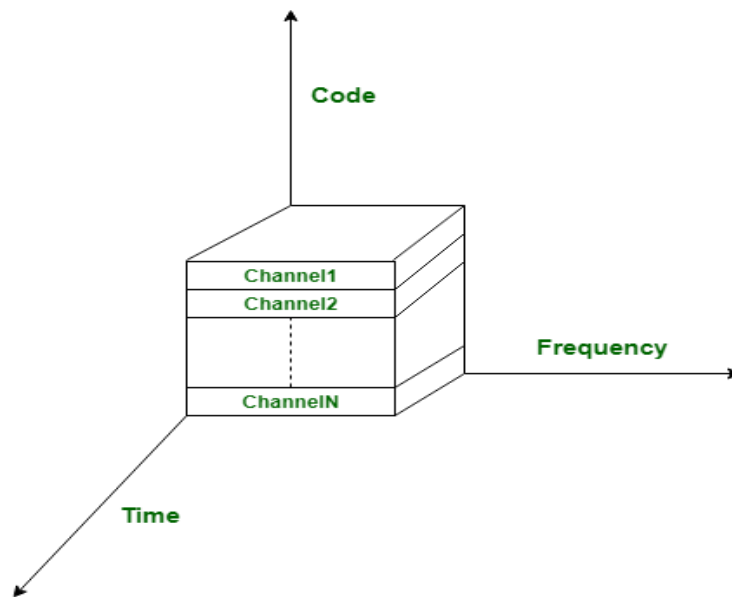


Figura 11: Esempio di CDMA

#### 3.1.1.4. SDMA (Space Division Multiple Access)

Space Division Multiple Access (SDMA) è un protocollo basato su divisione del canale condiviso mediante zone spaziali. Questo significa che l'area appartenente all'infrastruttura di rete viene suddivisa in sotto aree raggruppando gli elaboratori in varie zone in relazione alle loro posizioni.

L'idea chiave di questo protocollo consiste in un'associazione tra la zona e uno o più protocolli descritti nei paragrafi precedenti ovvero è caratterizzato da una prima suddivisione in sotto aree e la successiva scelta del metodo o dei metodi di divisione del canale condiviso per la comunicazione relative alle sotto aree che potrebbe essere basata sulla divisione di intervalli di tempo (TDMA), sulla divisione di frequenze (FDMA), sulla divisione di codice (CDMA) oppure simultaneamente alcuni di essi.

La figura 12 mostra un esempio di questo protocollo. Osserviamo che sono presenti molteplici canali, Channel 1, Channel 2, Channel 3, ..., Channel K dove ciascuno permette il collegamento delle relative aree alla stazione principale. Per questo motivo è importante implementare un metodo o più metodi di divisione del canale condiviso per poter permettere la trasmissione da queste aree.

Un primo esempio è l'implementazione della divisione del canale condiviso in intervalli di tempo (protocollo TDMA) e ciascuno associarlo ad un determinato canale per far sì che ciascuna area possa trasmettere diminuendo il carico complessivo del canale con la conseguente maggior larghezza di banda disponibile in quel momento.

Un ulteriore esempio è l'implementazione dei protocolli TDMA e FDMA allo stesso tempo ovvero ciascun canale presente nell'infrastruttura di rete trasmette su una frequenza diversa e ciascun elaboratore interno a quella relativa zona può trasmettere in alcuni determinati intervalli di tempo.

I vantaggi di questo protocollo sono:

- La dinamicità ovvero la possibilità di modifica del metodo o dei metodi di divisione del canale condiviso in relazione alla variazione degli obiettivi e dell'infrastruttura di rete;
- Il minor consumo energetico grazie alle ottimizzazioni dovute alla combinazione di vari metodi possibili di divisione del canale condiviso;
- L'uso massimo della larghezza di banda e della quantità di tempo in quanto è possibile strutturare il metodo di divisione del canale condiviso ottimizzandolo di volta in volta in relazione alla tipologia dell'infrastruttura di rete;
- La trasparenza della suddivisione delle aree rispetto al sistema in quanto i percorsi, i canali di trasmissione, la scelta delle aree e la relativa suddivisione è puramente ottica;
- Un possibile uso di antenne direzionali per avere una ottimizzazione del flusso del segnale.

Fra gli svantaggi di questo protocollo abbiamo:

- Il maggior costo progettuale ed implementativo;
- L'obbligo di mantenere le associazioni elaboratore-area con la conseguente difficoltà nel calcolo del percorso inverso ossia quello che va dall'elaboratore verso la stazione principale;
- La difficile e attenta analisi del carico dell'infrastruttura di rete per la successiva suddivisione in aree ben delimitate per l'ottimizzazione del flusso;
- L'obbligo di implementare altri protocolli per la suddivisione del canale condiviso.

Per tali motivi si può pensare l'infrastruttura di rete come un insieme di gruppi di elaboratori dove ciascun gruppo è collegato alla stazione principale mediante un elaboratore di riferimento. Una possibile conseguenza è una combinazione tra SDMA e CDMA che viene descritta nel documento [Hong 2006]. Questo nuovo protocollo definisce un'ulteriore tipologia di associazione ossia utente-spazio-tempo-codice. Di conseguenza è possibile definire una promettente tecnica di accesso multiplo al canale condiviso in ambito marino superando i limiti e le problematiche descritte nei paragrafi precedenti.

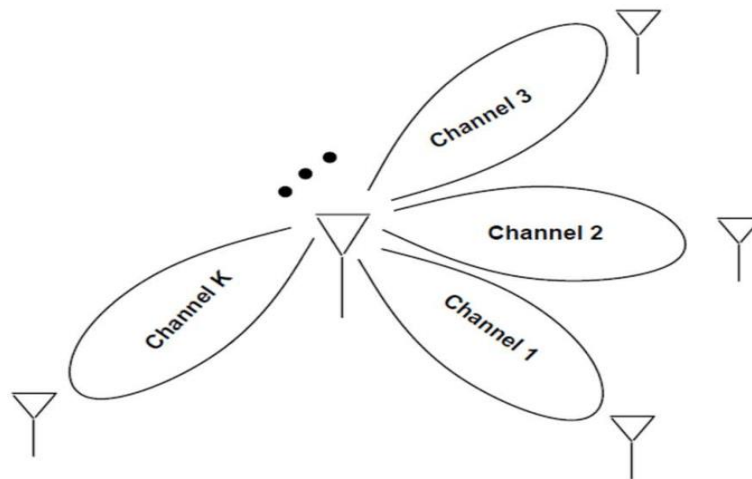


Figura 12: Esempio di SDMA

### 3.1.2. Protocolli ad accesso casuale

#### 3.1.2.1. Aloha

Aloha è un protocollo basato sull'accesso casuale del canale condiviso. La prima tipologia è caratterizzata dal Pure Aloha che funziona nel seguente modo ovvero nel momento che una stazione presente nel canale deve trasmettere un qualsiasi pacchetto lo invia senza chiedere un'eventuale autorizzazione e si mette in ascolto del canale stesso per confrontare il contenuto inviato con quello ricevuto per poterlo rinviare successivamente in caso si accorga di qualche collisione oppure se il destinatario non risponde con un pacchetto di Acknowledge (Ack).

Questo successivo rinvio del pacchetto avviene dopo aver aspettato un tempo casuale per far sì che la probabilità di collisioni successive sia minima e l'intero procedimento si ripete finché la trasmissione non termina con successo. Un'eventuale ottimizzazione di tutto ciò può essere l'uso della seconda tipologia ovvero lo Slotted Aloha con la suddivisione del tempo in intervalli di lunghezza pari al tempo richiesto per la trasmissione di un frame per far sì che l'invio di un nuovo pacchetto non possa avvenire in un qualunque momento ma all'inizio di un determinato slot. Questo permette così di aumentare in maniera considerevole il throughput massimo rispetto al protocollo Pure Aloha.

La figura 13 mostra un esempio con tre stazioni che trasmettono nello stesso canale condiviso. Il punto principale da analizzare è rappresentato dalle due collisioni. La prima è completa in quanto i pacchetti trasmessi si sovrappongono interamente e questo è un classico esempio di collisione nello Slotted Aloha in quanto ogni frame deve essere trasmesso all'interno di quel determinato intervallo e sia intervallo che frame hanno entrambi la stessa dimensione. La seconda invece rappresenta un esempio di collisione nel Pure Aloha con tempo continuo in quanto i pacchetti non si sovrappongono

interamente ma solamente nella parte finale. Una conseguenza in tutti e due i casi è una ritrasmissione o un ciclo di ritrasmissioni finché la comunicazione non avviene correttamente.

Tuttavia, questo protocollo ha alcuni svantaggi, tra i quali l'inefficienza nel traffico bursty in quanto il numero di collisioni e il numero di pacchetti da trasmettere in un determinato momento sono direttamente proporzionali. Questo problema accade perché maggiore è la quantità di pacchetti da trasmettere minore sarà la quantità di slot liberi per la trasmissione e questo porta ad un maggior numero di collisioni. Una conseguenza di tutto ciò è una serie continua di ritrasmissioni che portano ad un elevato consumo energetico.

Per tale motivo questo protocollo non è adatto alle reti sottomarine in quanto, come descritto nei paragrafi precedenti, l'infrastruttura di rete sottomarina soffre di problemi di ritardo di propagazione del segnale, della tipologia di segnale da usare e del risparmio energetico. Per tale motivo il protocollo Aloha con l'eventuale miglioramento applicando lo Slotted Aloha, non è adatto alle reti sottomarine. Nel prossimo paragrafo introduciamo una nuova tecnica maggiormente efficiente.

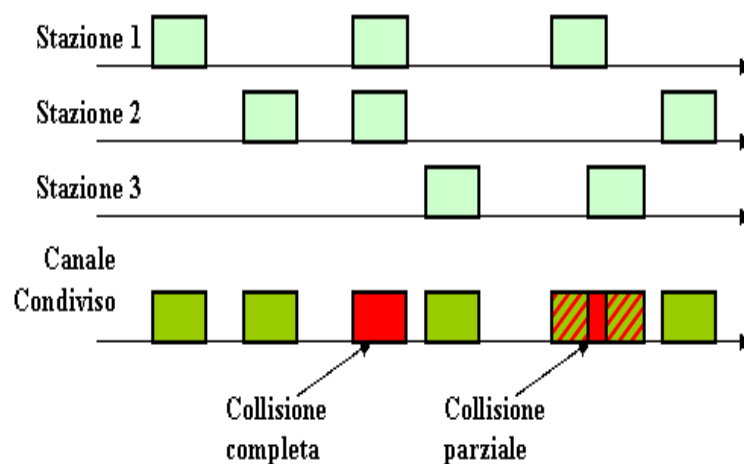


Figura 13: Esempio di Aloha

### 3.1.2.2. CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

Carrier Sense Multiple Access (CSMA) è un protocollo di accesso multiplo al canale condiviso mediante il rilevamento della portante. Questo significa che una stazione prima di trasmettere dei pacchetti si mette in ascolto del canale per vedere se quest'ultimo è libero o occupato e regolarsi di conseguenza.

I protocolli che implementano questa strategia si chiamano Carrier Sense e sono distinti in tre principali tipologie: 1-persistent, no-persistent e p-persistent.

La prima tipologia 1-persistent consiste nell'ascoltare il canale per vedere se quest'ultimo è libero e in caso lo sia inviare i pacchetti con probabilità 1, mentre se occupato aspettar finché lo è e poi trasmettere. Nel caso ci fossero delle collisioni la stazione che deve inviare dei pacchetti aspetta un tempo casuale e successivamente ripete l'intera procedura.

La seconda tipologia no-persistent consiste nell'ascoltare il canale per vedere se quest'ultimo è libero e in caso lo sia aspettare un tempo casuale e successivamente inviare il pacchetto mentre se occupato aspettare finché lo è e poi attendere un ulteriore tempo casuale e ripetere l'intera procedura.

La terza tipologia p-persistent si può applicare solamente su trasmissioni con canale slotted, ascolta il canale per vedere se quest'ultimo è libero e in caso lo sia inviare i pacchetti con probabilità  $p$  ( $p \leq 1$ ) nello slot attuale mentre con probabilità  $1-p$  aspettar quello successivo anche se il canale è libero e ripetere l'intera procedura, mentre se il canale è occupato aspettar lo slot successivo e ripetere l'intera procedura.

Il minor numero di collisioni anche se caratterizzato da un ritardo maggior dovuto ad eventuali ritrasmissioni porta ad un throughput maggiore. Questo protocollo ha un ulteriore svantaggio quando due stazioni vogliono inviare dei pacchetti nello stesso momento quando ascoltano il canale questo risulta libero perché non viene rilevata la trasmissione di un'ulteriore stazione fuori range creando una collisione, oppure risulta occupato su trasmissioni che non si ostacolerebbero a vicenda portando ritardi nelle trasmissioni. Questi prendono il nome di problema del terminale nascosto e problema del terminale esposto.

Per questi motivi sono state implementate due correzioni che sono il CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection) e il CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance) e queste sono state descritte nel documento [Sozer 2000].

Il primo consiste nell'interrompere la trasmissione non appena che le stazioni rilevano una collisione. Questo è permesso mediante l'operazione di Collision Detection con la quale la stazione che vuole trasmettere si mette in ascolto del suo stesso segnale trasmesso per far sì che se rileva una differenza rileva la collisione. Questo perché la rilevazione di una collisione è un processo analogico in quanto l'unica operazione necessaria è vedere la differenza di potenza tra i due segnali quali quello inviato e quello ricevuto. Successivamente dopo la rilevazione di una collisione viene inviato un jam signal per avvertire anche le altre stazioni di interrompere eventuali trasmissioni perché compromesse.

Mentre la seconda tipologia di ottimizzazione consiste nell'inclusione di due ulteriori pacchetti per effettuare la trasmissione ovvero un pacchetto RTS (Request To Send) ed uno CTS (Clear To Send).

Questa tecnica funziona nel seguente modo ovvero quando una stazione vuole iniziare una trasmissione invia un pacchetto RTS per effettuare la richiesta di trasmissione alla stazione destinataria inviando in allegato anche la dimensione del pacchetto da inviare successivamente. Quando la stazione destinataria riceve questo pacchetto e non ci sono altre trasmissioni in corso risponde con un CTS per far iniziare la trasmissione. Le altre stazioni che vorrebbero trasmettere ricevono anche loro le richieste RTS presenti all'interno della rete e per questo fanno differire le loro trasmissioni per quella lunghezza di dati per far sì che non ci siano collisioni. Inoltre, un altro caso particolare consiste in una stazione che riceve il pacchetto RTS ma non il CTS e per questo motivo può trasmettere in contemporanea in quanto è fuori della portata del ricevitore. Per tali motivi questa ottimizzazione risolve entrambi i problemi di nodi nascosti e nodi esposti.

Un'ulteriore ottimizzazione è implementabile sfruttando un algoritmo per il controllo automatico della potenza ovvero ciascun nodo deve conoscere il livello minimo di potenza per raggiungere le altre stazioni in maniera efficiente senza errori. Di conseguenza osserviamo la possibilità di molteplici trasmissioni nello stesso momento, in quanto viene limitata la potenza del segnale di uscita ad un livello estremamente limitato che non sarà ascoltato dall'intera infrastruttura di rete ma da una parte limitata che corrisponde ai nodi appartenenti al percorso tra la stazione mittente e la stazione destinataria. Per tali motivi lo scambio di RTS e CTS ulteriori per stabilire le trasmissioni occupano un elevato overhead ma tutto questo è bilanciato da un minor numero di ritrasmissioni dovute alle minori collisioni. Di conseguenza è possibile usare questa ottimizzazione in ambito marino.

### **3.1.3.ARQ (Automatic Repeat Request)**

Come abbiamo discusso nei paragrafi precedenti le reti sottomarine sono soggette ad alcuni punti critici caratteristici dell'ambiente marino, quali la propagazione multipath, il maggior rumore e la forte attenuazione del segnale. Per tali motivi si osserva un canale di comunicazione con scarse prestazioni e un bit error rate importante ovvero un elevato rapporto tra i bit ricevuti in maniera errata e quelli ricevuti in maniera corretta.

Per tale motivo si possono implementare tecniche ARQ (Automatic Repeat Request) per stabilire un canale di comunicazione sicuro ed efficiente, per far sì che i pacchetti ricevuti in maniera errata possano essere ritrasmessi finché la trasmissione non termina senza errori. Queste tecniche consistono nell'implementazione di due ulteriori pacchetti di comunicazione quali ACK (acknowledgment) e NACK (not acknowledgment) per comunicare al mittente l'esito della trasmissione. Di conseguenza quando una stazione destinataria riceve un pacchetto deve verificare la sua integrità e questo è possibile mediante una tecnica di controllo degli errori, quali spesso un codice di controllo chiamato CRC (cyclic redundancy check) presente al suo interno. Se questa

operazione termina con successo allora la stazione destinataria risponderà con un ACK altrimenti con un NACK per effettuare la ritrasmissione.

Un ulteriore problema si può verificare quando la stazione mittente è in attesa di ricevere una risposta con l'esito della trasmissione e non lo riceve per problemi di interferenza al canale di comunicazione, una possibile soluzione consiste nell'implementazione di un controllo di ricezione basato su un time-out e ritrasmettere alla scadenza del timer.

Tuttavia, implementando un time-out è possibile che una stazione destinataria riceva molteplici copie dello stesso pacchetto e per risolvere il problema dei duplicati si usa la numerazione dei pacchetti per distinguerli ed eventualmente scartarli. Nell'implementazione nella stazione mittente si usa una coda di trasmissione che memorizza le copie dei pacchetti inviati per poterli ritrasmettere successivamente quando richiesti. Si possono osservare, sempre dallo stesso documento sopra citato, tre tecniche ARQ (Automatic Repeat reQuest) che rappresentano delle strategie di controllo degli errori per poter così scartare i pacchetti corrotti e richiederne un'eventuale ritrasmissione e questi sono: Stop and Wait, Go Back N and Selective Repeat.

Il protocollo Stop and Wait è quello più semplice ovvero il mittente invia un pacchetto e aspetta un'esplicita autorizzazione da parte del destinatario prima di inviare il successivo. Questo porta a continui blocchi del mittente ovvero ogni volta che il mittente invia un pacchetto si mette in ascolto della risposta del destinatario per capire se scartare il pacchetto attuale e inviare il successivo oppure ritrasmetterlo in relazione alla risposta del destinatario. Inoltre, questo protocollo è caratterizzato anche da un format invio-risposta per ogni pacchetto e dati gli elevati ritardi di propagazione del segnale in ambito marino il canale di trasmissione rimane libero per lunghi intervalli di tempo e una conseguenza di tutto ciò è una bassa efficienza e un basso throughput.

Un'ottimizzazione consiste in un invio di un certo numero di pacchetti anche se il mittente non ne ha ricevuto uno di ack o nack per poter così diminuire il tempo di inattività del canale di trasmissione per aumentarne l'efficienza e questa strategia rappresenta il principio di funzionamento dei protocolli a finestra scorrevole. In quest'ultimi una figura importante è la finestra con la relativa dimensione N in quanto quest'ultima rappresenta il buffer che può memorizzare fino ad N pacchetti che il mittente può inviare al destinatario senza aspettare di ricevere un pacchetto di conferma o di ritrasmissione. Il passo fondamentale consiste nella numerazione dei pacchetti per far sì che siano identificabili univocamente per poterli scartare se ricevuti correttamente o ritrasmetterli se ricevuti in maniera errata ed infatti i pacchetti aggiuntivi di ack e nack contengono l'identificativo del pacchetto a cui quest'ultimi sono riferiti.

Si usano tre tipi di pacchetti di Acknowledge: l'ack selettivo, l'ack cumulativo e l'ack negativo. Quello selettivo consiste nella conferma del singolo pacchetto ricevuto correttamente da parte del



destinatario ed un'eventuale ottimizzazione è quello cumulativo in quanto quest'ultimo conferma al mittente di aver ricevuto correttamente fino al n-esimo pacchetto per diminuire così il numero di pacchetti da inviare nel canale di comunicazione. Infine, c'è quello negativo che consiste nell'inviare al mittente la necessità di ritrasmissione di un pacchetto specifico perché ricevuto in maniera errata. Un'ulteriore ottimizzazione consiste nell'implementazione del piggybacking ovvero l'inserimento del pacchetto di ack all'interno di un altro che viaggia verso la stazione mittente per ridurre il numero di pacchetti inviati.

Questo metodo è utilizzato anche nel protocollo Go Back N caratterizzato da una finestra di dimensione N nel mittente per memorizzare gli N pacchetti inviati al destinatario. Nel destinatario la finestra è di una posizione per accettare soltanto un pacchetto alla volta in quanto ciascuno contiene l'identificativo univoco per verificare che l'ordine di arrivo sia corretto. Il protocollo differenzia tre casi: pacchetto di ACK, pacchetto di NACK ed infine il time-out.

Nel primo caso quando il mittente riceve un ACK da parte del destinatario verifica che quest'ultimo sia relativo al pacchetto che occupa l'estremo inferiore della finestra con la successiva cancellazione dal buffer e lo scorrimento della finestra di una posizione per inviare il pacchetto successivo al destinatario. Un'ulteriore ottimizzazione potrebbe essere l'uso di ack cumulativi e di conseguenza l'eliminazione di K pacchetti dal buffer e lo scorrimento della finestra di K posizioni per il successivo invio di K nuovi pacchetti.

Nel secondo e terzo caso quando il mittente riceve un NACK perché ha ricevuto un pacchetto compromesso oppure il time-out relativo ad un pacchetto termina avviene la ritrasmissione dei pacchetti inviati a partire dal successivo di cui il mittente ha avuto l'ultimo riscontro positivo da parte del destinatario. Tuttavia, questa tecnica può inviare molteplici copie dello stesso pacchetto al destinatario quando il relativo pacchetto di ACK non arriva al mittente per problemi di comunicazione oppure quando il relativo time-out termina.

Un altro protocollo Selective Repeat può essere considerato un'ottimizzazione del protocollo Go Back N. Tuttavia, per poterlo implementare bisogna aggiungere un'ulteriore finestra di N posizioni nel destinatario e questo perché la principale differenza dal protocollo Go Back N consiste nella ritrasmissione dei soli pacchetti arrivati o in maniera errata con il pacchetto di NACK come riscontro da parte del destinatario oppure senza riscontro alla scadenza del relativo time-out. Di conseguenza occorre numerare i pacchetti per poterli ordinare successivamente nel buffer del destinatario dopo le eventuali ritrasmissioni relative ai pacchetti arrivati in maniera errata.

### 3.1.4.FEC (Forward Error Correction)

Come è stato illustrato nel documento [Shengming 2018] non sempre è possibile o conveniente effettuare la continua ritrasmissione dei pacchetti e per evitarla si può utilizzare la FEC ovvero la correzione degli errori contenuti nei pacchetti arrivati in maniera errata al destinatario senza dover ritrasmettere il pacchetto. Questo metodo molto comune consiste, alla ricezione del pacchetto di controllare e possibilmente correggere eventuali errori.

Il metodo si basa sulla ridondanza del contenuto per permetterne sia la rilevazione e sia l'eventuale correzione. Però fornire ridondanza significa aumentare la dimensione di tali pacchetti e di conseguenza una possibile diminuzione della larghezza di banda disponibile in quel determinato momento, un maggior consumo energetico dovuto alla fase di codifica e di decodifica del pacchetto per calcolarne l'intestazione aggiuntiva di controllo ed infine un minor throughput.

Per decidere quale tecnica di correzione degli errori applicare nell'infrastruttura di rete bisogna identificare le caratteristiche dell'ambiente circostante e valutare se è più efficiente la ritrasmissione dei pacchetti o l'elaborazione e correzione del contenuto. Nel primo caso si occupa un'ulteriore banda del canale per le eventuali ritrasmissioni, mentre nel secondo caso si occupano per un certo tempo le risorse necessarie nella stazione destinataria per gli eventuali controlli e correzioni. Però bisogna prendere in considerazione anche che le strategie di rilevamento dell'errore sono più semplici da implementare e gestire rispetto a quelle di error correction.

Le strategie di correzione degli errori si basano sull'implementazione e uso dei codici di correzione degli errori (Error Correction Code ECC). Questi si suddividono principalmente in due tipologie, tra le quali si possono osservare a livello di bit oppure a livello di pacchetto.

I primi consistono nella suddivisione del flusso dei dati da inviare alla stazione destinataria in blocchi di bit dove a ciascuno di essi viene aggiunto un'ulteriore intestazione di controllo e correzione includendo bit ridondanti e maggiore è la consistenza di quest'ultima parte maggiore sarà la possibilità di correzione dei dati errati. Questi si possono suddividere in codici lineari e non lineari e i primi a loro volta in ripetizione, parità, Hamming e ciclici. Alcuni esempi, sempre descritti nello stesso documento, sono i seguenti quali il codice RS (Reed, Solomon), il codice BCH (Bose, Ray Chauduri, Hocquengem), il codice di Hamming, il codice LDPC (low density parity check), il codice di ripetizione, il codice CRC (Cyclic redundancy check) ed i codici convoluzionali molto più complessi dei precedenti perché consistono nell'applicazione in serie di molteplici funzioni per restituire in output un risultato non solo in relazione all'input ma anche allo stato del sistema, come un esempio il codice di Viterbi.

La seconda tipologia consiste nell'implementazione della FEC a livello di pacchetto e questo significa che il messaggio originale da inviare alla stazione destinataria viene suddiviso in  $k$  gruppi di  $n$  pacchetti dove in ciascun raggruppamento vengono inseriti  $m$  pacchetti ridondanti per le relative correzioni. In questa maniera la stazione destinataria dovrebbe ricevere per ogni gruppo  $n+m$  pacchetti nel caso migliore mentre nel caso medio almeno  $n$  per poterne effettuare la ricostruzione del contenuto errato. Tuttavia, nel caso peggiore la stazione destinataria potrebbe ricevere meno di  $n$  pacchetti e in queste condizioni non è possibile la ricostruzione e l'unica soluzione è la ritrasmissione.

Alcuni esempi di questa tipologia di codice di correzione degli errori sono i seguenti: il codice tornado che è caratterizzato da un data rate costante e per questo non efficiente nei canali con flussi dinamici e i codici fontana realizzabili mediante semplici operazioni XOR e più efficienti perché caratterizzati da un numero variabile di pacchetti ridondanti per far sì che non ci sia un loro limite teorico, per poter così inviarli fino a quando il contenuto errato non è completamente corretto. Per questo motivo questo metodo è adatto ai molteplici tassi d'errore presenti nel canale di comunicazione delle reti di sensori in ambito marino perché notevolmente dinamico e caratterizzato dal movimento dei nodi, dalla dissolvenza del segnale, dall'effetto doppler, dalla trasmissione multipath, dall'elevato ritardo di propagazione e dal rumore.

Non sempre è possibile applicare la correzione dei pacchetti, in quanto le tecniche FEC riescono a trovare soltanto un numero limitato di errori. Per questo motivo un'eventuale ottimizzazione si basa su una tecnologia ibrida denominata Hybrid ARQ o HARQ per implementare strategie ARQ e FEC allo stesso tempo.

Sono definite due tipologie di tecnologie ibride. La prima consiste nell'inviare i pacchetti al destinatario aggiungendo l'istestazione di controllo completa ovvero sia per il controllo che per la correzione di eventuali errori da parte del destinatario, mentre la seconda tipologia consiste nell'inviare i dati con un'istestazione di controllo parziale ovvero senza la possibilità di correzione degli errori. Questa parte mancante è richiesta mediante protocollo ARQ quando il destinatario controllando il contenuto del pacchetto rileva degli errori limitando così l'occupazione della larghezza di banda.

Quest'ultima tipologia consiste in un abbinamento tra i protocolli ARQ e FEC e può svolgere operazioni sia di controllo e di correzione che di eventuale ritrasmissione e per tale motivo è caratterizzata da un'elevata ridondanza dei dati, in quanto la diminuzione delle ritrasmissioni è direttamente proporzionale alla larghezza di banda usata nel canale. Questo significa che maggiori sono le ritrasmissioni maggiore è la larghezza di banda usata e di conseguenza maggiore è il consumo energetico dell'infrastruttura di rete ed essendo in ambito marino quest'ultimo va sempre

limitato. Questo è dovuto principalmente alle caratteristiche dei singoli protocolli ovvero ha ereditato un canale di feedback dal protocollo ARQ e un'intestazione di controllo e correzione dal protocollo FEC.

Tuttavia, per poter implementare quest'ultima tecnologia ibrida e per avere un'ottimizzazione dell'efficienza del canale e della larghezza di banda utilizzata servono algoritmi di codifica e decodifica di elevata complessità in quanto bisogna determinare eventuali soglie d'errore e di banda utilizzata per poter usare tecniche ARQ o FEC.

## **3.2. Protocolli di routing**

Nel paragrafo precedente abbiamo trattato i dettagli dell'accesso al canale condiviso in ambito marino e trattiamo ora i suoi protocolli di instradamento. Si suddividono principalmente in due tipologie basate sulla disponibilità delle informazioni sulla posizione delle componenti dell'infrastruttura di rete descritte nel paragrafo 1.2, tra le quali si possono osservare i nodi, gli AUV e i ROV.

Occorre considerare il problema dovuto alla difficoltà di ottenere ed aggiornare le informazioni in quanto l'ambiente marino è caratterizzato da un'elevata dinamicità e mobilità dei nodi dovuto alle correnti marine, ai moti ondosi, agli eventi atmosferici ed infine al passaggio di eventuali imbarcazioni. I protocolli si suddividono in quelli senza e quelli con la localizzazione.

Inoltre, gli algoritmi di routing in ambito marino, come descritto nei documenti [Ahmed 2016] e [Mateen 2019], si possono ulteriormente suddividere in cinque tipologie che includono quelli basati su vettore (vector based), su profondità (depth based), su cluster (clustered based), sugli AUV (AUV based) ed infine quelli basati su percorso (path based).

Trattiamo ora tutti i dettagli, le caratteristiche, i vantaggi e gli svantaggi seguendo le suddivisioni definite nel paragrafo precedente.

### **3.2.1. Protocolli localization free**

Questa prima tipologia di protocolli di routing non richiede le informazioni sulla posizione geografica rispetto ad un piano bidimensionale o tridimensionale ma si basa principalmente sui dati raccolti da alcuni sensori che possono essere quelli di pressione e di profondità installati nei nodi.

La caratteristica principale di questa tipologia è l'uso della profondità per prendere le decisioni di instradamento come costruzione e scelta del percorso, che determina un'elevata scalabilità dell'intera infrastruttura di rete. Questa tipologia di protocolli di routing effettua un allagamento

controllato perché caratterizzato dalla sola informazione della profondità e per questo la trasmissione da una stazione ad un'altra avviene mediante calcolo di appartenenza ad un determinato range di distanza dalla stazione mittente, ma di conseguenza un maggior consumo energetico dovuto all'elevata ridondanza dei dati presente nella rete.

Nonostante questo svantaggio la tipologia di protocolli senza la localizzazione rappresenta la scelta più frequente nell'implementazione dei protocolli di routing all'interno di un'infrastruttura di rete molto vasta in ambito marino, in quanto dimostrano un'importante efficienza e fattibilità nell'elevata dinamicità dovuta al movimento dei nodi e alla dissolvenza del segnale, all'effetto doppler dovuto al segnale acustico in ambito marino.

Inoltre, un'ulteriore ottimizzazione si basa sulla conoscenza di ciascun nodo, delle relative caratteristiche come la profondità e la pressione anche dei nodi vicini per avere così un allagamento limitato verso la zona della stazione destinataria per ridurre così anche il consumo energetico, l'occupazione di ulteriore banda del canale di trasmissione e l'uso delle risorse elaborative.

### **3.2.2. Protocolli localization based**

Questa seconda tipologia di protocolli di routing invece richiede le informazioni sulla posizione geografica rispetto ad un piano bidimensionale o tridimensionale perché calcola tutti i possibili percorsi tra la stazione mittente e quella destinataria, le distanze tra i nodi e le traiettorie di instradamento.

Una tecnica più avanzata che usa la localizzazione considera l'ulteriore inclusione della profondità per poter creare così percorsi di instradamento che partono dal fondo ed arrivano in superficie o viceversa. Solo dopo aver calcolato tutti i possibili percorsi si determina quello ottimale in relazione al consumo energetico, al tasso d'errore, alla larghezza di banda occupata in quel determinato ramo ed infine alla velocità di trasferimento.

### **3.2.3. Protocolli vector based**

Questa tipologia di protocolli di routing consiste nell'implementazione ed uso di un vettore di instradamento tra la stazione mittente e la stazione destinataria. Si può immaginare il percorso di instradamento tra le due stazioni come una linea retta che simula il canale che le congiunge e mediante la larghezza di esso si determinano le stazioni intermedie che ne fanno parte, in quanto devono essere all'interno o vicine ad esso per poter essere usate come ulteriori nodi di trasferimento parziale.

Alla ricezione di un pacchetto da parte di una stazione intermedia si effettua una stima della distanza dal vettore di instradamento e questa ne determina il loro possibile uso come ulteriore inoltro dei pacchetti verso la direzione della stazione destinataria, oppure, nel caso fossero troppo lontane, il pacchetto ricevuto scartato dalla stazione attuale.

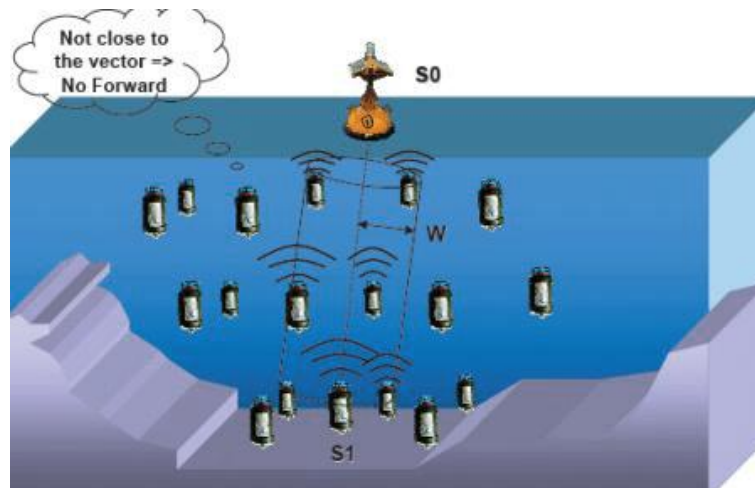


Figura 14: Esempio di protocollo vector based

Un primo esempio di questa tipologia è illustrato nella figura 14 dove osserviamo le due stazioni S0 ed S1, un trasferimento in corso dalla stazione S1 verso la stazione S0 ed un canale di comunicazione di larghezza W. Inoltre, notiamo le stazioni che riescono ad effettuare un trasferimento parziale verso la direzione della stazione destinataria che è permesso per la loro vicinanza rispetto al canale di comunicazione di larghezza w.

Un'ottimizzazione del protocollo si può osservare applicando questa strategia in un'infrastruttura di rete poco densa, al fine di evitare un sovraccarico di quest'ultima con un ulteriore consumo energetico che deve essere limitato il più possibile in ambito marino. Consideriamo ora alcuni esempi di protocolli vector based.

### 3.2.3.1. Protocollo VBF (Vector Based Forwarding)

Questo primo protocollo di routing rappresenta la versione principale di questa tipologia di protocolli come descritti nel paragrafo precedente, ovvero basati sulla costruzione di un canale di comunicazione sotto forma di un vettore tra la stazione mittente e quella destinataria. Alla ricezione di un pacchetto da parte di una determinata stazione viene elaborata la distanza dal vettore di instradamento per determinare se è possibile inoltrare nuovamente il pacchetto alle altre stazioni successive oppure nel caso sia troppo lontana si scarta.

Si osserva che non conviene usarlo né in reti troppo dense, in quanto i trasferimenti di pacchetti crescono esponenzialmente con un maggior consumo energetico, né in reti con un numero di nodi

estremamente basso, in quanto quelli non appartenenti al vettore di instradamento non vengono usati come stazioni intermedie e in tali stazioni il pacchetto ricevuto viene scartato.

Di conseguenza sono state implementate ulteriori ottimizzazioni di questo protocollo: HH-VBF, ES-VBF e C-VBF e queste si possono osservare qui di seguito.

### **3.2.3.2. Protocollo HH-VBF (Hop by Hop Vector Based Forwarding)**

Questa prima ottimizzazione del protocollo VBF consiste nell'implementazione di molteplici vettori di instradamento verso la stazione destinataria. Questo meccanismo funziona nel seguente modo: inizialmente viene definito un unico vettore dalla stazione mittente alla stazione destinataria. Successivamente, quando il pacchetto viene inviato verso il destinatario, quest'ultimo viene ricevuto dalle stazioni intermedie appartenenti al canale iniziale, ma queste stazioni a loro volta definiscono dei nuovi vettori di instradamento verso il nodo destinatario e questo prosegue finché il pacchetto non arriva a destinazione.

Questa ottimizzazione risolve i problemi del protocollo originale utilizzando molteplici percorsi virtuali tra la stazione mittente e quella destinataria, ma questa strategia ha bisogno di un continuo ricalcolo per ciascun nodo per determinare il relativo vettore di instradamento verso la stazione destinataria. Questo comporta un maggior consumo di risorse elaborative ed energetico e di conseguenza un minor throughput della rete.

### **3.2.3.3. Protocollo ES-VBF (Energy Saving Vector Based Forwarding)**

Un ulteriore problema del protocollo VBF consiste in un consumo energetico non uniforme perché questo protocollo prende in considerazione solamente un dato ovvero la sola posizione geografica di ciascun nodo rispetto al vettore di instradamento.

Una conseguenza è un criterio di priorità di posizione, ovvero in fase di routing del pacchetto da parte di una stazione viene elaborata la sola posizione e quindi se tutti i pacchetti viaggiassero dalla stessa stazione mittente verso la stessa stazione destinataria si avrebbe un elevato consumo energetico nelle stesse identiche stazioni e questo, con il passare del tempo, può esaurire l'energia in un'area particolare della rete causandone possibili errori di instradamento ed eventuali blocchi.

Per superare questo problema è stata proposta un'ulteriore ottimizzazione del protocollo VBF che introduce un nuovo valore per ciascun nodo che corrisponde alla relazione tra la posizione geografica rispetto al vettore di instradamento e il livello energetico per un conseguente consumo energetico equilibrato.

### **3.2.3.4. Protocollo C-VBF (Cluster Vector Based Forwarding)**

Questa ulteriore ottimizzazione del protocollo VBF consiste nella suddivisione in molteplici gruppi di tutte le stazioni presenti nell'intera infrastruttura di rete mediante la stessa zona geografica elaborando i dati raccolti dai sensori installati nei relativi nodi. Di conseguenza si possono differenziare i nodi presenti per ciascun raggruppamento suddividendoli in due tipologie principali, le stazioni sink e le stazioni member.

La differenza principale consiste che le prime sono di maggior importanza permettendo la comunicazione intergruppo sfruttando un collegamento mediante un vettore di instradamento verso gli altri nodi sink dei relativi raggruppamenti, mentre i secondi consistono in delle stazioni base appartenenti al singolo gruppo e comunicanti solamente con il nodo sink del medesimo gruppo.

Anche se questa rappresenta una buona strategia progettuale e implementativa, la gestione di molteplici cluster e vettori di instradamento in ambito marino non è semplice, in quanto la caratteristica principale di questo ambiente consiste nella dinamicità dei nodi e la conseguente possibile variazione nel tempo dell'intera topologia dell'infrastruttura di rete creando così nuovi collegamenti ed eliminandone altri.

### **3.2.4. Protocolli depth based**

Questa quarta tipologia di protocolli di routing in ambito sottomarino consiste nell'implementazione del canale di trasmissione tra la stazione mittente e quella destinataria sfruttando la profondità di ciascun nodo per calcolarne successivamente il percorso ottimale.

Questo è permesso mediante i sensori di profondità e di pressione installati in ciascun nodo. Per decidere quali stazioni includere come nodi intermedi nel canale trasmissivo bisogna prendere in considerazione il livello di profondità compreso tra quello della stazione mittente e quello della stazione destinataria.

Inoltre, sono possibili due ulteriori ottimizzazioni. La prima consiste nell'implementazione per ciascun nodo di una lista di mantenimento di copie dei pacchetti inviati per evitare eventuali inoltri ridondanti in fase di ricezione di ulteriori pacchetti, per aver così un minor consumo energetico e una minore larghezza di banda del canale usata. La seconda consiste nella gestione di un ulteriore dato oltre alla profondità che consiste nel livello energetico di ciascun nodo e questo serve per poterli differenziare per priorità in fase di scelta della prossima stazione intermedia.



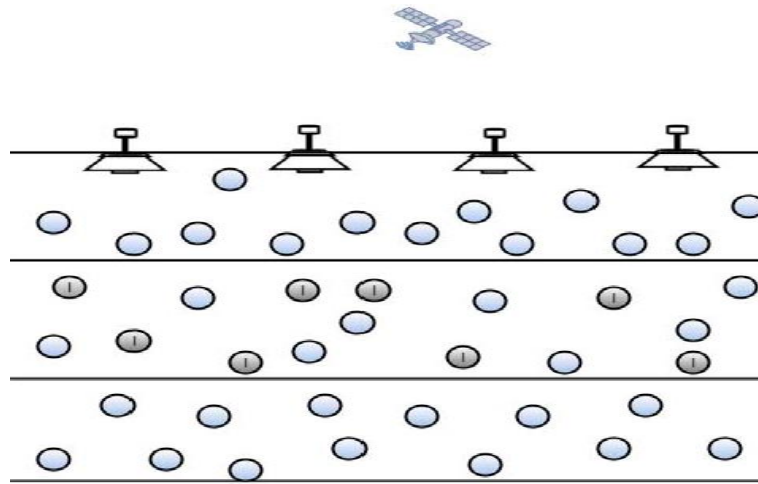


Figura 15: Esempio di protocollo depth based

La figura 15 illustra un esempio di questa tipologia di protocollo di routing dove i nodi dell'infrastruttura di rete sono suddivisi in livelli determinati mediante l'analisi dei dati inerenti alla profondità raccolti dai sensori. Un ulteriore dettaglio è che la comunicazione con le stazioni offshore dedicate alle diverse aree è caratterizzata da una possibile comunicazione dal fondo del mare verso la superficie e quindi diventa di elevata importanza la decisione delle stazioni a cui inoltrare i pacchetti. Di seguito presentiamo alcuni esempi di protocolli di questa tipologia.

### 3.2.4.1. Protocollo DBR (Depth Based Routing)

Questo primo protocollo di questa tipologia rappresenta il modello principale in quanto consiste nell'implementazione del canale di comunicazione tra la stazione mittente e quella destinataria mediante la profondità che viene gestita da un sensore installato in ciascun nodo e quest'ultima informazione viene allegata in qualsiasi pacchetto che tale nodo inoltra e questo per poter ricostruire successivamente l'intero percorso.

Di conseguenza le stazioni intermedie vengono calcolate sfruttando la differenza tra le profondità della stazione mittente e quella destinataria, infatti, il percorso che il pacchetto effettua è una trasmissione verticale come, ad esempio, dalla profondità verso la superficie o viceversa.

Tuttavia, questo protocollo ha uno svantaggio principale perché bisogna gestire eventuali copie dei pacchetti inviati per non avere ridondanze, ma questo implica un maggior memorizzazione per ciascun nodo. Per tale motivo sono state implementate alcune ottimizzazioni.

### **3.2.4.2. Protocollo EE-DBR (Energy Efficient Depth Based Routing)**

Questa prima ottimizzazione del protocollo DBR consiste in una nuova versione per risolvere il problema dell'energia residua di ciascun componente dell'infrastruttura di rete permesso da un'ulteriore caratteristica per la scelta delle stazioni intermedie in fase di inoltramento del pacchetto.

Questa strategia è costituita da due fasi principali: l'identificazione dei nodi vicini e la gestione dell'inoltramento del pacchetto. La prima fase consiste in un pacchetto hello che viene scambiato tra ciascun nodo con le relative stazioni adiacenti per poter così memorizzare le loro informazioni quali l'identificativo, la profondità e il livello di energia residua. La seconda fase consiste in una schedulazione con priorità per ciascun nodo dei relativi vicini e questo serve per poter scegliere di conseguenza le stazioni intermedie idonee per poter così avere un consumo energetico bilanciato ed equilibrato dell'intera infrastruttura di rete.

Tuttavia, la strategia di gestione energetica non è ancora ben definita in un'area con bassa densità e per tale motivo questa rappresenta ancora una sfida aperta.

### **3.2.4.3. Protocollo D-DBR (Directional Depth Based Routing)**

Questa ottimizzazione del protocollo DBR consiste nell'implementazione della comunicazione tra la stazione mittente e la stazione destinataria suddividendo i nodi intermedi in due tipologie, tra le quali si possono osservare quelli sink e quelli base. I primi solitamente vengono predisposti vicini alla superficie mentre i secondi vengono lasciati in profondità suddivisi per livelli mediante la gestione del sensore installato in ciascuno. Successivamente quando una stazione deve comunicare avviene una trasmissione verticale ovvero da una maggior profondità verso la superficie e questo mediante un percorso ottimale calcolato mediante il minor numero di hop, minor tempo di propagazione ed infine mediante un angolo theta per un allargamento controllato molto limitato e una conseguenza è la possibilità di osservare una figura geometrica della trasmissione a forma di cono.

Tuttavia, anche questo protocollo ha uno svantaggio che consiste negli spazi vuoti ovvero in quelle regioni dove le componenti dell'infrastruttura di rete sono molto sparse e i nodi non sono contenuti nel cono di trasmissione. Di conseguenza in questa tipologia di scenario si osserva una significativa riduzione del tasso di trasmissione e quindi riduzioni di prestazioni.

### **3.2.4.4. Protocollo DS-DBR (Delay Sensitive Depth Based Routing)**

Questa ottimizzazione del protocollo DBR consiste nell'implementazione della comunicazione tra la stazione mittente e la stazione destinataria mediante la relazione di alcuni parametri quali possono

essere la profondità, il tempo di mantenimento dei pacchetti, la soglia di profondità ed infine un range di trasmissione.

Il protocollo, in quanto ottimizzazione del protocollo DBR che è basato sulla profondità, consiste nella costruzione ed implementazione di una comunicazione verticale tra le due stazioni. Infatti quando una stazione vuole trasmettere dei pacchetti li invierà ai nodi a lei vicini, ma quest'ultimi a loro volta in fase di ricezione controllano la loro profondità e la loro distanza con i dati inseriti all'interno del pacchetto ricevuto dal nodo precedente per autorizzare così solamente determinate stazioni ad inoltrare il pacchetto. Infatti, il percorso che quest'ultimo deve effettuare è dalla profondità verso la superficie e per questo motivo solo le stazioni con una profondità minore di quella precedente ed interne ad un determinato range verranno scelte come intermediarie.

Tuttavia, queste caratteristiche di inoltro vengono mappate per ciascun nodo in maniera differente in quanto mettono in relazione i loro nodi adiacenti con le relative distanze ed eventuali dimensioni delle sottoreti. Una conseguenza di tutto ciò è una rappresentazione di molteplici allagamenti circolari di raggio differente per ciascun nodo e con regioni sovrapposte per costruire così il percorso tra la stazione mittente e quella destinataria.

Tuttavia, anche applicando questa strategia in una rete poco densa possono esserci ugualmente delle stazioni contenute in alcune regioni non raggiungibili dall'esterno, perché è troppo elevata la distanza dagli altri nodi e per tale motivo inefficiente in tali condizioni.

### **3.2.4.5. Protocollo DSEE-DBR (Delay Sensitive Energy Efficient Depth Based Routing)**

Questa ottimizzazione è inerente al protocollo precedente ovvero al DS-DBR (Delay Sensitive Depth Based Routing) implementando due nuove funzionalità, tra le quali si possono osservare la gestione energetica e la gestione del ritardo.

È stata studiata una strategia per aumentare la durata dell'intera infrastruttura di rete sfruttando opportune scelte di instradamento per diminuire il consumo energetico di determinati nodi, per avere un consumo più equilibrato. La strategia è la seguente: mettere in relazione alcuni dati e caratteristiche del canale trasmissivo scelto tra le quali si possono osservare la perdita di segnale, il livello energetico, il rumore, lo sfasamento e la differenza di profondità.

Una conseguenza è che quando una stazione deve inviare dei pacchetti non prende in considerazione solo la differenza di profondità, il tempo di mantenimento dei pacchetti e il range di trasmissione, ma considera anche le caratteristiche dei canali di comunicazione possibili per scegliere così quelli più adatti. Inoltre, ciò implica un consumo energetico equilibrato tra tutti i nodi

appartenenti all'infrastruttura di rete facendo sì che non sia un esaurimento in un'area particolare della rete causandone possibili errori di instradamento ed eventuali blocchi. Aumentando così la durata dell'infrastruttura di rete.

Tuttavia, questa strategia rappresenta un ideale in quanto il risparmio energetico è controbilanciato dalla maggior elaborazione dovuta alla scelta dei possibili canali di comunicazione.

### **3.2.4.6. Protocollo DSM-DBR (Dynamic Sink Mobility Depth Based Routing)**

Infine, quest'ultima ottimizzazione del protocollo DBR consiste nell'implementazione della comunicazione tra la stazione mittente e la stazione destinataria mediante la suddivisione dell'intera infrastruttura di rete in molteplici regioni con lo scopo di massimizzare la durata, il rendimento e la stabilità della rete.

Le stazioni vengono partizionate in molteplici raggruppamenti in relazione alla loro posizione rispetto ad un piano tridimensionale. Successivamente viene calcolata la densità delle stazioni di ciascun gruppo per poter così spostare la stazione sink ovvero quella principale in quest'ultima regione per avere una maggior efficienza.

Inoltre, un'altra componente importante in questa tipologia sono gli AUV che svolgono funzioni di collegamento tra la regione principale e gli altri raggruppamenti. Per tale motivo questa strategia risolve il problema delle regioni con poche stazioni in quanto quest'ultimi percorrono traiettorie che le contengono. Questo protocollo rappresenta una buona strategia strutturale, ma uno svantaggio consiste che la gestione diventa sempre più difficile e sofisticata.

### **3.2.5. Protocolli clustered based**

Consideriamo ora un insieme di protocolli detti clustered based. Questa tipologia di protocolli di routing in ambito marino consiste nell'implementazione di una strategia di raggruppamento dei nodi basata sui dati raccolti inerenti alla loro posizione geografica rispetto ad un piano bidimensionale o tridimensionale mediante dei sensori installati su di essi.

Si definiscono gruppi di nodi ciascuno formato da due tipologie principali di stazioni dette rispettivamente member e head. La caratteristica principale che le differenzia è il livello di interconnessione in quanto le prime sono collegate solo reciprocamente a quelle che fanno parte dello stesso raggruppamento mentre le seconde forniscono un livello di interconnessione intergruppo. Questi nodi sono collegati sia a tutte le stazioni member appartenenti allo stesso

gruppo ma anche alle stazioni head degli altri gruppi per permettere la comunicazione tra i vari gruppi all'interno dell'intera infrastruttura di rete.

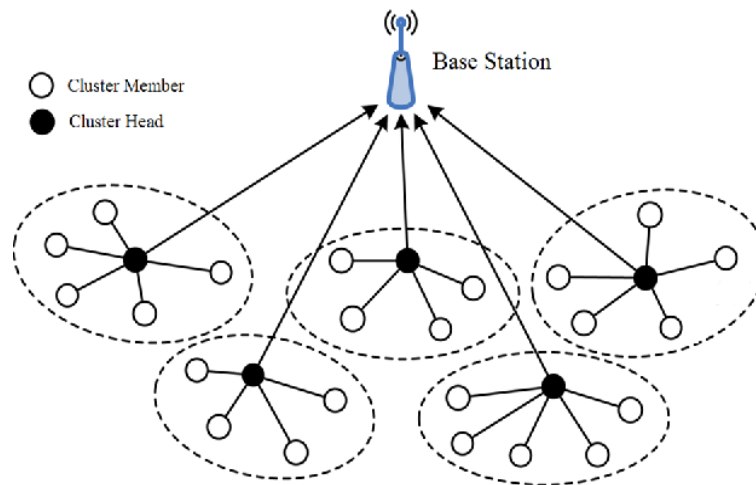


Figura 16: Esempio di protocollo clustered based

Un esempio di questa tipologia di protocolli è illustrato nella figura 16. Si osserva che l'infrastruttura di rete sottomarina è suddivisa in cinque cluster ovvero in cinque gruppi principali. All'interno di ciascuno si possono distinguere le due tipologie di nodi differenziati per colore ovvero quelli bianchi che rappresentano i nodi member mentre quelli neri che rappresentano i nodi head. La figura mostra la caratteristica dei collegamenti, infatti si osservano i nodi member che sono collegati solo alla stazione principale del medesimo gruppo, mentre quelli head sono collegati tra di loro per poter permettere l'intera interconnessione di tutti i gruppi.

Presentiamo ora alcuni protocolli di questa tipologia.

### 3.2.5.1. Protocollo HydroCast (Hydraulic Pressure Based Any cast Routing)

Un esempio di protocollo clustered è l'HydroCast, caratterizzato dall'implementazione del canale di comunicazione tra le stazioni mittente e destinatarie mediante dei cluster, sfruttando le informazioni sulla profondità di ciascun nodo. Questo protocollo funziona in maniera simile al protocollo DBR, ma con un'ulteriore ottimizzazione per risolvere il problema delle regioni vuote. Quando una stazione vuole trasmettere un pacchetto lo inoltra alle stazioni vicine che hanno una profondità minore per effettuare così una trasmissione verticale.

Per questo motivo ogni qualvolta una stazione voglia trasmettere viene scelto un sottoinsieme di nodi chiamato cluster come possibili intermediari e la priorità assegnatagli a ciascuno scelta in base alla loro vicinanza alla stazione di destinazione.

In questa fase è importante l'ottimizzazione di questo protocollo in quanto nel momento in cui si inoltra un pacchetto ad una stazione, si verifica che quest'ultima possa reinoltrarlo a sua volta, altrimenti sfruttando un percorso di recupero all'indietro la si esclude e si riprova con le successive fino ad arrivare alla stazione di destinazione.

Nonostante questa soluzione questa strategia ha uno svantaggio importante nelle reti poco dense in quanto per ciascuna trasmissione ci può essere un percorso molto lungo dovuto alle molteplici prove e verifiche dei possibili percorsi per arrivare fino al nodo di destinazione.

### **3.2.5.2. Protocollo DUCS (Distributed Underwater Clustering Scheme)**

Un altro protocollo della tipologia clustered consiste nel DUCS che è caratterizzato dall'implementazione del canale di trasmissione mediante una prima suddivisione delle stazioni in cluster e successivamente in nodi member e nodi head. Un'importante caratteristica di questo protocollo è la capacità di organizzarsi automaticamente sfruttando degli algoritmi distribuiti, dato che la posizione dei nodi è notevolmente dinamica.

Di conseguenza nel momento in cui una stazione deve trasmettere un pacchetto lo invia mediante comunicazione single hop al nodo head del medesimo cluster e quest'ultimo, dopo aver ricevuto diversi dati da molteplici stazioni, li aggrega e li trasmette nella direzione della stazione head del cluster di destinazione mediante trasmissione multihop e infine avverrà la comunicazione finale single hop al nodo member di destinazione.

Notiamo che a causa della dinamicità dell'ambiente sottomarino evolve anche la struttura dell'intera infrastruttura di rete e per tale motivo la vita dei cluster è molto ridotta. Inoltre, se a causa di correnti sottomarine il nodo head di un cluster si allontana dalla posizione originale senza essere stati ricalcolati i cluster, il trasferimento della rete potrebbe subire notevoli ritardi portando una conseguente inefficienza.

### **3.2.6. Protocolli AUV based**

Questa tipologia di protocolli di routing consiste nell'implementazione del canale di trasmissione tra la stazione mittente e quella destinataria sfruttando il movimento dei sottomarini autonomi presenti nell'ambiente sottomarino circostante l'infrastruttura di rete.

Questo significa che è possibile il collegamento tra le varie sottoreti anche se di elevata distanza l'una dall'altra determinandone a priori i molteplici percorsi che i diversi sottomarini autonomi devono seguire.

Il trasferimento dei pacchetti avviene nella seguente maniera: le stazioni trasmettono una serie di pacchetti nel momento in cui un AUV sta passando nelle vicinanze di quella determinata zona e quest'ultimo viene usato come dispositivo di memorizzazione temporanea per la successiva comunicazione ad un'altra sottorete dopo aver percorso una determinata traiettoria permettendo così la comunicazione tra le diverse regioni dell'intera infrastruttura di rete.

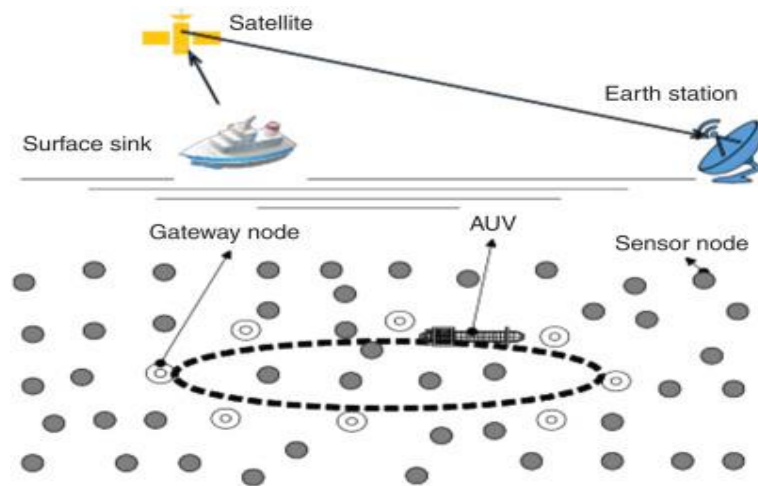


Figura 17: Esempio di protocollo AUV based

La figura 17 mostra un esempio di questa tipologia. Si osservano principalmente tre figure non rilevanti per il protocollo, ovvero le stazioni onshore, quelle offshore e i satelliti, mentre quelle rilevanti sono i nodi, i gateway e i sottomarini autonomi. Immaginando che quest'ultimi siano disposti in una vasta area sottomarina si può notare che è presente una figura geometrica che è un ovale che rappresenta il percorso che deve fare quel determinato AUV per collegare i diversi gateway della rete permettendo così l'intera interconnessione.

Vediamo ora un esempio di protocollo di questa tipologia.

### 3.2.6.1. Protocollo Mobicast

Questo esempio di protocollo basato sull'utilizzo dei veicoli autonomi subacquei AUV rappresenta una soluzione a risparmio energetico e senza il problema delle regioni vuote. Questo perché il protocollo funziona nella seguente maniera ovvero le stazioni vengono distribuite casualmente in un'area tridimensionale ben delimitata e contenenti i veicoli autonomi subacquei. Quest'ultimi si muovono sfruttando dei percorsi prestabiliti e raccolgono i dati dalle stazioni ad intervalli regolari.

Di conseguenza osserviamo la molteplicità di raggruppamenti di nodi che rappresentano un punto chiave rispetto alla vicinanza con gli AUV in determinati momenti. Possiamo suddividere le stazioni in due tipologie, attive e passive. Le attive sono vicine all'AUV in un determinato momento e per questo motivo riescono ad effettuare le operazioni di invio e di ricezione mentre le passive che sono

più distanti rimangono in uno stato di sospensione temporanea. Questo protocollo è una valida strategia di risparmio energetico.

Tuttavia, la creazione ed implementazione di molteplici percorsi sottomarini è molto difficile a causa della dinamicità dell'ambiente circostante. Infatti, uno svantaggio è il continuo stato di sospensione di determinate stazioni, in quanto mediante fenomeni sottomarini la loro posizione varia costantemente e rimangono ad un'elevata distanza dall'AUV di riferimento.



## 4. Valutazione delle prestazioni

Il passo successivo dopo aver progettato e implementato una rete sottomarina consiste nell'analisi e nella valutazione delle prestazioni. Rispetto alle reti di sensori usate in ambito terrestre quelle in ambito marino soffrono di un minor studio dedicato, di molteplici sfide ancora aperte ed infine di luoghi poco esplorati come gli oceani e i fondali marini e un crescente interesse e attenzione negli ultimi decenni. Per questo motivo un primo passo inerente all'analisi, alla valutazione e alla sperimentazione potrebbe essere l'uso delle tecnologie usate nelle reti di sensori terrestri anche in ambito marino con le dovute precauzioni, adeguamenti e sviluppi futuri.

Come viene descritto nei documenti [Raza Jafri 2019] e [Hanjiang 2017] i metodi per l'analisi e la valutazione delle prestazioni sono basati su modelli di simulazione, con lo sviluppo di simulatori subacquei, di modelli analitici, di misurazione e benchmarking e nella sperimentazione. Il problema di analisi e valutazione è complesso anche per l'elevato costo dell'infrastruttura di rete, la minor disponibilità di risorse e strumenti adeguati ed infine alla limitata conoscenza delle reti in ambito marino.

Una prima tecnica per l'analisi e la valutazione delle prestazioni consiste nell'implementazione ed uso di modelli analitici espressi in un formalismo logico-matematico risolti con opportuni algoritmi e metodi e per tale motivo un requisito fondamentale consiste in ipotesi molto rigorose e in analisi formali accurate.

Definendo una strategia che implementa questa prima tecnica di analisi e valutazione delle prestazioni si sviluppa una soluzione che richiede un maggior numero di risorse computazionali dovute alla quantità elevata di calcolo numerico. Nonostante questo svantaggio questa tecnica rappresenta una valida soluzione in quanto si possono implementare risultati già noti in letteratura ottenendo così un modello analitico maggiormente consolidato e performante.

Tuttavia, fino ad ora sono stati proposti pochi modelli analitici per reti UWSN e questa rappresenta una sfida ancora tutt'oggi aperta. Alcuni esempi che sono stati elencati nel documento [Hanjiang 2017], includono un modello per analizzare il consumo energetico nelle UWSN multi hop, un altro modello per l'analisi stocastica della trasmissione dei dati in relazione alla latenza e al consumo energetico, un altro per ottenere la latenza minima mediante l'accesso al canale condiviso sfruttando grafi ed infine uno basato su un modello di Markov per massimizzare il rapporto tra la probabilità di consegna dei pacchetti e il consumo energetico.

Il secondo metodo per l'analisi e la valutazione delle prestazioni delle reti di sensori in ambito sottomarino consiste nei modelli di simulazione, in particolare nell'implementazione ed uso dei

simulatori che verranno introdotti nel paragrafo 5. Questi rappresentano una descrizione del sistema reale e della sua dinamica tramite la specifica degli stati, delle condizioni iniziali, definite da parte dell'utente e della dinamica di cambiamento di stato nel tempo. Un esempio di simulatore molto utilizzato è il Network Simulator (NS) con le successive versioni 2 e 3, piattaforma consolidata per la simulazione di reti dove sono implementati sia la maggioranza di protocolli del livello fisico, del sottolivello MAC e dei livelli superiori e utilizzato anche per la valutazione e il confronto di futuri e nuovi protocolli. Questo simulatore è molto utilizzato e anche impiegato come versione basilare per svilupparne di nuovi come, ad esempio, AquaSim e descritto nel punto 5.3.1.5. Negli ultimi anni sta nascendo anche un nuovo progetto open source chiamato SunSet che consiste in un'infrastruttura di simulazione per la comunicazione acustica e maggiormente spiegato nel punto 5.3.2.5.

Un altro metodo per l'analisi e la simulazione delle reti di sensori in ambito marino consiste nella misurazione e sperimentazione sfruttando la disponibilità di risorse laboratoriali. Questo approccio può essere applicato per implementare metodi, protocolli e architetture da convalidare, studiare ed approfondire. Questa strategia ha il vantaggio di poter essere applicata a sistemi esistenti, è relativamente semplice da applicare e in questa fase di sviluppo delle reti UWSN può essere considerata adatta per l'analisi delle prestazioni, dei protocolli ed infrastrutture in ambito marino. Alcuni esempi di analisi sono la valutazione dei protocolli di routing all'interno di applicativi per il monitoraggio e la prevenzione di alcuni fenomeni in un determinato ambiente, l'analisi della risposta da parte di alcuni nodi relativi ad una determinata comunicazione, l'analisi dell'effetto multipath, il calcolo dei percorsi di consegna, la percentuale di perdita del segnale e l'analisi del throughput complessivo della rete.

La progettazione e l'implementazione di piattaforme di simulazione e sperimentazione sono due fasi principali e molto importanti perché definiscono quali sono i vincoli, i requisiti e le relazioni tra le diverse componenti che sono il software, l'hardware, i sensori, gli strumenti di virtualizzazione e simulazione e la gestione della reciproca comunicazione mediante dei protocolli.

L'uso di metodi di analisi, come la simulazione e la misurazione e la sperimentazione permettono di diminuire i costi e tempistiche di sviluppo di nuovi protocolli e architetture di rete. L'applicazione all'ambiente marino di piattaforme e metodi di simulazione già sviluppate per reti terrestri non è facile e adatta a causa della presenza della trasmissione multipath, dell'elevato ritardo di propagazione, dell'effetto doppler, del rumore e dell'elevata dinamicità che rendono tale applicazione una sfida molto difficile.

Per progettare una piattaforma adeguata alle reti UWSN i ricercatori hanno dovuto studiare una strategia per implementare dei canali di comunicazione che risultassero equivalenti a quelli marini ovvero con la caratteristica di variabilità nel tempo, nello spazio e nella frequenza del segnale.

La simulazione per la valutazione e analisi dei protocolli in reti sottomarine può essere realizzata con la simulazione basata su software, ovvero in un ambiente modellato mediante un formalismo logico o matematico o linguistico, con l'emulazione basata sul hardware ovvero l'inclusione di veri e propri modem acustici sottomarini nell'ambiente di test e con la misurazione basata su esperimenti reali mediante l'utilizzo di un'infrastruttura esistente.

Di seguito verranno analizzati alcuni indici prestazionali delle reti di sensori acustici in ambito marino e alcuni di questi sono la durata della rete, il consumo energetico, il ritardo, l'affidabilità, il throughput e la perdita di pacchetti e di percorso mentre le piattaforme di simulazione e sperimentazione verranno illustrate nel capitolo successivo.

Come viene illustrato nei documenti [Ayaz 2016] e [Raza Jafri 2019], per poter effettuare un rapporto di prestazioni sotto i precedenti indici prestazionali, bisogna creare diverse tipologie di test variando per esempio, come stato fatto nel documento citato, il numero di nodi, la dimensione dei pacchetti e la tipologia di architettura: 1d, 2d e 3d.

## **4.1. Consumo energetico**

Il primo indice prestazionale fondamentale per le reti di sensori acustici in ambito sottomarino consiste nel consumo energetico in quanto spesso l'accesso fisico all'infrastruttura di rete non è sempre disponibile ed è caratterizzato da costi molto elevati e pertanto la sostituzione di batterie ed altra componentistica non è sempre disponibile e fattibile come scelta.

Per questo motivo bisogna fare un'analisi prestazionale cercando di mettere in relazione diverse tipologie di dati, tra le quali ci sono il consumo energetico, la dimensione dei pacchetti, il numero di nodi appartenenti all'infrastruttura ed infine le condizioni ambientali per poterlo ottimizzare.

Infatti, come si può osservare nel documento sopra citato la relazione tra queste caratteristiche e il consumo energetico è direttamente proporzionale fino ad un pacchetto di dimensione media ed esponenziale se di dimensione maggiore.

Infatti, l'aumento della dimensione dei pacchetti, il passaggio da un'architettura 1d lineare ad una 2d bidimensionale ed infine a quella 3d tridimensionale richiede un maggiore numero di trasmissioni duplicate dovute al maggior numero di possibili percorsi tra due o più stazioni e questo porta ad un maggior numero di trasmissioni ed una maggior congestione.

Infine, un'ulteriore caratteristica svantaggiosa può essere dovuta ad un posizionamento causale dei nodi dell'infrastruttura all'interno di una determinata area e di conseguenza il consumo energetico potrebbe non essere più equilibrato ed ottimizzato in quanto i pacchetti potrebbero seguire lo stesso percorso perché non è stata ottimizzata la struttura portando così con il passare del tempo un ritardo o nel peggior dei casi una paralisi della rete.

Per tali motivi si sta cercando di progettare, implementare e sviluppare dei protocolli di instradamento efficienti e quest'ultimo termine significa riuscire ad integrare nell'infrastruttura di rete un consumo energetico minor possibile ed equilibrato per poter così aumentare la durata della rete stessa.

## 4.2. Affidabilità e ritardo

Il secondo indice di prestazione consiste nell'affidabilità e nel ritardo e in questo rapporto la topologia e l'architettura di rete sono due degli aspetti chiave per poterlo ottimizzare. Infatti come si può osservare sempre dallo stesso documento precedente, una distribuzione casuale dei nodi dell'infrastruttura di rete è caratterizzata da un ritardo più elevato rispetto alle altre topologie e test in quanto sono mancanti alcuni aspetti caratteristici di una rete ben progettata come:

- Molteplicità di percorsi disponibili;
- Distanze reciproche non troppo elevate;
- Equità nella distribuzione dei nodi all'interno di una determinata area;
- Differenziazione di tipologie di nodi per livello di importanza e funzionalità non sono presenti.

Per questo motivo alcuni aspetti da tenere in considerazione durante la progettazione di un'infrastruttura di rete per riuscire ad ottimizzare al massimo l'affidabilità e il ritardo sono i seguenti:

- La distanza reciproca tra i diversi nodi in quanto maggiore è, maggiore sarà il ritardo accumulato dal pacchetto nel percorso per arrivare a destinazione;
- La dimensione del pacchetto in quanto più grande è, maggiore sarà il tempo necessario per farlo arrivare a destinazione;
- La differenziazione dei nodi per livello di importanza e tipologia ovvero riuscire ad implementare dei percorsi logici per far arrivare un pacchetto a destinazione mediante

un'analisi di carico del consumo energetico e della larghezza di banda disponibile in quel determinato momento;

- Infine, una distribuzione omogenea dei nodi appartenenti all'infrastruttura di rete in una determinata area geografica in quanto se non avviene in maniera uniforme ci saranno alcune regioni con sovrapposizione di nodi creando così congestione, ritardo e trasmissione duplicata mentre altre regioni con pochissimi nodi creeranno colli di bottiglia impattando così su consumo energetico, ritardo ed affidabilità.

## 4.3. Throughput

Il terzo indice di prestazione consiste nel throughput ovvero nella capacità di gestione del traffico della rete e per poterlo analizzare bisogna anche prendere in considerazione la tipologia di architettura, il protocollo di routing usato, le caratteristiche dell'ambiente circostante, i vincoli e i requisiti.

Infatti, come abbiamo visto nei paragrafi 2.2. e 3.2 ci sono molteplici tipologie di architetture e di protocolli di routing in quanto sono ancora molte le sfide aperte nell'ambito della comunicazione sottomarina e per questo motivo ogni tipologia è specializzata in una tecnica ovvero i protocolli vector based cercano di creare un collegamento virtuale tra la stazione mittente e quella destinataria mediante un canale, quelle clustered based cercano di raggrupparle per posizione e differenziandole per tipologia, quelle AUV based cercano mediante dei veicoli autonomi subacquei il collegamento tra sottoreti distaccate e così via.

Da tale motivo si può determinare che il throughput consiste in una relazione di molteplici fattori, tra i quali si possono osservare:

- La suddivisione in cluster e la maggior elaborazione dei dati in quelli più popolati e meno in quelli isolati;
- La gestione del consumo energetico in quanto in alcuni ambienti si può preferire massimizzare il risparmio energetico perché troppo complesso l'accesso fisico in quel determinato ambiente e quindi è consentito un throughput non ottimizzato e massimizzato;
- La tipologia di comunicazione tra le diverse stazioni e i relativi livelli di profondità in quanto si può preferire una comunicazione verticale rispetto a quella orizzontale e viceversa;
- Infine, la gestione del movimento dei nodi per prendere alcune decisioni come per esempio la modifica, la creazione e la cancellazione di determinati canali di comunicazione per poter ottimizzare così il throughput di rete finale.

Di conseguenza un'analisi generale del throughput di una rete UWSN non è possibile farla in maniera diretta e perfetta in quanto tutte, per almeno una caratteristica dell'ambiente circostante o per tipologia di architettura o per alcuni fattori variano e di conseguenza bisogna adottare le tecniche, tecnologie e strumenti disponibili per implementarla su misura.

## **4.4. Perdita di pacchetti e di percorso**

L'ultimo indice di prestazione illustrato in questa tesi consiste nella perdita di pacchetti e di percorso. Questo rappresenta la possibilità di un pacchetto di perdersi all'interno della rete senza arrivare così alla stazione di destinazione e di conseguenza direttamente proporzionale con la larghezza di banda del canale occupata per le eventuali ritrasmissioni oppure con le risorse computazionali occupate per la gestione della correzione degli errori.

Questo può succedere per molteplici motivi tra i quali:

- Le interferenze con eventi esterni appartenenti all'ambiente circostante l'infrastruttura di rete come, ad esempio, l'interruzione di alcuni canali di comunicazione dovute al passaggio di qualche imbarcazione e molto altro;
- La congestione e i colli di bottiglia dovuti ad un'architettura e topologia di rete mal progettata e quindi i nodi non distribuiti in maniera uniforme in una determinata regione provocando così l'irraggiungibilità di alcune stazioni;
- L'attenuazione, il rumore, il percorso multipath e l'effetto doppler dovute alle caratteristiche del canale di comunicazione acustico sottomarino.

Per tali motivi un'ottimizzazione possibile di quest'ultimo indice di prestazione consiste nella progettazione ed implementazione di nuovi algoritmi di routing e nuove tecniche di correzione degli errori efficienti per poter così riuscire a ridurlo abbastanza e ottenere una maggiore larghezza di banda disponibile per ulteriori comunicazioni oppure un maggior numero di risorse computazionali libere per qualche altro processo o elaborazione parallela.

## 5. Le piattaforme di simulazione e sperimentazione

In questo capitolo trattiamo le piattaforme di simulazione e sperimentazione discutendo quali sono le sue componenti, gli usi e le applicazioni, i criteri di progettazione ed infine una classificazione suddividendoli in tre tipologie principali. Per prima cosa trattiamo quali sono le sue componenti.

### 5.1. Le componenti

Le piattaforme di simulazione e sperimentazione, come viene descritto nel documento [Hanjiang 2017], sono composte principalmente da quattro componenti:

- Software, ovvero l'insieme di sistema operativo, di interfaccia grafica, di stack per la gestione dei protocolli e di molteplici strumenti per la simulazione e la sperimentazione;
- Modem acustici, ovvero l'insieme dei dispositivi atti a delineare delle unità di comunicazione wireless mediante il segnale acustico;
- Nodi sottomarini, ovvero l'insieme delle unità di elaborazione, di archiviazione e di comunicazione wireless per poter così in maniera reciproca osservare dei fenomeni ed eventi di interesse in maniera coordinata per raggiungere fini comuni.
- Interfacce grafiche, ovvero l'insieme delle interfacce utente dove ciascuna consente un'interazione uomo macchina per poter così in maniera del tutto visuale consentire ai ricercatori e agli sviluppatori di inviare comandi e ricevere dati dalle piattaforme di simulazione e sperimentazione durante un qualsiasi esperimento, test, simulazione ed emulazione.

#### 5.1.1. Software

La prima componente di una piattaforma di simulazione e sperimentazione consiste in quella basata nel software ovvero l'insieme di sistema operativo, di interfaccia grafica, di stack per la gestione dei protocolli ed infine di molteplici strumenti per la simulazione e la sperimentazione. Un'altra caratteristica importante di questa componente è la tecnica con la quale viene sviluppato e implementato un determinato programma software in quanto se ne possono osservare principalmente due, tra le quali quella con fini commerciali mentre la seconda opensource con la possibilità di integrare nuove funzionalità, di implementarlo all'interno dell'infrastruttura ed infine di distribuirlo.

Alcuni esempi di software integrati nell'infrastruttura di rete marina per implementare le funzionalità di simulazione e di sperimentazione, descritti oltre che nel documento sopra citato anche in [Shengming 2018], possono essere i seguenti ovvero Opnet, Omnet++ e Ns-2 dove

quest'ultimo è quello maggiormente noto, utilizzato ed implementato in applicazioni di circa 600 aziende sparse per tutto il mondo.

Un'altra tipologia di componente software consiste nell'implementazione e mantenimento dei canali acustici sottomarini e questo è permesso mediante l'utilizzo del software di ray-tracing di Bellhop che opera nel livello fisico del modello ISO/OSI.

Un'ulteriore tipologia consiste nello stack di gestione dei protocolli in quanto mediante l'utilizzo dell'implementazione di NS2-Miracle che è un'ottimizzazione del protocollo Ns-2 viene consentito l'utilizzo di molteplici protocolli all'interno dello stesso livello.

Infine un'ultima ottimizzazione possibile consiste nell'implementazione del Software Defined Radio all'interno dell'infrastruttura sottomarina per aver così componenti software che sostituiscono componenti hardware come ad esempio il modem acustico permettendo così di effettuare operazione come modulazione e demodulazione del segnale, configurazione dell'infrastruttura mediante il solo software creando così un'infrastruttura maggiormente scalabile, efficiente e riprogrammabile ogni volta che si voglia implementare una nuova feature ed un esempio di quest'ultima ottimizzazione consiste nella radio GNU.

### **5.1.2. Modem acustici**

La seconda componente di una piattaforma di simulazione e di sperimentazione consiste nella gestione dei modem acustici sottomarini che ne rappresentano una parte essenziale in quanto raffigurano i dispositivi atti a delineare un'unità di comunicazione wireless mediante il segnale acustico.

Si possono osservare principalmente tre tipologie di modem acustico ovvero quelli orientati al commercio, quelli orientati alla ricerca e allo sviluppo ed infine quelli SDM differenziandoli così per affidabilità, tasso d'errore, velocità massima di comunicazione, architettura ed infine adattabilità a molteplici ambienti circostanti.

La prima tipologia che consiste nei modem acustici sottomarini dedicati all'ambito aziendale è caratterizzata da un loro utilizzo all'interno di applicazioni implementate in una o più infrastrutture di rete connesse reciprocamente mediante collegamento punto a punto per poter così realizzare una comunicazione molto affidabile con un bit rate error molto basso sia in comunicazioni poco profonde e anche molto profonde permettendo così anche distanze di qualche chilometro. Alcuni esempi di questa prima tipologia possono essere i seguenti ovvero EvoLogics, AquaSeNT, Trittech e AppliedOceanSystems.



La seconda tipologia di modem sottomarini consiste in quelli dedicati alla ricerca e allo sviluppo e per tale motivo devono consistere in dispositivi con la possibilità di riprogrammarlo interamente in quanto vengono integrati in molteplici infrastrutture di rete dedicate principalmente alla progettazione ed implementazione di nuove applicazioni, protocolli ed algoritmi e per questo motivo oggetto di simulazione di molteplici ambienti con determinate condizioni. Alcuni esempi di questa tipologia possono essere il micromodem Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) e il rModem.

Infine, l'ultima tipologia di modem acustico sottomarino consiste in un'implementazione software ovvero operazioni come modulazione e demodulazione del segnale, correzione degli errori e molto altro che prima venivano svolte dal hardware del modem acustico ora vengono gestite mediante software e una conseguenza di tutto ciò è una maggiore configurabilità e adattabilità alla dinamicità dell'ambiente marino.

### **5.1.3. I nodi sottomarini**

Infine, l'ultimo componente di una piattaforma di simulazione e sperimentazione consiste nei nodi sottomarini che rappresentano delle unità di elaborazione, di archiviazione e di comunicazione wireless per poter così in maniera reciproca osservare dei fenomeni ed eventi di interesse in maniera coordinata per raggiungere fini comuni.

La struttura di un'unità di elaborazione o nodo, è composta da molteplici componenti tra le quali si possono osservare una cpu per poter effettuare l'interfacciamento con le altre componenti, una memoria per la memorizzazione dei dati registrati dai sensori installati, un modem acustico per permettere una comunicazione reciproca tra tutti i nodi appartenenti all'infrastruttura di rete, una fonte di alimentazione ed infine l'insieme dei sensori installati nel nodo dove ciascuno misura determinate caratteristiche dell'ambiente circostante.

Per tali motivi le funzionalità principali dell'infrastruttura di rete vengono svolte dai nodi in quanto come primo passo misurano mediante dei sensori determinate proprietà dell'ambiente circostante, poi successivamente utilizzando opportune interfacce come canali di comunicazione e protocolli comunicano con l'unità centrale questi ultimi dati che solo dopo averli elaborati vengono memorizzati e inoltrati ad una stazione di riferimento fino ad arrivare alla destinazione sfruttando un percorso multi hop.

Solitamente i nodi sottomarini si suddividono principalmente in tre tipologie: quelli fissi ovvero ancorati ad alcune banchine o boe nel fondale marino, quelli mobili ovvero che variano la loro posizione in relazione alla dinamicità dell'ambiente marino come correnti e onde superficiali ed infine quelli semimobili ovvero ancorati ai veicoli autonomi subacquei (AUV), ai veicoli controllati a

distanza (ROV) oppure ad alcune boe che vengono posizionate in un'area prestabilita per un tempo determinato per eventuali studi, ricerche e monitoraggi.

Di seguito verranno trattati i molteplici criteri di progettazione che devono essere requisiti, inclusi ed applicati all'interno della progettazione ed implementazione delle piattaforme di simulazione e sperimentazione.

## **5.2. I criteri di progettazione**

Come viene descritto nei documenti [Shengming 2018], [Mateen 2019] e in [Akbar 2015] la progettazione e l'implementazione di una piattaforma di simulazione e sperimentazione delle reti di sensori in ambito marino sono due operazioni molto delicate e molto complesse perché sono stati e saranno necessari molti studi e ricerche in quanto la difficoltà principale consiste nella dinamicità dell'ambiente marino che porta ad una continua evoluzione e mutazione dell'intera infrastruttura di rete sia nel tempo che nello spazio.

Di conseguenza una soluzione di tutto ciò è la creazione di piattaforme, algoritmi e protocolli auto adattativi per poter riuscire in tempo reale ad adattare il contesto topologico e algoritmico alla variazione dell'ambiente circostante.

Quest'ultimo principio bisognerebbe riuscire ad implementarlo anche a livello di ricerca e sviluppo progettando così dei banchi di prova altamente programmabili e flessibili per far sì che siano adatti alle molteplici e differenti configurazioni hardware e software scelte dai ricercatori per poter così progettare, implementare e successivamente testare nuovi protocolli, nuovi algoritmi e nuove tecniche progettuali in maniera notevolmente scalabile ed accurata.

Tuttavia, la dinamicità dell'ambiente marino non è l'unica sfida che i ricercatori devono risolvere infatti la sincronizzazione dell'ora, l'accuratezza dei dati, l'efficienza energetica, il costo dell'infrastruttura di rete ed infine l'accesso remoto rappresentano solo alcuni dei requisiti che le moderne piattaforme di simulazione e sperimentazione devono includere e per permetterlo bisogna determinare alcuni criteri di progettazione che esse devono rispettare.

- Il primo criterio consiste nella riconfigurabilità e il supporto alla progettazione multilivello ovvero l'implementazione della piattaforma di simulazione e sperimentazione mediante un'architettura altamente scalabile e configurabile dove risulta possibile l'implementazione di molteplici protocolli in molteplici livelli. Una tecnica usata per sviluppare questa strategia è l'implementazione della comunicazione cross-layer ovvero l'uso di determinati protocolli e porte di connessione per lo scambio di dati tra i diversi livelli del modello ISO/OSI per poter così riconfigurare l'intera infrastruttura di rete ogni qualvolta che alcune caratteristiche

dell'ambiente circostante, del contesto topologico o algoritmico variano. Una conseguenza di tutto ciò è la possibilità di realizzare una moltitudine di scenari, di condizioni ed infine di requisiti per poter così creare un'architettura auto adattativa adatta a molteplici tipologie di ambiente circostante l'infrastruttura di rete causate dall'elevata dinamicità dell'ambiente sottomarino.

- Il secondo criterio di progettazione consiste nel livello di accessibilità delle risorse, degli strumenti ed infine dei servizi implementati all'interno dell'infrastruttura di rete. Infatti, negli ultimi decenni si sta cercando di introdurre due principi di elevata importanza, tra i quali si possono osservare la gratuità e l'opensource. Questo significa che se quest'ultimi verranno inclusi in maniera adeguata nascerà una nuova tecnica di sviluppo denominata sviluppo collaborativo con molteplici vantaggi, tra i quali si possono osservare una maggior trasparenza, una riduzione del tempo necessario per la gestione, l'eliminazione di molteplici vincoli spazio-temporali ed infine una maggior sicurezza.
- Il terzo criterio di progettazione è quello maggiormente richiesto negli ultimi anni ovvero l'implementazione di strategie di accesso remoto alle risorse, agli strumenti ed infine ai servizi implementati all'interno dell'infrastruttura di rete. Un esempio molto semplice lo si può fare pensando semplicemente al luogo dove esse vengono progettate e costruite, ovvero in mezzo all'oceano e di conseguenza l'accesso fisico che non è sempre possibile ed inoltre è caratterizzato da costi molto elevati. Per tali motivi l'accesso a distanza o remoto è una tecnologia che offre grande comodità, minori costi dovuti agli spostamenti fisici, maggior disponibilità in qualsiasi momento e da qualunque luogo di accedere, controllare, configurare e mantenere l'intera piattaforma di simulazione e sperimentazione.
- Il quarto criterio di progettazione delle piattaforme di simulazione e valutazione consiste nell'efficienza, nella precisione, nel costo di implementazione e auto adattabilità. Questo significa che il punto di fondamentale importanza consiste nello studio dell'ambiente circostante l'infrastruttura di rete per poter così capire se è necessario un'architettura in piccola, media o grande scala comportando una crescita direttamente proporzionale di:
  - Costo;
  - Consumo energetico;
  - Memoria occupata;
  - Difficoltà nella gestione dell'accuratezza ed efficienza dell'analisi dei dati dovuto all'elevata dimensione dell'infrastruttura da dover gestire;

- Difficoltà nella gestione ed interconnessione delle diverse tipologie delle componenti in quanto sarebbe opportuno progettare delle reti riconfigurabili automaticamente ogni qual volta qualche caratteristica dell'ambiente circostante varia.
- Infine, l'ultimo criterio di progettazione consiste nel livello di accessibilità delle piattaforme di simulazione e sperimentazione ovvero se il loro sviluppo ed implementazione è a scopo commerciale con un rilascio limitato al pubblico con un conseguente uso molto limitato oppure opensource quando accessibili gratuitamente con la conseguente possibilità di modificarli liberamente creando così delle nuove versioni con funzionalità avanzate. Di quest'ultima tipologia sono la minoranza, infatti sono solo quattro: AquaSim, UnetStack, Desert e SunSet e questo viene descritto nel documento [Hanjiang 2017].

Di seguito verranno illustrate le tipologie delle piattaforme di simulazione e sperimentazione.

### 5.3. Le tipologie

In questo sotto capitolo verranno illustrate le diverse tipologie delle piattaforme di simulazione e sperimentazione suddividendole, come viene spiegato nei documenti [Hanjiang 2017], [Shengming 2018] e in [Akbar 2015], in relazione alla scala d'uso ovvero alla dimensione del territorio dove esse verranno successivamente implementate e gestite, ai costi dovuti alla loro gestione ed implementazione ed infine in relazione alle loro caratteristiche principali. La suddivisione è la seguente:

- Simulazione a livello di laboratorio: questa prima suddivisione consiste nella simulazione e sperimentazione di protocolli e algoritmi per le reti UWSN all'interno dei laboratori mediante degli esperimenti e dei test. Di conseguenza questa tipologia è caratterizzata da minori costi progettuali in quanto viene implementata mediante un'architettura su piccola scala e quindi usata solitamente nelle prime fasi di progettazione o per ricercatori alle prime armi in questo ambito. Alcuni esempi che verranno trattati nel paragrafo 5.3.1. sono: Aqua-Lab, Upper, Seanet, Aqua-Sim e UW-Buffalo;
- Simulazione a breve termine: questa seconda tipologia rappresenta una soluzione mista tra quella a livello di laboratorio e quella a lungo termine in quanto è caratterizzata da un costo e una scala medio-alti perché offrono funzionalità sia all'interno di un laboratorio con simulazione ed emulazione per essere usata nelle prime fasi di progettazione ma anche a livello di campo ovvero con veri e propri test nel luogo dove verranno successivamente gestite piattaforme a lungo termine. Alcuni esempi di questa tipologia sono: Aqua-Net, SeaLinx, UnetStack, Desert e SunSet e queste verranno illustrate nel paragrafo 5.3.2.

- Simulazione a lungo termine: infine l'ultima tipologia consiste nelle piattaforme di simulazione e sperimentazione a lungo termine ovvero caratterizzate da un costo e una scala elevati dovuto alla presenza di tutte le componenti di un'infrastruttura di rete come veicoli autonomi subacquei (AUV), veicoli autonomi comandati (ROV) e nodi sottomarini ed inoltre nota per la presenza di funzionalità di accesso remoto dovute all'impossibilità dell'accesso fisico perché queste piattaforme solitamente vengono posizionate nell'oceano per esperimenti e test di lunga durata. Alcuni esempi, che sono spiegati nel paragrafo 5.3.3 sono: SeaWeb, Ocean-TUNE e SunRise.

### **5.3.1. Simulazione a livello di laboratorio**

Di seguito verranno illustrati alcuni esempi di piattaforme di simulazione e sperimentazione a livello di laboratorio spiegate nei documenti [Hanjiang 2017].

#### **5.3.1.1. Aqua-Lab**

Questo primo esempio di piattaforma di simulazione e sperimentazione a livello di laboratorio rappresenta una soluzione a basso costo e facile da implementare perché formata dalle seguenti componenti: due computer, due modem, un mixer, un altoparlante e un microfono subacquei ed infine un contenitore con l'acqua.

Il funzionamento è il seguente: mediante i due computer gli operatori riescono a controllare i modem ed eventualmente riconfigurarli per poterli adattare così a nuovi protocolli e nuovi algoritmi. Successivamente mediante quest'ultimi riescono ad inviare alcuni comandi, sfruttando delle interfacce API, all'altoparlante e all'idrofono per poter così stabilire una connessione acustica.

Inoltre, un eventuale miglioramento consiste nell'inclusione di un mixer, come detto prima, per poter così creare ricreare molteplici ambienti in quanto viene usato per implementare complessi canali di comunicazione acustica nell'ambiente acquatico.

Un altro punto molto importante è l'inclusione di un emulatore al suo interno e questo rende possibile eseguire molti test ed esperimenti mettendo in relazione anche la topologia di rete e i problemi del segnale acustico in ambito marino come il ritardo di propagazione, l'effetto doppler, l'elevata attenuazione ed infine il multipath.

Tuttavia, questo primo esempio di piattaforma a livello di laboratorio sfruttando dispositivi molto elementari non riesce a soddisfare alcune tecniche più avanzate e sofisticate come per esempio la moltitudine di trasmissione parallele.

### **5.3.1.2. Upper**

Questo secondo esempio di piattaforma di simulazione e sperimentazione delle UWSN si differenzia dagli altri per il costo molto basso in quanto al suo interno è stato implementato radio GNU cioè un Modem Defined Radio, che è stato descritto nel paragrafo 5.1.1., per poter così effettuare operazioni come modulazione e demodulazione del segnale e configurazione dell'infrastruttura mediante il solo software creando così un'infrastruttura maggiormente scalabile, efficiente, riprogrammabile e soprattutto abbattendo i costi grazie all'assenza del hardware.

Per questo motivo Upper lo si può vedere come un insieme di due livelli: il primo fisico con la scheda madre e scheda audio mentre il secondo costituito dal solo software ovvero l'insieme del Modem Defined Radio, della gestione della comunicazione tra utenti e modem e dell'insieme delle interfacce che la permettono.

Tuttavia, essendo una piattaforma di simulazione e sperimentazione a basso costo viene utilizzata solitamente per i primi esperimenti subacquei ovvero nelle prime fasi di progettazione ed implementazione in un ambiente di scala ridotta, infatti come viene descritto nel documento sopra citato, supporta una distanza massima di appena 60 metri e per questo motivo non adatto negli ambienti più vasti.

### **5.3.1.3. Seanet**

Seanet rappresenta il terzo esempio di piattaforma di simulazione e sperimentazione delle reti UWSN a livello di laboratorio. Può essere considerato come un framework web basato sulla comunicazione acustica, infatti anche lui come Upper ha al suo interno il Software Defined Radio che gli permette così di avere una struttura suddivisa in moduli, maggiormente flessibile e riutilizzabile e una più semplificata testabilità.

Inoltre, una conseguenza dell'implementazione del Software Defined Radio e dall'implementazione della comunicazione cross layer è uno stack di protocolli maggiormente configurabile, adattabile e riprogrammabile ogni qual volta qualche caratteristica dell'ambiente circostante varia fornendo così un elevato adattamento in tempo reale dell'intera infrastruttura di rete.

Tuttavia, Seanet è ancora un prototipo e per questo motivo per vederlo anche nelle piattaforme a breve e lungo termine bisogna ancora aspettare eventuali ottimizzazioni, ricerche e sviluppi futuri.

#### **5.3.1.4. Aqua-Sim**

Aqua-Sim è il quarto esempio di piattaforma di simulazione e sperimentazione delle reti UWSN, basato sul noto simulatore ns-2 ed è anche considerata la piattaforma più completa per questa tipologia di rete.

È basato su un'architettura orientata agli oggetti e per questo suddivisa in moduli dove ciascuno è liberamente integrabile per aumentarne il numero di funzionalità, infatti, nel corso degli anni sono state implementate molteplici ottimizzazioni tra le quali: la rifrazione e l'attenuazione del segnale acustico, i fattori fisici e le condizioni ambientali, la sedimentazione nel fondale marino e l'elaborazione di una struttura tridimensione per la gestione dell'ambiente da utilizzare durante la simulazione. Un prima eventuale ottimizzazione consiste nell'integrazione delle equazioni paraboliche per poter così migliorare la precisione dell'ambiente sottomarino simulato.

Inoltre, la caratteristica principale di questa piattaforma di simulazione e sperimentazione è che è basata nell'opensource ovvero rilasciata pubblicamente e modificabile da chiunque e di conseguenza una maggiore possibilità di trovare eventuali nuovi modelli basati su questo simulatore od eventuali ottimizzazioni e pacchetti integrativi per aumentarne il numero di funzionalità.

#### **5.3.1.5. UW-Buffalo**

UW-Buffalo è l'ultimo esempio di piattaforma di simulazione e sperimentazione delle reti UWSN a livello di laboratorio illustrato in questa tesi. Questa è caratterizzata dall'estrema riconfigurabilità in quanto per riuscire a adattarsi all'elevata dinamicità dell'ambiente sottomarino, è stata progettata ed implementata mediante una struttura a livelli con una possibile comunicazione reciproca per poter così variare alcune proprietà dei livelli inferiori mediante alcune funzione dei livelli superiori e viceversa.

Tuttavia essendo dotato di un modem al suo interno non modificabile, non è consentita l'implementazione di nuovi protocolli ed algoritmi di rete e per questo motivo è stato dovuto integrare un processore ulteriore per poter così, mediante l'assegnazione e la modifica delle responsabilità e dei ruoli dei molteplici componenti, bypassare i problemi precedenti e fornire così un sistema programmabile e adatto, di conseguenza, anche alla comunità scientifica per poter fare esperimenti e test anche avanzati.

L'unica limitazione di questo simulatore è l'emulatore del canale in quanto non è molto robusto perché non è del tutto paragonabile al canale subacqueo sottomarino reale e l'unica soluzione valida consiste nell'implementazione ed applicazione delle tecniche di ray tracing ovvero mediante la geometria ottimizzare così la precisione del canale stesso.

## **5.3.2. Simulazione a breve termine**

Di seguito verranno illustrati alcuni esempi di piattaforme di simulazione e sperimentazione a breve termine spiegate nei documenti [Hanjiang 2017].

### **5.3.2.1. Aqua-Net**

Aqua-Net è il primo esempio di piattaforma di simulazione e sperimentazione delle reti UWSN a breve termine. Infatti, questo simulatore può essere utilizzato sia a livello di laboratorio con semplici esperimenti e test, ma anche a livello di campo come, per esempio, è successo nel 2013 nell’oceano Atlantico.

La caratteristica principale di questo simulatore è stata lo sviluppo iniziale ovvero nato solamente per funzionalità a livello di campo senza le funzionalità di simulazione che è stata sviluppata ed implementata solo nella versione successiva Aqua-Net Mate. Per poterlo eseguire sono necessari solamente tre componenti: un computer Linux, un Micro-Modem per la comunicazione ed infine il controller Gumstix.

L’architettura di questo simulatore è quella multilivello, dotata di un database di sistema per poter così memorizzare informazione globali per la successiva condivisione tra i diversi livelli. Inoltre, è caratterizzata dal livello fisico, dove mediante un wrapper ovvero un intermediario software, viene reso disponibile il supporto a molteplici tipologie di modem così per permettere molteplici tipologie di ambiente circostante l’infrastruttura ed un’interfaccia socket per poter così far interfacciare sviluppatori e ricercatori per la sperimentazione di nuovi protocolli e algoritmi di rete.

Nella nuova versione di questo simulatore chiamata Aqua-net Mate vengono aggiunti tre livelli ulteriori alla struttura già presente per poter così integrare le funzionalità mancanti di simulazione includendo così un livello per la gestione del modem virtuale, un altro per la gestione del canale virtuale ed infine l’ultimo per la gestione dell’interfacciamento con Aqua-Net ovvero permettere il collegamento tra la piattaforma fisica e quella di virtuale per la simulazione.

Tuttavia, la caratteristica che rende svantaggioso questo simulatore consiste nel numero di protocolli funzionanti nello stesso momento in un determinato modem, infatti ne è permesso soltanto uno rendendo così molto inefficiente l’uso delle risorse di rete.

### **5.3.2.2. SeaLinx**

SeaLinx è un simulatore delle reti UWSN che si può considerare come un’evoluzione o versione integrativa di quello precedente in quanto è caratterizzato dall’ottimizzazione dell’architettura



multilivello permettendo una comunicazione anche tra livelli non adiacenti e inoltre viene resa possibile l'implementazione ed uso di più protocolli di rete dove ciascuno viene eseguito da un determinato processo e lo si può riavviare o arrestare in caso di problemi ed errori.

Il vantaggio principale di questo simulatore è il suo possibile uso nei sistemi in tempo reale dovuto principalmente all'accuratezza e precisione della pianificazione degli eventi, al supporto di applicativi multiprocesso, all'elevata precisione della temporizzazione ma tutto questo può porre dei limiti ed eventualmente inefficienza come ritardi nei test ed esperimenti dovuto principalmente alla gestione della temporizzazione e degli eventi in tempo reale.

### **5.3.2.3. UnetStack**

UnetStack è un simulatore orientato ai servizi ovvero caratterizzato principalmente da una tipologia architetturale basata non più sull'utilizzo di livelli ma bensì nell'uso di servizi paralleli in esecuzione che comunicano reciprocamente mediante una tipologia richiesta-risposta. Questo significa una maggior facilità ed efficienza nella gestione dell'interconnessione, scambio dei dati in maniera reciproca e elevata capacità di integrare nuove funzionalità in quanto per implementarle bisogna solamente aggiungere un nuovo servizio che le gestisca.

Inoltre la caratteristica principale di questo simulatore è l'utilizzo della JVM ovvero la Java Virtual Machine rendendo così possibile la simulazione di eventi sia discreti che in tempo reale, ma anche un punto di fondamentale importanza ovvero l'importazione ed esportazione di blocchi di codice da e verso altre piattaforme di simulazione e sperimentazione che supportano UnetStack riducendo così il quantitativo di lavoro di implementazione e gestione di nuove funzionalità mantenendo però un'infrastruttura altamente scalabile e duratura.

### **5.3.2.4. Desert**

Desert è una piattaforma di simulazione e sperimentazione opensource come Aqua-Sim e come lui si basa nello stesso simulatore ns-2 con l'eventuale ottimizzazione ns2-Miracle per l'implementazione di nuove funzionalità e una maggior stabilità all'interno della comunicazione cross layer ovvero tra i diversi livelli della sua architettura.

Questo simulatore è caratterizzato da un'architettura multilivello dove in ciascuno è possibile la coesistenza di molteplici moduli per integrare all'interno di ciascuno molteplici funzionalità e per creare così un'infrastruttura altamente modulare e una maggiore facilità nella futura implementazione ed integrazione di nuove funzionalità ciascuna basata su un nuovo modulo integrativo.

Questo simulatore, Desert, è costituito da tre componenti principali, tra le quali si possono osservare i moduli, il core ed infine l'insieme di livelli che ne costituiscono la sua architettura. Inoltre, basandosi su ns-2 e ns2-Miracle, eredita alcune caratteristiche, tra le quali la possibilità di integrare strumenti sia software che hardware aumentando così l'accuratezza dell'ambiente simulato, la sua integrazione in ambiente di test sia a livello di laboratorio che a livello di campo a breve termine ma tuttavia anche un elevato consumo energetico dovuto alle molteplici funzionalità di simulazione ed emulazione.

#### **5.3.2.5. SunSet**

SunSet è anche lui un simulatore opensource basato su ns-2 e ns2-Miracle ed è anche considerato un'ottimizzazione ulteriore del simulatore Desert in quanto integra la possibilità di usare veicoli autonomi subacquei AUV e quelli controllati a distanza ROV, di gestire inoltre un maggior numero di caratteristiche sia fisiche che ambientali dell'area circostante l'infrastruttura di rete ed infine nella nuova versione è stata integrata anche un'ottimizzazione della gestione remota per poter senza l'accesso fisico riconfigurarla ed mantenerla.

La sua architettura è caratterizzata da tre componenti principali: i moduli per l'integrazione di determinate funzionalità, tra le quali i driver per la comunicazione con il modem e lo scheduler per la gestione dell'unico thread disponibile, la gestione dei protocolli di rete e la gestione della simulazione ed emulazione.

Anche SunSet è compatibile sia con la simulazione ed emulazione ma anche con test a livello di campo a breve termine, infatti è stato usato anche per alcuni esperimenti in mare aperto. Tuttavia, questo simulatore ha uno svantaggio principale che consiste nel possedere un unico thread e di conseguenza il funzionamento consiste nel mettere in serie tutte le funzioni necessarie ottenendo così una difficoltà nella sincronizzazione dell'ora e nella gestione in tempo reale.

### **5.3.3. Simulazione a lungo termine**

Di seguito verranno illustrati alcuni esempi di piattaforme di simulazione e sperimentazione a lungo termine che sono state spiegate anche nei documenti spiegate nei documenti [Hanjiang 2017].

#### **5.3.3.1. SeaWeb**

Questo primo esempio di piattaforma di simulazione e sperimentazione delle reti UWSN a lungo termine consiste in SeaWeb, il simulatore più completo e anche il più noto perché usato anche dalla marina degli Stati Uniti. Le sue funzionalità disponibili sono molteplici e alcune tra quelle maggiormente avanzate includono la possibile gestione dei veicoli autonomi subacquei e quella dei

nodi di molteplici priorità e tipologie rendendo così possibile la gestione, la simulazione e l'emulazione di reti anche molto complesse e sofisticate.

Alcuni esempi di applicazioni di questa piattaforma, seppur negli ultimi anni sono state più di 50, sono state le seguenti ovvero una distribuzione a griglia dei nodi vicino a San Diego in California ed un'altra nel Golfo del Messico orientale per poter così monitorare, gestire e mantenere il movimento e la topologia di rete di quella determinata UWSN.

Un punto di fondamentale importanza è stato il meteo in quanto durante quegli esperimenti in mare aperto sono avvenuti due uragani e la rete con i relativi sensori è resistita dimostrando così anche la sua elevata durabilità. Per questo motivo e anche per i risultati ottenuti, questo simulatore sta attirando sempre di più l'attenzione della comunità scientifica ma tuttavia non essendo opensource l'accesso è limitato.

### **5.3.3.2. Ocean-TUNE**

Ocean-TUNE è un simulatore delle reti UWSN a lungo termine accessibile al pubblico e caratterizzato da quattro sotto simulatori che sono sparsi tra le coste est ed ovest degli Stati Uniti per coprire così un'area molto vasta e che possiede molteplici ambienti differenti.

Il primo sotto simulatore, chiamato UCONN è accessibile al pubblico e contraddistinto da un accesso remoto, da un'elevata possibilità di riconfigurazione mediante un'interfaccia grafica e una possibile installazione di molteplici moduli integrativi per avere così un numero più elevato di funzionalità ed infine da una strategia di modulazione e codifica adattive per poter così adattare la topologia di rete e la tipologia di segnale alla variazione dell'ambiente circostante.

Il secondo sotto simulatore, denominato UW, è caratterizzato da una rete di sensori in mare aperto dove quello posizionato in superficie è dotato di sensore RF per la comunicazione con la stazione a terra per poi trasferirli successivamente mediante internet ad un altro server per l'elaborazione e la memorizzazione.

Infine, l'ultimo sotto simulatore, WaterCom, è caratterizzato da una soluzione cloud ovvero mediante una connessione remota è possibile la configurazione e la personalizzazione dei molteplici valori e parametri di rete, avviare, modificare e integrare nuove funzionalità e ottenere sempre così mediante un semplice accesso online l'esito o gli esiti dei test ed esperimenti effettuati.

### **5.3.3.3. SunRise**

SunRise è una piattaforma di simulazione e sperimentazione delle reti UWSN finanziata dall'Unione Europea con lo scopo di ottimizzare l'IoUT ovvero l'internet delle cose sottomarine distribuendo nel

mar Mediterraneo, nei mari adiacenti, nei laghi e nei canali molteplici sotto simulatori e sottoreti dove moltissimi ricercatori e parte della comunità scientifica dove mediante l'accesso remoto può effettuare esperimenti e test riguardo al monitoraggio marino come per esempio possono essere la gestione di un semplice porto oppure la protezione della flora e della fauna acquatiche.

La sua architettura è composta da una rete di nodi sottomarini dove quello centrale è collegato ad una stazione onshore, da un insieme di idrofoni per il collegamento alla terra ferma ed infine un profilatore di corrente ad ultrasuoni posizionato nel fondale per poter così misurare lo spettro dei movimenti e delle variazioni dell'ambiente acquatico.

Una caratteristica principale di questo simulatore è il software OpenVPN usato per la connessione remota per poter così gestire, modificare, integrare nuove funzionalità, elaborare dati, gestire i molteplici protocolli del livello MAC e livelli superiori semplicemente mediante una connessione VPN. L'unico svantaggio è che l'accesso a questa piattaforma è molto limitato in quanto bisogna chiederne il permesso allo Science and Technology Organisation - Centre for Maritime Research and Experimentation (STO CMRE).

## 6. Conclusioni e sviluppi futuri

Quest'ultimo capitolo illustra le conclusioni, le diverse sfide ancora aperte, le ricerche future ed un esempio di progetto attualmente in uso in questo ambito. Questo è stato possibile solo dopo aver studiato le reti di sensori acustici in ambito sottomarino suddividendo la loro analisi in diversi punti, discussi nei vari capitoli della tesi.

In particolare:

- Il primo capitolo ha introdotto le UWSN discutendo anche le problematiche principali e le molteplici applicazioni e servizi;
- Il secondo capitolo ha illustrato la struttura delle reti sottomarine partendo da quali sono le sue componenti, le diverse tipologie di architettura fino ad arrivare alle molteplici topologie di reti, alle tipologie di segnale maggiormente utilizzate e ai diversi criteri di progettazione;
- Il terzo capitolo ha illustrato i protocolli di instradamento suddividendoli in relazione al livello di appartenenza del modello ISO/OSI, ovvero nella prima parte quelli appartenenti al sottolivello MAC e nella seconda parte quelli appartenenti al livello network.
- Il quarto capitolo ha introdotto alcuni indici di prestazione per questa tipologia di rete analizzando principalmente il consumo energetico, l'affidabilità e il ritardo, il throughput e la possibilità di perdita del percorso e di pacchetti.
- Infine, il quinto capitolo ha illustrato le piattaforme di simulazione e sperimentazione discutendone le componenti, i criteri di progettazione da soddisfare per concludere con la loro suddivisione in relazione al livello d'uso ovvero se a livello di laboratorio, se a breve termine oppure a lungo termine.

Di seguito verranno illustrate le sfide ancora aperte e le ricerche future in questo ambito.

### 6.1. Le sfide aperte e le ricerche future

Come illustrato nei documenti [Hanjiang 2017], [Felemban 2015], [Rabaie 2015] e [Ahmed 2016], sono molte le sfide ancora aperte e molti gli sviluppi futuri interessanti, dovuti principalmente alle molteplici differenze tra la comunicazione terrestre e sottomarina, alle caratteristiche e proprietà dell'ambiente marino, anche in relazione alla tipologia di segnale implementata all'interno di tali infrastrutture.

Infatti, questi tre punti sono stati ampiamente illustrati in questa tesi nei paragrafi 1.2 e 2.4. Di seguito mostriamo alcuni esempi di sfide fondamentali per focalizzare e determinare la ricerca futura delle UWSN.

- Il primo punto fondamentale per qualunque infrastruttura di rete consiste nella distribuzione dei nodi per poter così progettare e implementare una rete dove i nodi all'interno dell'area circostante l'infrastruttura siano distribuiti in maniera equilibrata per evitare così congestioni e colli di bottiglia. Inoltre, essendo questa tipologia di interconnessione in ambiente marino, quest'ultima operazione non risulta semplice in quanto questa tipologia di ambiente è caratterizzata da un'elevata dinamicità dovuta principalmente alle molteplici correnti marine, agli agenti marini, alle imbarcazioni, alle profondità irregolari e molto altro. Per tali motivi la ricerca, lo sviluppo e l'implementazione di algoritmi di distribuzione dei nodi in maniera efficiente ed auto adattativa alle condizioni dell'ambiente rimane tutt'ora una sfida ancora aperta;
- Il secondo punto fondamentale per la progettazione ed implementazione delle reti sottomarine consiste nel consumo energetico in quanto solitamente le sue componenti sono dotate solamente di semplici batterie e di conseguenza la durata è molto limitata ed è anche inversamente proporzionale al numero di funzionalità implementate all'interno della rete e alla quantità di tempo che ciascun nodo rimane in uno stato pronto per soddisfare tutte le richieste. Inoltre, la comunicazione all'interno dell'ambiente marino essendo caratterizzata da effetto doppler, dal multipath, dal rumore e dall'elevata attenuazione ha bisogno di complesse funzioni e tecniche di elaborazione del segnale e queste rappresentano un'ulteriore causa del maggior consumo energetico. Per questo motivo la ricerca futura deve basarsi nella focalizzazione di risorse alternative e conversioni di energia come, per esempio, può essere il movimento dell'acqua trasformato successivamente in elettricità per ricaricare le batterie. Un'ulteriore idea, che viene illustrata sempre nei documenti precedentemente specificati, suggerisce anche una ricerca futura nella ricarica dei singoli nodi mediante l'energia solare usando sia i veicoli autonomi subacquei ma anche un impianto di ricarica sopra la superficie dell'acqua per poter così effettuare degli scambi di nodi scarichi-carichi senza accedere all'infrastruttura di rete in maniera fisica con gli elevati costi di cui è caratterizzato;
- Un'ulteriore punto fondamentale per le reti sottomarine consiste nella protezione delle componenti che costituiscono l'intera infrastruttura di rete in quanto quest'ultime vengono posizionate in fase di progettazione ed implementazione al di sotto della superficie dell'acqua e di conseguenza con il passare del tempo sono soggette a molteplici incrostazioni e corrosioni e per tale motivo la ricerca futura consiste nel focalizzarsi nella scelta e nella

progettazione di nuovi materiali adatti alle caratteristiche e alle molteplici problematiche dell'ambiente marino;

- Una funzionalità innovativa che è indispensabile nelle nuove infrastrutture di rete consiste nell'implementazione di strategie di accesso remoto alle risorse, agli strumenti e alle singole componenti dell'infrastruttura di rete in quanto l'accesso fisico non è sempre consentito ed è spesso caratterizzato da un costo elevato in quanto se viene considerata un'infrastruttura su larga scala il luogo dove essa viene installata è l'oceano. Per tale motivo la ricerca futura consiste nell'implementazione di nuove strategie, tecniche e protocolli di accesso remoto per far sì che mediante una semplice connessione ad Internet si possano eseguire anche le più complesse operazioni come la configurazione, l'integrazione di nuove funzionalità, il mantenimento e molte altre;
- Una caratteristica dell'ambiente sottomarino è l'elevata dinamicità dovuta principalmente agli agenti marini, alle correnti marine, al passaggio di imbarcazioni, al fondale caratterizzato dalle differenti profondità e materiali ed infine al movimento dei nodi. Per tali motivi un passo avanti nella gestione delle tecniche e strategie di controllo della topologia e dell'architettura consiste nell'integrazione dell'intelligenza artificiale permesso dall'incremento delle capacità computazionali di ciascuna componente e dal progresso dell'AI. Un primo esempio potrebbe essere la progettazione ed integrazione di tecniche ed algoritmi orientati all'apprendimento, all'auto adattabilità e al deep learning per poter così creare e mantenere un'infrastruttura di rete caratterizzata dall'elevata dinamicità e scalabilità;
- Un ulteriore punto fondamentale per la gestione del consumo e del risparmio energetico consiste nell'integrazione e nello sviluppo di tecniche e strategie di sleep e wake up efficienti ovvero nell'inclusione della gestione dell'attivazione e sospensione di ciascuna componente quando viene rilevata o non rilevata attività. Tuttavia, queste tecniche sono molto complesse da progettare, implementare e gestire in quanto bisogna prendere in considerazione anche eventuali trasmissioni sincrone, cercare di evitare le congestioni e i colli di bottiglia e integrare in maniera efficiente e programmata eventuali fasce orarie con la relativa gestione della sincronizzazione dell'ora anche se molto complessa a causa della velocità del suono, della degradazione del segnale e del lungo ritardo di propagazione;
- Un'altra sfida per la progettazione delle reti sottomarine consiste nella gestione delle diverse problematiche e dei molteplici limiti dovuti all'ambiente in cui esse vengono installate.
  - Il primo limite consiste nella tipologia di segnale che viene usata al loro interno e il segnale acustico, come è stato ampiamente discusso nel paragrafo 2.4., rappresenta

l'unica maniera per poter comunicare in maniera reciproca tra le diverse componenti in ambiente marino ma tuttavia soffre di propagazione multipath, di effetto doppler, di elevato rumore e distorsione e per tali motivi il segnale acustico degrada in relazione alla distanza da percorrere;

- Un altro punto fondamentale da prendere in considerazione è il fatto che la memoria e le capacità di elaborazione sono limitate in relazione alla quantità di alimentazione di ciascuna componente e per questo motivo durante la progettazione ed implementazione delle molteplici funzionalità bisogna limitare elaborazione complesse che possono richiedere un maggior numero di risorse computazionali per poter così aumentare la durata dell'intera infrastruttura di rete;
- Un'ulteriore punto consiste nella localizzazione e nella gestione della densità dei nodi. Questo è dovuto principalmente all'elevata dinamicità dell'ambiente marino e al conseguente elevato movimento dei nodi appartenenti all'infrastruttura di rete con possibili regioni dove il relativo numero di nodi è estremamente ridotto o nullo con possibili ritardi e perdite di percorso e di pacchetti e in quelle con un maggior numero con possibili congestioni ed un maggior numero di elaborazioni.

Per tale motivo una sfida ancora aperta è quella della progettazione ed implementazione di tecniche, strategie ed algoritmi per ottimizzare e massimizzare l'efficienza della gestione del segnale acustico, della gestione dell'uso delle risorse computazionali ed infine nella gestione della localizzazione ed interconnessione tra le molteplici e diverse componenti dell'intera infrastruttura di rete.

- Infine, l'ultima sfida aperta nelle piattaforme di simulazione e sperimentazione consiste nella definizione degli standard, delle linee guida e delle diverse metriche di prestazione per il loro confronto come, per esempio l'accuratezza della simulazione, la scalabilità, l'accesso gratuito, i costi di implementazione, l'efficienza energetica, l'auto adattabilità e molto altro. Per tale motivo, a causa della loro diversificata predisposizione, molteplici usi e differenti risultati è molto complesso e rimane tutt'ora una sfida ancora aperta lo studio di un confronto efficiente ed equo tra le molteplici piattaforme di simulazione e sperimentazione.

## 6.2. Sensls project

Un esempio di progetto attuale per le reti di sensori sottomarini consiste nel Sensls project che viene illustrato nel documento [Reinen 2016]. Quest'ultimo è stato progettato ed implementato per effettuare il monitoraggio del ghiaccio nell'Artico in quanto l'ambiente circostante è caratterizzato da banchi e creste di ghiaccio molto spesse.



Di conseguenza l'architettura è stata la seguente ovvero l'adozione di strumenti ecografici che sfruttando il segnale ad ultrasuoni e una posizione fissa nel fondale marino monitorano così dal basso verso l'alto le molteplici caratteristiche dell'ambiente circostante l'infrastruttura di rete quali lo spessore del ghiaccio, il movimento delle lastre di ghiaccio e il flusso delle correnti marine.

Per permettere tutto ciò si è dovuto studiare una tipologia architeturale a forma di cerchio multilivello mediante un'ulteriore installazione di un modem acustico all'interno di ciascun nodo consentendo così anche l'interconnessione tra le diverse componenti dell'infrastruttura di rete e un esempio di quanto detto lo si può osservare nella figura 18.

Tuttavia, per poter progettare e implementare un progetto di questa tipologia e spessore è stato molto importante prendere in considerazione anche molteplici fattori, tra i quali si possono osservare:

- La possibilità di molteplici tipologie di misurazioni come ad esempio una modalità normale, una operativa ed infine una per un eventuale rischio aumentando così il numero di misurazioni in un determinato range di tempo;
- L'elevata dinamicità sia dell'ambiente marino che dei fenomeni da osservare come per esempio il movimento di un iceberg e di conseguenza riuscire ad applicare delle strategie per l'auto adattamento dell'intera infrastruttura di rete;
- La capacità di elaborazione e di memorizzazione dei dati e di minimizzazione del ritardo dovuta alle molteplici tipologie di misurazione dei dati e di conseguenza riuscire a creare un'infrastruttura che tollera e risolve eventuali congestioni.

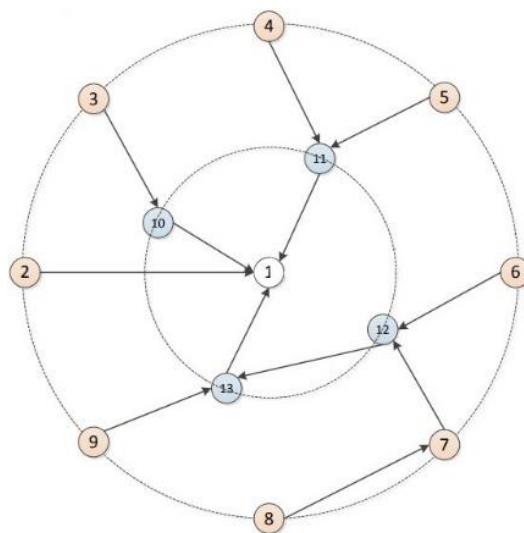


Figura 18: Esempio di architettura in Sensles project

## 6.3. Conclusioni

In questa tesi abbiamo illustrato le reti di sensori wireless in ambito marino analizzandole sotto molteplici punti caratteristici, come l'architettura, la tipologia di segnale usata, i protocolli di routing, le sfide aperte, le piattaforme di simulazione e altri aspetti e per una panoramica completa facciamo riferimento al capitolo 6 di questa tesi.

Come è stato illustrato nel capitolo 1, le UWSN rappresentano un sottoinsieme e allo stesso tempo una specializzazione delle reti di sensori in ambito marino e per tale motivo e anche per i differenti casi d'uso, questa nuova tipologia di interconnessione marina è caratterizzata da problematiche e sfide completamente diverse che sono state illustrate ed ampiamente spiegate all'interno di questa tesi nelle sezioni 1.2 e 6.1.

In passato questo tipo di rete veniva gestita solamente con una semplice riprogettazione delle tecniche per le WSN terrestri adattandole all'ambiente marino, ma negli ultimi anni si è evoluta la ricerca di una specifica progettazione e implementazione con tecniche, strategie ed algoritmi appositamente studiati per l'ambiente marino.

## Indice delle figure

Figura 1: Comunicazione sottomarina cablata .....	7
Figura 2: Componenti di un sensore sottomarino .....	12
Figura 3: Esempio di architettura 2d.....	17
Figura 4: Esempio di architettura 3d statica .....	18
Figura 5: Esempio di architettura 3d dinamica .....	19
Figura 6: Esempio di topologia di rete centralizzata.....	20
Figura 7: Esempio di topologia distribuita .....	22
Figura 8: Esempio di rete multi hop.....	24
Figura 9: Esempio di FDMA .....	30
Figura 10: Esempio di TDMA.....	32
Figura 11: Esempio di CDMA.....	34
Figura 12: Esempio di SDMA .....	36
Figura 13: Esempio di Aloha.....	37
Figura 14: Esempio di protocollo vector based .....	46
Figura 15: Esempio di protocollo depth based .....	49
Figura 16: Esempio di protocollo clustered based.....	53
Figura 17: Esempio di protocollo AUV based.....	55
Figura 18: Esempio di architettura in Sensles project .....	81

# Indice delle tabelle

Tabella 1: Lista di applicazioni e servizi delle UWSN con relativi esempi.....10

# Indice degli acronimi

ARQ	
Automatic Repeat Request.....	39
AUV	
Autonomous UnderWater vehicle .....	18
CDMA	
Code Division Multiple Access.....	29
CRC	
Cyclic Redundancy Check .....	39
CSMA/CA	
Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance.....	29
CSMA/CD	
Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection.....	29
C-VBF	
Cluster Vector Based Forwarding.....	48
DBR	
Depth Based Routing.....	49
D-DBR	
Directional Depth Based Routing .....	50
DS-DBR	
Delay Sensitive Depth Based Routing.....	50
DSEE-DBR	
Delay Sensitive Energy Efficient Depth Based Routing .....	51
DSM-DBR	
Dynamic Sink Mobility Depth Based Routing.....	52
DUCS	
Distributed Underwater Clustering Scheme .....	54
EE-DBR	
Energy Efficient Depth Based Routing.....	50
ES-VBF	
Energy Saving Vector Based Forwarding.....	47
FEC	
Forward Error Correction .....	42
Frequency Division Multiple Access.....	29
HARQ	
Hybrid Automatic Repeat Request.....	43
HH-VBF	

Hop by Hop Vector Based Forwarding .....	47
HydroCast	
Hydraulic Pressure Based Any cast Routing .....	53
IoUT	
Internet of UnderWater Things .....	9
MAC	
Media Access Control .....	28
ROV	
Remotely Operated Vehicle .....	18
SDM	
Software Defined Radio.....	64
SDMA	
Space Division Multiple Access.....	34
STO-CMRE	
Science and Technology Organisation - Centre for Maritime Research and Experimentation .....	76
TDMA	
Time Division Multiple Access .....	29
UWSN	
UnderWater Sensor Network.....	5
VBF	
Vector Based Forwarding .....	46
WHOI	
Woods Hole Oceanographic Institution .....	65
WSN	
Wireless Sensor Network .....	5

## Bibliografia

1. [Ahmed 2016] Mukhtiar Ahmed Memon. Mazleena Salleh. Muhammad Ibrahim Channa. Routing Protocols Based on Node Mobility for Underwater Wireless Sensor Network (UWSN): A Survey. Journal of Network and Computer Applications. Vol. 78. November 2016.
2. [Ahmed 2017] Mukhtiar Ahmed. Mazleena Salleh. M. Ibrahim Channa. Mohd Foad Rohani. Energy Efficient Routing Protocols for UWSN: A Review. Telkomnikat. Vol. 15. N. 1. March 2017.
3. [Akbar 2015] Mariam Akbar. Tesi di dottorato in ingegneria elettronica. On Network Lifetime Maximization in Wireless Sensor Networks with Sink Mobility. COMSATS Institute of Information Technology. Fall 2015.
4. [Ayaz 2016] Beenish Ayaz. Tesi di dottorato in Improving Routing Performance of Underwater Wireless Sensor Networks. University of Aberdeen. June 2016.
5. [Balsamo 2017] S. Balsamo. D. Fiems. M. Jafri. A. Marin. Analysis of performance in depth based routing for underwater wireless sensor networks. Proceedings of InfQ 2017 – New Frontiers in Quantitative Methods in Informatics, In conjunction with 11th EAI International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools. December 2017.
6. [Balsamo 2018] S. Balsamo. D. Fiems. M. Jafri. A. Marin. Analysis of Performance in Depth Based Routing for Underwater Wireless Sensor Networks. New Frontiers in Quantitative Methods in Informatics. Vol 825. May 2018.
7. [Coutinho 2018] Rodolfo W. L. Coutinho, Azzedine Boukerche, Luiz Filipe Menezes Vieira, Antonio Alfredo Ferreira Loureiro. Underwater Wireless Sensor Networks: A New Challenge for Topology Control-Based Systems. ACM Computing Surveys. N. 19. January 2018.
8. [Delphin 2020] Delphin Raj. Jinyoung Lee. Eunbi Ko. Soo-Young Shin. Jung-II Namgung. Sun-Ho Yum. Soo-Hyun Park. Underwater Network Management System in Internet of Underwater Things: Open Challenges, Benefits, and Feasible Solution. Electronics. N. 9. July 2020.
9. [Felemban 2015] Emad Felemban, Faisal Karim Shaikh, Umair Mujtaba Qureshi, Adil A. Sheikh, Saad Bin Qaisar. Underwater Sensor Network Applications: A Comprehensive Survey. International Journal of Distributed Sensor Networks. Vol. 1. N. 14. November 2015.

10. [Grasso 2016] R. Grasso; P. Braca; S. Fortunati; F. Gini; M. S. Greco. Dynamic underwater glider network for environmental field estimation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. Vol. 52. N. 1. February 2016.
11. [Hanjiang 2017] Hanjiang Luo, Kaishun Wu, Rukhsana Ruby, Feng Hong, Zhongwen Guo, Lionel Ni. Simulation and Experimentation Platforms for Underwater Acoustic Sensor Networks: Advancements and Challenges. *ACM Computing Surveys*. N. 28. May 2017.
12. [Heidemann 2012] John Heidemann, Milica Stojanovic and Michele Zorzi. Underwater sensor networks: Applications, advances and challenges. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*. N. 370. January 2012.
13. [Hong 2006] Jun-Hong Cui. Jiejun Kong. M. Gerla. Shengli Zhou. The challenges of building mobile underwater wireless networks for aquatic applications. *IEEE Network*. V. 20. N. 3. June 2006.
14. [Jouhari 2019] Mohammed Jouhari. Khalil Ibrahimi. Hamidou Tembine. Jalel Ben-Othman. Underwater Wireless Sensor Networks: A Survey on Enabling Technologies, Localization Protocols, and Internet of Underwater Things. *IEEE*. Vol. 7. July 2019.
15. [Khalid 2019] Khalid Mahmood Awan. Peer Azmat Shah. Khalid Iqbal. Saira Gillani. Waqas Ahmad. Yunyoung Nam. Underwater Wireless Sensor Networks: A Review of Recent Issues and Challenges. *Wireless Communications and Mobile Computing*. N. 3. January 2019.
16. [Lianyou 2017] Lianyou Jing; Chengbing He; Jianguo Huang; Zhi Ding. Energy Management and Power Allocation for Underwater Acoustic Sensor Network. *IEEE Sensors Journal*. Vol. 17. N. 19. October 2017.
17. [Malakoff 2004] David Malakoff. Panel to Prepare Plan for Underwater Network. *Science* 16. Vol. 303. N. 5656. January 2004.
18. [Mateen 2019] Mateen, A.; Awais, M.; Javaid, N.; Ishmanov, F.; Afzal, M.K.; Kazmi, S. Geographic and Opportunistic Recovery with Depth and Power Transmission Adjustment for Energy-Efficiency and Void Hole Alleviation in UWSNs. *Sensors* 2019. Vol 19. February 2019.
19. [Ozan 2012] Ozan Bicen A., Behzat Sahin A., Akan Ozgur B. Spectrum-aware underwater networks. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Vol. 7, june 2012.
20. [Rabaie 2015] S. EL- Rabaie, D. Nabil, R. Mahmoud, Mohammed A. Alsharqawy. Underwater Wireless Sensor Networks (UWSN), Architecture, Routing Protocols, Simulation and



Modeling Tools, Localization, Security Issues and Some Novel Trends. International Journal of Networking and Communication Engineering. Vol 7, N. 8, 2015.

21. [Raza Jafri 2019] Muhammad Mohsin Raza Jafri. Tesi di dottorato in Analysis and Optimisations in Depth-based routing for Underwater Sensor Networks. Università Cà Foscari di Venezia. 2019.
22. [Reinen 2016] Tor Arne Reinen, Arne Lie, Finn Tore Knudsen. SensIs - Underwater acoustic network for ice-monitoring. Proceedings of the 39th Scandinavian Symposium on Physical Acoustics, Norway, Jan. 31 – Feb. 3, 2016.
23. [Rossi 2012] Rossi Marco. Tesi di laurea in Ingegneria dell'Informazione. Titolo: tecniche arq per reti acustiche sottomarine. Università degli Studi di Padova. 2012.
24. [Shengming 2018] Shengming Jiang. On Reliable Data Transfer in Underwater Acoustic Networks: A Survey From Networking Perspective. IEEE Communications Surveys & Tutorials. Vol. 20, N. 2, Secondquarter 2018.
25. [Sozer 2000] E.M. Sozer. M. Stojanovic. J.G. Proakis. Underwater acoustic networks. IEEE Journal of Oceanic Engineering. Vol. 25. N. 1. January 2000.
26. [Verma 2015] Seema Verma, Prachi Chaudhary. Communication Architecture for Underwater Wireless Sensor Network. Computer Network and Information Security. N. 6. May 2015.