Immagine che contiene testo

Descrizione generata automaticamente

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

**SOMMARIO**

[1. Abstract 3](#_Toc67218036)

[2. Reti subacquee 4](#_Toc67218037)

[**2.1.** **Introduzione** 4](#_Toc67218038)

[**2.1.1.** **L’evoluzione** 5](#_Toc67218039)

[**2.1.2.** **Problematiche principali** 5](#_Toc67218040)

[**2.1.3.** **Applicazioni e servizi** 6](#_Toc67218041)

[**2.2.** **I componenti della rete** 7](#_Toc67218042)

[**2.2.1.** **Il nodo o sensore sottomarino** 7](#_Toc67218043)

[**2.2.2.** **Gestione raccolta dei dati** 9](#_Toc67218044)

[**2.2.3.** **Gestione inoltro dei dati** 10](#_Toc67218045)

[**2.2.4.** **Gestione elaborazione dei dati** 10](#_Toc67218046)

[**2.2.5.** **Sottosistema di gestione dei dati e di supporto decisionale** 11](#_Toc67218047)

[**2.3.** **L’architettura delle reti** 12](#_Toc67218048)

[**2.3.1.** **L’architettura 2d** 12](#_Toc67218049)

[**2.3.2.** **L’architettura 3d** 13](#_Toc67218050)

[**2.3.3.** **L’architettura 3d statica** 13](#_Toc67218051)

[**2.3.4.** **L’architettura 3d dinamica** 14](#_Toc67218052)

[**2.4.** **Topologia di rete** 15](#_Toc67218053)

[**2.4.1.** **Topologia centralizzata** 16](#_Toc67218054)

[**2.4.2.** **Topologia distribuita** 17](#_Toc67218055)

[**2.4.3.** **Topologia multi hop** 18](#_Toc67218056)

[**2.5.** **Tipologia di segnali** 19](#_Toc67218057)

[**2.5.1.** **Segnale radio** 20](#_Toc67218058)

[**2.5.2.** **Segnale ottico** 20](#_Toc67218059)

[**2.5.3.** **Segnale acustico** 21](#_Toc67218060)

[**2.6.** **I criteri di progettazione** 21](#_Toc67218061)

[3. I protocolli delle UWSN 23](#_Toc67218062)

[**3.1.** **MAC: Media Access Control** 23](#_Toc67218063)

[**3.1.1.** **Protocolli basati su divisione del canale** 24](#_Toc67218064)

[**3.1.1.1.** **FDMA (Frequency Division Multiple Access)** 24](#_Toc67218065)

[**3.1.1.2.** **TDMA (Time Division Multiple Access)** 25](#_Toc67218066)

[**3.1.1.3.** **CDMA (Code Division Multiple Access)** 27](#_Toc67218067)

[**3.1.1.4.** **SDMA (Space Division Multiple Access)** 28](#_Toc67218068)

[**3.1.2.** **Protocolli ad accesso casuale** 30](#_Toc67218069)

[**3.1.2.1.** **Aloha** 30](#_Toc67218070)

[**3.1.2.2.** **CSMA (Carrier Sense Multiple Access)** 31](#_Toc67218071)

[**3.1.3.** **ARQ (Automatic Repeat Request)** 33](#_Toc67218072)

[**3.1.4.** **FEC (Forward Error Correction)** 35](#_Toc67218073)

[**3.2.** **Protocolli di routing** 37](#_Toc67218074)

[**3.2.1.** **Protocolli localization free** 38](#_Toc67218075)

[**3.2.2.** **Protocolli localization based** 38](#_Toc67218076)

[**3.2.3.** **Protocolli vector based** 39](#_Toc67218077)

[**VBF** 40](#_Toc67218078)

[**HH-VBF** 40](#_Toc67218079)

[**VBVA** 40](#_Toc67218080)

[**ES-VBF** 40](#_Toc67218081)

[**CVBF** 40](#_Toc67218082)

[**3.2.4.** **Protocolli depth based** 40](#_Toc67218083)

[**3.2.5.** **Protocolli clustered based** 41](#_Toc67218084)

[**3.2.6.** **Protocolli AUV based** 42](#_Toc67218085)

[**3.2.7.** **Protocolli Path based** 42](#_Toc67218086)

[4. Analisi e valutazione delle prestazioni 44](#_Toc67218087)

[5. Progetti attuali e sviluppi futuri 44](#_Toc67218088)

[6. Indice delle figure 45](#_Toc67218089)

[7. Indice delle tabelle 46](#_Toc67218090)

[8. Indice degli acronimi 47](#_Toc67218091)

[9. Bibliografia 48](#_Toc67218092)

# **Abstract**

In questa tesi si tratterà l’argomento delle reti sottomarine, o meglio Underwater Sensor Networks (UWSN). Verranno introdotti tutti i loro aspetti fondamentali a partire dalle applicazioni e relativi servizi, le varie problematiche, le componenti, le architetture e le relative topologie fino ad arrivare alle tipologie di segnali usati, alla gestione dei protocolli, ai criteri di progettazione, alla valutazione delle prestazioni e ad un’eventuale applicazione dell’Internet of Underwater Things (IoUT).

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 e la loro struttura, progettazione, design e componenti dipendono dall’ambiente in cui vengono richieste ed implementate.

Per questi motivi osserviamo che le Wireless Sensor Networks (WSN) si suddividono principalmente in: WSN terrestri (il monitoraggio ambientale, sorveglianza militare), WSN sotterranee (prevenzione catastrofi, gestione estrazione da giacimenti), WSN multimediali (implementazione di audio e video mediante microfoni e telecamere) e WSN subacquee (raccolta dati oceanografici e gestione stazioni offshore).

Quest’ultima tipologia è nata principalmente per fornire analisi dei dati in tempo reale in quanto prima avveniva mediante deposito di un dispositivo di memorizzazione sotto il livello del mare e solo successivamente raccolti e analizzati ma questo non poteva fornire previsioni real-time. Per questo motivo sono state implementate le reti di sensori wireless WSN anche in ambito marino prendendo il nome di Underwater Sensor Networks (UWSN) ma ci sono ancora molte sfide aperte.

# **Reti subacquee**

## **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.

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

Immagine che contiene mappa

Descrizione generata automaticamente

Figura 1: Comunicazione sottomarina cablata

### **L’evoluzione**

Di conseguenza, negli ultimi anni ci si sta portando verso questo nuovo tipo di interconnessione, monitoraggio ed elaborazione basato su un sistema distribuito di nodi wireless, che si chiamano sensori, denominato Wireless Sensor Network (WSN).

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. **Problematiche principali**

La figura 1 mostra la topologia di comunicazione usata in ambito sottomarino fino ad oggi e si può osservare che è prevalentemente quella via cavo o cablata. Questo lo si può vedere tramite gli archi 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 con la comunicazione terrestre sono elevate. 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 dovuto 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 architetturali, 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. **Applicazioni e servizi**

Come viene descritto nel documento 5 alcuni esempi di applicazioni e servizi per reti sottomarine spaziano su molti campi, fra i quali, a titolo esemplificativo: 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.

La tabella 1 mostra alcuni esempi per ciascuna tipologia di applicazione e/o servizio.

|  |  |
| --- | --- |
| **Categoria** | **Esempi** |
| 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

* 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.

* + 1. **Il nodo o sensore sottomarino**

Un nodo rappresenta un’unità di elaborazione, di archiviazione, 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.

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 4 mostra la relazione tra questi quattro componenti. Si osservano principalmente due parti. La prima è quella centrale che corrisponde all’unita 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 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

L’infrastruttura delle UWSN è composta da quattro componenti principali: 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.

* + 1. **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.

* + 1. **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 significato 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.

* + 1. **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.

* + 1. **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.

* 1. **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 architetturali: l’architettura 2d, l’architettura 3d statica e l’architettura 3d dinamica.

* + 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 architetturale 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

* + 1. **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 architetturale si suddivide in due modelli diversi, il primo statico e il secondo dinamico, il secondo evoluzione del primo.

* + 1. **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 architetturale 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

* + 1. **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 variarne 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

* 1. **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.

* + 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 acquee 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. Il secondo svantaggio consiste nella 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.

* + 1. **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. Quello principale consiste nella concorrenza e 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. Il secondo è caratterizzato da un’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. Un altro vantaggio consiste nell’integrazione ed eterogeneità in quanto questi sistemi sono in grado di far comunicare stazioni eterogenee sfruttando canali di comunicazioni comuni. Un ultimo vantaggio a titolo esemplificativo è la scalabilità, ossia la possibilità di ampliare il numero di componenti e tipo per far crescere il sistema, senza doverne cambiare struttura e protocolli.

Alcuni svantaggi sono i seguenti. Il più importante consiste nella progettazione del software in quanto bisogna gestire comunicazioni sincronizzate, esecuzione concorrente e di conseguenza bisogna gestire standard di comunicazione e standard per la multipiattaforma. Un altro svantaggio è dovuto alla 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. Un ultimo esempio potrebbe essere 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.

* + 1. **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

* 1. **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.

* + 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.

* + 1. **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.

* + 1. **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 questi 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. Un altro problema è 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. Un altro problema è dovuto al 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. Come ultimo problema ricordiamo 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.

## **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 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.

# **I protocolli delle UWSN**

Come spiegato 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 momento T, potrebbero non essere più presenti in un altro momento 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.

## **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.

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 suddivisone 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 ogni T tempo. Per questo motivo se due o più stazioni trasmettono nello stesso istante di tempo nel canale non c’è più un singolo frame ma bensì due o più e una conseguenza di tutto ciò è la collisione con una eventuale ritrasmissione futura. Alcune migliorie possono essere le seguenti quali 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 possono essere i seguenti: Aloha, CSMA, CSMA/CD e CSMA/CA.

* + 1. **Protocolli basati su divisione del canale**
       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.

Un esempio di questa tipologia la si può vedere nella figura 9. Si può osservare che la banda originale viene suddivisa in tre sottobande quali f0, f1 e f2 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 si parlerà di un suo uso abbinato ad altri protocolli per renderlo maggiormente efficiente.

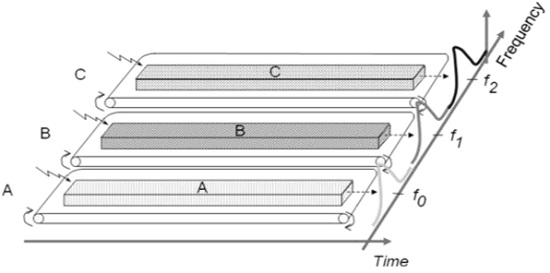
****

Figura 9: Esempio di FDMA

* + - 1. **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.

Un esempio di questo protocollo lo si può vedere nella figura 10. Si può osservare che è presente un unico canale di trasmissione con l’intera larghezza di banda disponibile con frequenza f0. 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 altrimenti si avrebbero delle interferenze.

Alcuni vantaggi di questa tipologia possono essere i seguenti quali 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 ed infine è consentita la gestione dinamica dell’assegnazione degli slot temporali in relazione alla durata e alla frequenza.

Tuttavia, alcuni svantaggi possono essere i seguenti quali 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 ed infine una elaborazione maggiore per la sincronizzazione delle trasmissioni.

Questa tipologia di protocollo in ambiente marino non è adatta. Questo lo si può comprendere dai seguenti motivi quali 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. Alcune conseguenze potrebbero essere le seguenti quali la gestione della temporizzazione mediante l’invio di segnali periodici e la 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 ma nei prossimi paragrafi si parlerà di un suo uso abbinato ad altri protocolli per renderlo maggiormente efficiente.

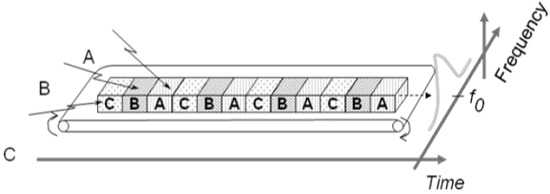
****

Figura 10: Esempio di TDMA

* + - 1. **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 lo si può vedere nella figura 11. Si può osservare che il canale è unico per tutte le trasmissioni ed è accessibile mediante un’unica frequenza f0 ed inoltre tutti i sottocanali di trasmissione Channel1, Channel2, …, Channeln sono allocati nello stesso tempo t e sono identificabili mediante i codici assegnati ai relativi trasmettitori.

Come tutti i protocolli anche questo ha dei vantaggi che sono i seguenti: 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 ed infine 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 ed infine 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.

Una soluzione di tutto ciò potrebbe essere rappresentata dall’implementazione di 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. Di conseguenza 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.

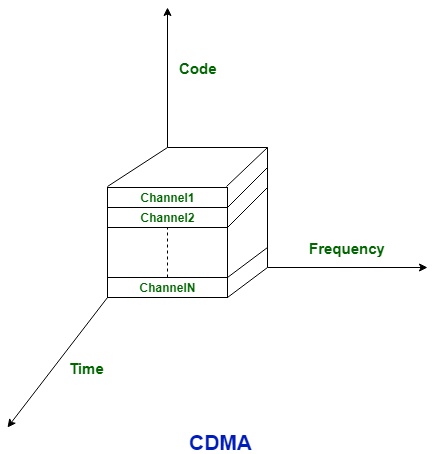


Figura 11: Esempio di CDMA

* + - 1. **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.

Un esempio di questo protocollo lo si può vedere nella figura 12. Si può osservare che sono presenti molteplici canali tra i quali 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 potrebbe essere il seguente ovvero 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 t. Un ulteriore esempio potrebbe essere il seguente ovvero l’implementazione dei protocolli TDMA e FDMA allo stesso tempo. Questo significa che ciascun canale presente nell’infrastruttura di rete trasmette su una frequenza diversa e ciascun elaboratore interno a quella relativa zona può trasmette in alcuni determinati intervalli di tempo.

Questo protocollo ha i seguenti vantaggi quali 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 ed infine un possibile uso di antenne direzionali per avere una ottimizzazione del flusso del segnale.

Tuttavia, anche questo protocollo ha alcuni svantaggi tra i quali si possono osservare 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 ed infine 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 di tutto ciò è una combinazione tra SDMA e CDMA e questo prende il nome di Dynamic Space Code Multiple Access (DSCMA). Con questo nuovo protocollo si avrà una ulteriore tipologia di associazione ossia utente-spazio-tempo-codice. Una conseguenza di tutto ciò è la possibilità di rappresentare una promettente tecnica di accesso multiplo al canale condiviso in ambito marino superando i limiti e le problematiche descritte nei paragrafi precedenti.

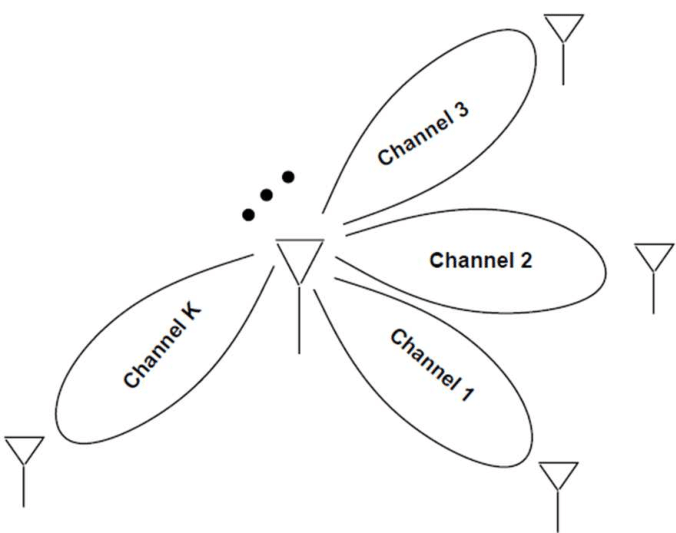


Figura 12: Esempio di SDMA

### **Protocolli ad accesso casuale**

* + - 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.

Un esempio di questo protocollo lo si può vedere nella figura 13. Si può osservare che sono presenti 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 e questo perché maggiore è la quantità di pacchetti da trasmettere minore sarà la quantità di slot liberi per la trasmissione e tutto 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 dei seguenti problemi quali il ritardo di propagazione del segnale, la tipologia di segnale da usare ed infine il risparmio energetico. Per tale motivo il protocollo Aloha con un eventuale miglioramento applicando lo Slotted Aloha non è adatto alle reti sottomarine e nel prossimo paragrafo si parlerà di una nuova tecnica maggiormente efficiente.

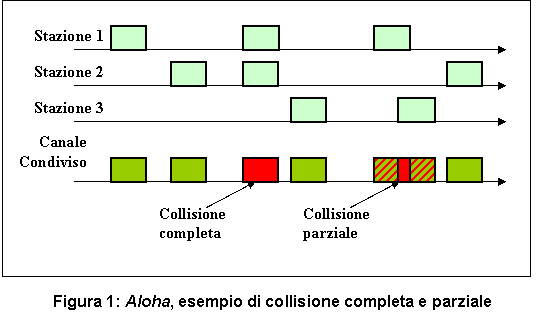


Figura 13: Esempio di Aloha

* + - 1. **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 per regolarsi di conseguenza e i protocolli che implementano questa strategia si chiamano Carrier Sense.

Si possono osservare principalmente tre tipologie di protocolli Carrier Sense e questi sono: 1-persistent, no-persistent e p-persistent. La prima tipologia consiste nell’ascoltare il canale per vedere se quest’ultimo è libero e in caso lo fosse inviare i pacchetti con probabilità 1 mentre se occupato aspettare 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, come la prima, consiste nell’ascoltare il canale per vedere se quest’ultimo è libero e in caso lo fosse inviare i pacchetti con probabilità 1 mentre se occupato aspettare finché lo è e poi attendere un ulteriore tempo casuale e ripetere l’intera procedura. Infine la terza tipologia si può applicare solamente su trasmissioni con canale slotted in quanto consiste nell’ascoltare il canale per vedere se quest’ultimo è libero e in caso lo fosse inviare i pacchetti con probabilità p (con p minore o uguale ad 1) nello slot attuale mentre con probabilità 1-p aspettare quello successivo anche se il canale è libero e ripetere l’intera procedura mentre se il canale fosse occupato aspettare lo slot successivo e ripetere l’intera procedura.

Una conseguenza di tutto ciò è una quantità minore di collisioni ed un elevato ritardo dovuto ad eventuali ritrasmissioni e tutto questo porta ad un throughput minore. Tuttavia questo protocollo ha un ulteriore svantaggio e questo incide quando due stazioni vogliono inviare dei pacchetti nello stesso momento in quanto quando ascoltano il canale quest’ultimo risulta essere 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).

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 trasmette 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. Una conseguenza di tutto ciò è 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. Una conseguenza di tutto ciò è la possibilità di usare questa ottimizzazione in ambito marino.

* + 1. **ARQ (Automatic Repeat Request)**

Tuttavia, come viene spiegato nei paragrafi precedenti le reti sottomarine sono soggette ad alcuni punti critici che sono caratteristici dell’ambiente marino quali la propagazione multipath, il maggior rumore e la forte attenuazione del segnale. Per tali motivi una conseguenza di tutto ciò è 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.

Una conseguenza di tutto ciò è la possibile implementazione di 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 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 quest’ultimo non lo riceve per problematiche inerenti alla rete e al canale di comunicazione e quindi una possibile soluzione consiste nell’implementazione di un time-out per effettuare la ritrasmissione alla scadenza del timer. Tuttavia, implementando un time-out è possibile che una stazione destinataria riceva molteplici copie dello stesso pacchetto in quanto il canale di comunicazione è compromesso e per questo motivo un’ulteriore ottimizzazione è data dalla numerazione dei pacchetti tramite dei codici univoci per poterli poi scartare successivamente se già ricevuti correttamente. Per tali motivi una figura importante nella stazione mittente è rappresentata dalla coda di trasmissione ovvero una coda nella quale vengono memorizzate le copie dei pacchetti inviati per poterli ritrasmettere successivamente quando richiesti. Si possono osservare principalmente tre tecniche ARQ quali Stop and Wait, Go Back N and Selective Repeat.

La prima tipologia è quella più semplice ovvero il mittente invia un pacchetto e aspetta un’esplicita autorizzazione da parte del destinatario prima di inviare il successivo. Tutto 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 poter capire se scartare il pacchetto attuale e inviare il successivo oppure ritrasmetterlo in relazione alla risposta del destinatario. Inoltre questa tipologia è caratterizzata 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.

Una possibile 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. Di conseguenza 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. Per questo motivo 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. Di conseguenza sono presenti tre tipologie principali di pacchetti di Acknowledge tra i quali si possono osservare 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. Infine 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 far sì che il canale sia maggiormente libero.

Una prima implementazione di questa tecnica consiste nel protocollo Go Back N caratterizzato dalla presenza di una finestra di dimensione N nel mittente per memorizzare gli N pacchetti inviati al destinatario ed in quest’ultimo una finestra di una posizione per accettare soltanto un determinato pacchetto alla volta in quanto ciascuno contiene l’identificativo univoco per verificare che l’ordine di arrivo sia corretto. Per tale motivo il protocollo differenzia tre casistiche principali quali 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 e per questo motivo è stata implementata una terza tecnica ARQ che consiste nel protocollo Selective Repeat.

Quest’ultimo protocollo che consiste nel Selective Repeat è 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 il passo fondamentale consiste nella numerazione dei pacchetti per poterli ordinare successivamente nel buffer del destinatario dopo le eventuali ritrasmissioni relative ai pacchetti arrivati in maniera errata.

* + 1. **FEC (Forward Error Correction)**

Tuttavia non sempre la continua ritrasmissione dei pacchetti è possibile e per tale motivo è stata implementata la FEC ovvero la correzione degli errori contenuti nei pacchetti arrivati in maniera errata al destinatario senza effettuare nessuna ritrasmissione del pacchetto stesso ed infatti questa tecnica consiste nella sua ricezione, nel controllo dei dati contenuti e se errati un’eventuale loro correzione se possibile.

Questa tecnica per poter permettere la correzione di tali pacchetti deve fornire ridondanza del contenuto per permetterne una sua eventuale ricostruzione futura. Però fornire ridondanza significa aumentare la dimensione di tali pacchetti e una conseguenza di tutto ciò è 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.

Tuttavia per decidere quale tecnica di correzione degli errori applicare nell’infrastruttura di rete bisogna identificare quali sono le caratteristiche e le problematiche dell’ambiente circostante e successivamente valutare se questo è più efficiente mediante ritrasmissione dei pacchetti o elaborazione e correzione del contenuto. Infatti la differenza principale consiste che 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 error detection 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 possono essere 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 infine 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 ed un esempio potrebbe essere il codice di Viterbi.

Mentre 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 ma questo verrà discusso nei paragrafi successivi. Alcuni esempi di questa tipologia di codice di correzione degli errori potrebbero essere i seguenti quali 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 e per questo motivo adatto a molteplici tassi d’errore come ad esempio il canale di comunicazione nelle reti di sensori in ambito marino perché notevolmente dinamico.

Nonostante questo non sempre è possibile la correzione dei pacchetti in quanto le tecniche FEC riescono a trovare soltanto un numero limitato di errori e per questo motivo un’eventuale ottimizzazione potrebbe essere l’uso di tecnologia ibrida cercando di implementare strategie ARQ e FEQ allo stesso tempo e quest’ultima si chiama Hybrid ARQ o HARQ.

Si possono osservare principalmente due tipologie di tecnologie ibride. La prima consiste nell’inviare i pacchetti al destinatario aggiungendo l’intestazione 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’intestazione di controllo parziale ovvero senza la possibilità di correzione degli errori in quanto questa parte mancante verrà richiesta mediante protocollo ARQ quando il destinatario controllando il contenuto del pacchetto rileverà degli errori limitando così l’occupazione della larghezza di banda.

Tuttavia dato che quest’ultima tipologia consiste in un abbinamento tra i protocolli ARQ e FEC 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 sarà la larghezza di banda usata e di conseguenza maggiore sarà 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 FEQ. Tuttavia per poterlo implementare e per avere un’ottimizzazione tra l’efficienza del canale e la larghezza di banda utilizzata servono algoritmi di codifica e decodifica di elevata complessità in quanto bisogna determinare eventuali soglie di tassi d’errore e di banda utilizzata per poter usare determinati protocolli e scartarne altri.

## **Protocolli di routing**

Dopo aver spiegato tutti i dettagli dell’accesso al canale condiviso in ambito marino bisogna determinare inoltre quali sono i suoi protocolli di instradamento. Si suddividono principalmente in due tipologie basate sulla disponibilità o indisponibilità delle informazioni sulla posizione delle componenti dell’infrastruttura di rete tra le quali si possono osservare i nodi, gli AUV e i ROV. Questo è dovuto alla difficoltà di ottenerle ed aggiornale 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. Per questo motivo tali protocolli si suddividono inizialmente in quelli senza la localizzazione e quelli con la localizzazione.

Tuttavia queste due suddivisioni precedenti degli algoritmi di routing in ambito marino non sono le uniche in quanto si possono suddividere ulteriormente in cinque tipologie tra le quali si possono osservare le seguenti quali 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).

### **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 la seguente ovvero l’uso della profondità per prendere le decisioni di instradamento come costruzione e scelta del percorso e questo fa sì che l’intera infrastruttura di rete sia altamente scalabile. Per tale motivo questa tipologia di protocolli di routing effettua un allagamento controllato per ciascuna trasmissione ma una conseguenza di tutto ciò è 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 plausibile 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, alla dissolvenza del segnale, all’effetto doppler dovuto al segnale acustico in ambito marino ed infine fronteggiare anche le peggiori condizioni dell’ambiente marino rispetto a quello terrestre. Inoltre un’ulteriore ottimizzazione potrebbe essere la seguente ovvero ciascun nodo conosce le caratteristiche come possono essere 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.

### **Protocolli localization based**

Questa seconda tipologia invece richiede le informazioni sulla posizione geografica rispetto ad un piano bidimensionale o tridimensionale e questo perché vengono calcolati tutti i possibili percorsi tra la stazione mittente e quella destinataria e senza di esse sarebbe impossibile calcolarne i percorsi, le distanze tra i nodi ed infine le traiettorie di instradamento. Una tecnica più avanzata che usa la localizzazione potrebbe essere 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 viene determinato 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.

### **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. Per questo motivo 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 quest’ultime devono essere all’interno o vicine ad esso per poter essere usate come ulteriori nodi di trasferimento parziale. Questo significa che alla ricezione di un pacchetto da parte di una stazione intermedia viene effettuata 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 viene scartato dalla stazione attuale.

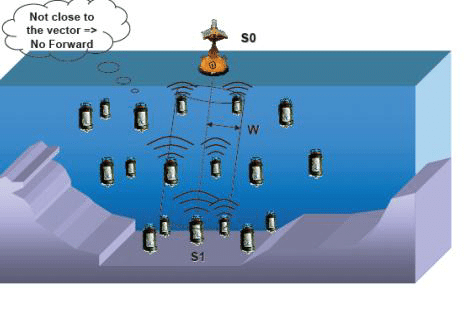


Figura 14: Esempio di protocollo vector based

Un primo esempio di questa tipologia la si può vedere nella figura 14. Si può osservare la presenza di due stazioni quali S0 ed S1, di un trasferimento in corso dalla stazione S1 verso la stazione S0 ed infine di un canale di comunicazione di larghezza W. Inoltre un’ulteriore considerazione la si può fare rispetto alle stazioni che riescono ad effettuare un trasferimento parziale verso la direzione della stazione destinataria e questo è permesso mediante la loro vicinanza rispetto al vettore di instradamento. Un’ulteriore ottimizzazione la si può osservare applicando questa strategia in un’infrastruttura di rete poco densa in quanto altrimenti si avrebbe un sovraccarico di quest’ultima con un ulteriore consumo energetico e questo deve essere limitato il più possibile in ambito marino. Di seguito si possono osservare alcuni esempi di protocolli vector based.

### **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 dei sensori quali quello di profondità e quello di pressione che vengono installati in ciascun nodo. Questo significa che 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 ci sono due possibili 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. Invece 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.

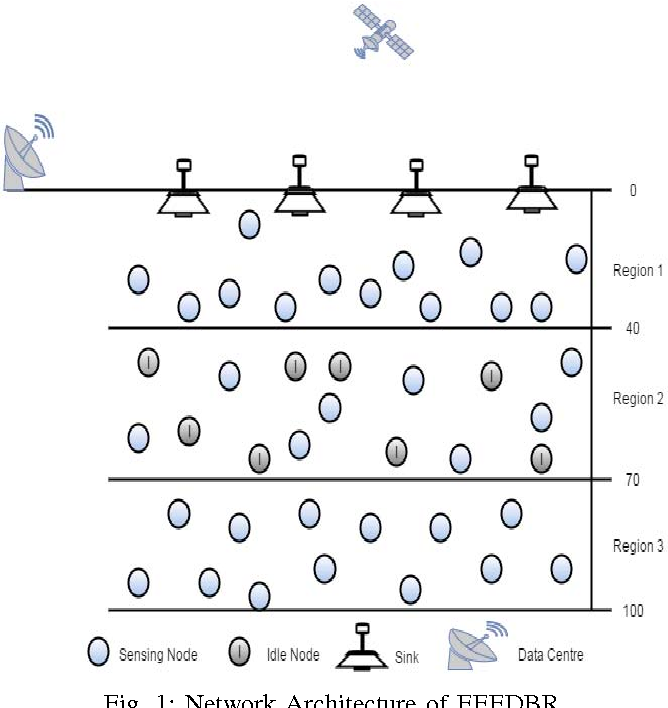


Figura 15: Esempio di protocollo depth based

Un primo esempio di questa tipologia lo si può vedere nella figura 15. Si può osservare che i nodi dell’infrastruttura di rete sono suddivisi in livelli e questo mediante all’analisi dei dati inerenti alla profondità raccolti dai sensori. Un ulteriore dettaglio è il seguente ovvero la comunicazione con le stazioni offshore dedicate alle diverse aree e questo corrisponde ad 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 si possono osservare alcuni esempi di protocolli di questa tipologia.

### **Protocolli clustered based**

Questa tipologia di protocolli di routing in ambito marino consiste nell’implementazione di una strategia di raggruppamento dei nodi basandosi sui dati raccolti inerenti alla loro posizione geografica rispetto ad un piano bidimensionale o tridimensionale mediante dei sensori installati su di essi. Una conseguenza di tutto ciò è la formazione di molteplici gruppi di nodi dove ciascuno è formato da due tipologie principali di stazioni tra le quali si possono osservare quelle member e quelle head. La caratteristica principale che li differenzia è il livello di interconnessione in quanto i primi sono collegati solo reciprocamente a quelli che fanno parte dello stesso raggruppamento mentre i secondi forniscono un livello di interconnessione intergruppo ovvero quest’ultimi 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 molteplici gruppi all’interno dell’intera infrastruttura di rete.

Immagine che contiene testo, orologio

Descrizione generata automaticamente

Figura 16: Esempio di protocollo clustered based

Un primo esempio di questa tipologia la si può vedere nella figura 16. Si può osservare 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. Un’altra caratteristica visibile da questa figura è rappresentata dai collegamenti infatti si possono osservare 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. Di seguito si possono osservare alcuni protocolli di questa tipologia.

### **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. Una conseguenza di tutto ciò è che il trasferimento dei pacchetti avviene nella seguente maniera ovvero 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.

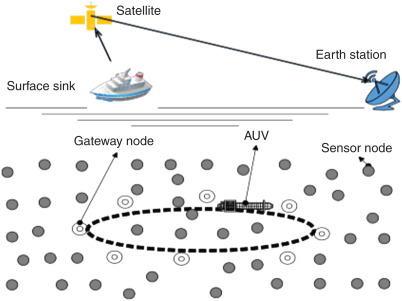


Figura 17: Esempio di protocollo AUV based

Un esempio di questa tipologia lo si può vedere nella figura 17. Si possono osservare principalmente tre figure di scarsa importanza in questo caso tra le quali ci sono le stazioni onshore, quelle offshore e i satelliti mentre quelle di maggior importanza 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.

### **Protocolli Path based**

Infine quest’ultima tipologia di protocolli di routing in ambito sottomarino consiste

# **Analisi e valutazione delle prestazioni**

# **Progetti attuali e sviluppi futuri**

# **Indice delle figure**

[Figura 1: Comunicazione sottomarina cablata 4](#_Toc67226020)

[Figura 2: Componenti di un sensore sottomarino 9](#_Toc67226021)

[Figura 3: Esempio di architettura 2d 13](#_Toc67226022)

[Figura 4: Esempio di architettura 3d statica 14](#_Toc67226023)

[Figura 5: Esempio di architettura 3d dinamica 15](#_Toc67226024)

[Figura 6: Esempio di topologia di rete centralizzata 16](#_Toc67226025)

[Figura 7: Esempio di topologia distribuita 18](#_Toc67226026)

[Figura 8: Esempio di rete multi hop 19](#_Toc67226027)

[Figura 9: Esempio di FDMA 25](#_Toc67226028)

[Figura 10: Esempio di TDMA 27](#_Toc67226029)

[Figura 11: Esempio di CDMA 28](#_Toc67226030)

[Figura 12: Esempio di SDMA 30](#_Toc67226031)

[Figura 13: Esempio di Aloha 31](#_Toc67226032)

[Figura 14: Esempio di protocollo vector based 39](#_Toc67226033)

[Figura 15: Esempio di protocollo depth based 40](#_Toc67226034)

[Figura 16: Esempio di protocollo clustered based 41](#_Toc67226035)

[Figura 17: Esempio di protocollo AUV based 42](#_Toc67226036)

# **Indice delle tabelle**

[Tabella 1: Lista di applicazioni e servizi delle UWSN con relativi esempi 10](#_Toc57815365)

# **Indice degli acronimi**

1. WSN
2. UWSN
3. MAC
4. FDMA
5. TDMA
6. CDMA
7. SDMA
8. AUV

# **Bibliografia**

1. **[Ozan 2012]** Ozan Bicen A., Behzat Sahin A., Akan Ozgur B. **Spectrum-aware underwater networks.** IEEE Vehicular Technology Magazine, Vol. 7, N. 2, juve 2012.
2. **[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.
3. **[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
4. **[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.
5. **[Rodolfo 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.
6. **[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.
7. **[Reinen 2016]** Tor Arne Reinen, Arne Lie, Finn Tore Knudsen. **Underwater acoustic network for ice-monitoring.** Scandinavian Symposium on Physical Acoustics. 39th. Jan. 31 – Feb. 3, 2016.
8. **[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.
9. **[Malakoff 2004]** David Malakoff. **Panel to Prepare Plan for Underwater Network**. Science 16. Vol. 303. N. 5656. January 2004.
10. **[Verma 2015]** Seema Verma, Prachi Chaudhary. **Communication Architecture for Underwater Wireless Sensor Network**. Computer Network and Information Security. N. 6. May 2015.
11. **[Delphin 2020]** Delphin Raj. Jinyoung Lee. Eunbi Ko. Soo-Young Shin. Jung-Il 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.
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. **[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.
14. **[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
15. **[Sozer 2000]** E.M. Sozer. M. Stojanovic. J.G. Proakis. **Underwater acoustic networks**. IEEE Journal of Oceanic Engineering. Vol. 25. N. 1. January 2000.
16. **[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.
17. **[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. November 2015.
18. **[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.
19. **[Rossi 2012]** Rossi Marco. **Tesi di laurea in tecniche arq per reti acustiche sottomarine**. Università degli Studi di Padova. 2012.
20. **[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.
21. **[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.
22. **[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.
23. **[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. May 2018.