



Università
Ca' Foscari
Venezia

Corso di Laurea
in informatica (CT3)

Classe L-31 scienze e
tecnologie informatiche

Tesi di Laurea

**Underwater
wireless sensor
networks**

Relatrice

Prof.ssa Maria Simonetta Balsamo

Laureando

Mirco Venerba
872653

Anno Accademico

2020 / 2021

SOMMARIO

1. Introduzione	4
1.1. Indice delle figure	4
1.2. Indice delle tabelle	5
1.3. Lista acronimi	6
1.4. Abstract	7
2. Reti subacquee	8
2.1. Introduzione	8
2.1.1. Problematiche principali.....	8
2.1.2. Applicazioni e servizi.....	9
2.1.3. L'evoluzione	10
2.2. I componenti della rete.....	11
2.2.1. Introduzione.....	11
2.2.2. Il nodo o sensore sottomarino	11
2.2.3. Gestione raccolta dei dati.....	12
2.2.4. Gestione inoltro dei dati.....	13
2.2.5. Gestione elaborazione dei dati.....	14
2.2.6. Sottosistema di gestione dei dati e di supporto decisionale.....	14
2.3. L'architettura delle reti	15
2.3.1. Introduzione.....	15
2.3.2. L'architettura 2d.....	15
2.3.3. L'architettura 3d.....	16
2.3.4. L'architettura 3d statica.....	16
2.3.5. L'architettura 3d dinamica.....	17

2.4.	Topologia di rete	18
2.4.1.	Introduzione	18
2.4.2.	Topologia centralizzata	18
2.4.3.	Topologia distribuita	19
2.4.4.	Topologia multi hop	21
2.5.	Tipologia di segnali	22
2.5.1.	Introduzione	22
2.5.2.	Segnale radio	22
2.5.3.	Segnale ottico	22
2.5.4.	Segnale acustico	23
2.6.	I criteri di progettazione	24
3.	I protocolli delle UWSN	25
3.1.	La valutazione delle prestazioni	25
3.2.	La gestione energetica	25
4.	Analisi e valutazione delle prestazioni	25
4.1.	Introduzione	25
4.2.	L'architettura	25
4.3.	I criteri di progettazione	25
4.4.	Le tipologie	25
4.5.	Benchmarks	25
4.6.	Le piattaforme attuali	25
5.	Reti underwater per IoT	25
5.1.	Introduzione	25
5.2.	L'architettura	25
5.3.	I criteri di progettazioni	25
5.4.	I protocolli	25

5.5.	I progetti attuali	25
5.6.	Le sfide aperte	25
6.	Esempi di progetti	25
7.	Sviluppi futuri	25
7.1.	Le comunicazioni ibride e adattative.....	25
7.2.	I progetti futuri	26
8.	Bibliografia	26

1. Introduzione

1.1. Indice delle figure

Figura 1: Comunicazione sottomarina cablata	8
Figura 2: Componenti di un sensore sottomarino	12
Figura 3: Esempio di architettura 2d.....	16
Figura 4: Esempio di architettura 3d statica	17
Figura 5: Esempio di architettura 3d dinamica	18
Figura 6: Esempio di topologia di rete centralizzata.....	19
Figura 7: Esempio di rete distribuita.....	20
Figura 8: Esempio di rete multi hop.....	22

1.2. Indice delle tabelle

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

1.3. Lista acronimi

1.4. Abstract

2. Reti subacquee

2.1. Introduzione

La 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 sottostante che rappresenta la comunicazione subacquea realizzata fino ad oggi tramite cavi di comunicazione.

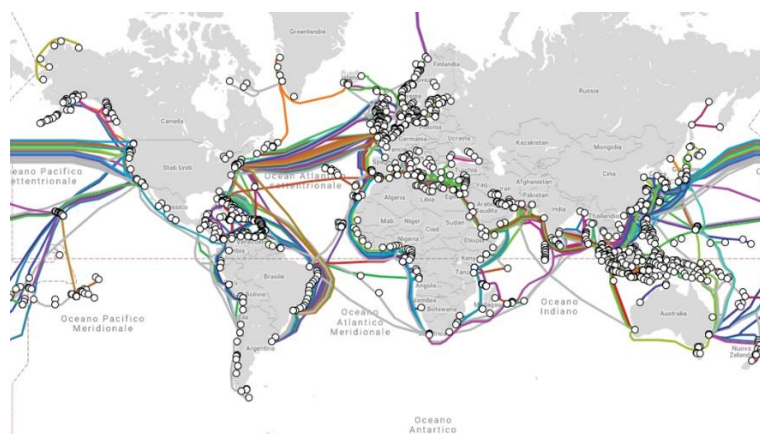


Figura 1: Comunicazione sottomarina cablata

2.1.1. Problematiche principali

Nella figura sopra, si può osservare la tipologia di comunicazione scelta nell'ambito sottomarino, fino ad oggi, e si nota che è prevalentemente quella via cavo o cablata. 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. Alcuni esempi possono essere i seguenti.

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 studi, è data dalle risorse alternative, alcune delle quali possono essere energia solare ed eolica, con la successiva progettazione di meccanismi per la loro inclusione, raccolta, gestione ed assegnazione. Di conseguenza l'utilizzo efficiente dell'energia è uno dei punti critici nella fase di progettazione dell'intera infrastruttura, facendo delle scelte, che a titolo esemplificativo possono essere 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. Questo lo si può osservare 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 all'elevata quantità di dispersione e difficoltà di assorbimento in ambiente marino del segnale radio e ottico.

Il terzo problema consiste principalmente nell'architettura di rete e la relativa localizzazione tra i componenti. Con la nascita delle reti sottomarine, sono nate due tipologie di progettazione. La prima consiste nella staticità dei componenti, ad esempio ancorandoli a delle banchine oppure a delle boe nel fondale, mentre la seconda consiste nella dinamicità, sfruttando le caratteristiche dell'ambiente circostante l'infrastruttura, quali le correnti e le onde superficiali, o usare dispositivi avanzati e autonomi. Proprio per quest'ultima caratteristica la localizzazione 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, si stanno ricercando nuovi algoritmi di geolocalizzazione, nuove tipologie architetture, nuovi protocolli 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.

2.1.2. Applicazioni e servizi

Esempi di applicazioni e servizi 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.

Di seguito nella tabella 1 si possono osservare 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 under water things o IoUT	Per trattare l'evoluzione di oggetti e servizi in ambito sottomarino che si rendono riconoscibili e acquisiscono una propria identità nel mondo digitale e una capacità elaborativa grazie al fatto di poter comunicare, inviare, ricevere ed elaborare dati

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

2.1.3. 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 subacquei, che successivamente chiameremo sensori, denominato Underwater Wireless 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 sotto il livello del mare ed infine i sensori o nodi sotto la superficie dell'acqua che servono per costituire il grafo di comunicazione.

2.2. I componenti della rete

2.2.1. Introduzione

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

2.2.2. 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. Infine, la terza tipologia consiste 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 relazione tra questi quattro componenti, si può vedere nella figura sottostante. Si possono osservare principalmente due parti. La prima è quella centrale che corrisponde all'unità centrale di

elaborazione, cpu, e la seconda è composta da periferiche quali memoria, modem acustico, alimentazione e sensori.

La funzionalità principale 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. Poi c'è 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.

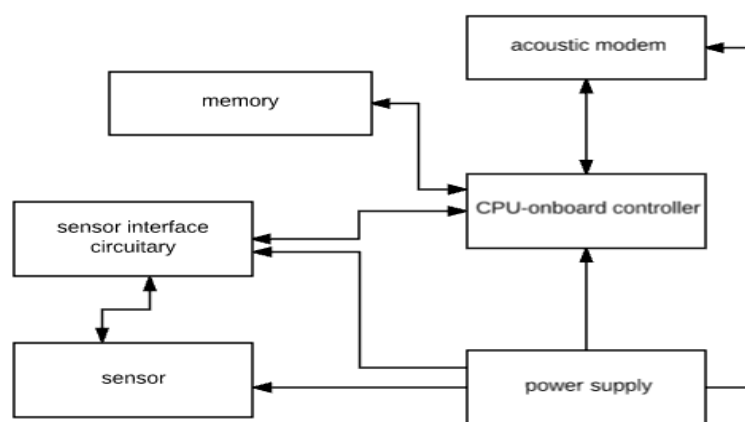


Figura 2: Componenti di un sensore sottomarino

Da tutto questo si può capire che 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.

2.2.3. 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 la successiva 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 una nuova tecnica “parziale” di raccolta dei dati.

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

2.2.4. Gestione inoltro dei dati

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

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

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

La seconda tipologia di decisione sull’invio delle rilevazioni consiste in una architettura di rete multi hop per poter inoltrare lo stesso messaggio sfruttando la tecnica dello store and forward. Tale tecnica significa “memorizza ed inoltra” e nella quale un pacchetto prima di poter essere ritrasmesso nel collegamento in uscita deve essere stato totalmente ricevuto. La caratteristica di questa tipologia è anziché fare un invio di lunga postata, fare una serie di invii lungo un cammino di nodi

per arrivare fino al nodo di destinazione, ciascuno di minor distanza. Tutto questo porta ad una distanza di propagazione minore, una minor potenza di trasmissione ed una maggior velocità di trasmissione data la struttura della rete sottoforma di insieme di nodi collegati reciprocamente.

2.2.5. 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. Di conseguenza dalle stazioni di base, è possibile il loro controllo remoto, a distanza, regolando una loro nuova posizione, quale latitudine, longitudine e profondità introducendo una nuova tipologia di dato da elaborare.

2.2.6. 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 la logica client e server, architettura mediante il quale un terminale client si connette ad un terminale server per la fruizione di un certo servizio quale gestione dei dati, accesso a determinate risorse e scambio di informazioni.

Un esempio di questa architettura potrebbe essere 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 terminale 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 e eventuale reportistica al terminale client che si connette.

2.3. L'architettura delle reti

2.3.1. Introduzione

Negli ultimi anni anche la ricerca nella comunicazione sottomarina sta facendo molti passi avanti, stanno emergendo le Underwater Sensor Network UWSN, sistema distribuito di sensori wireless subacquei.

Le reti di sensori sottomarini si dividono principalmente in tre tipologie architetture: l'architettura 2d, l'architettura 3d statica e l'architettura 3d dinamica.

2.3.2. 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.

Dalla figura sottostante, si possono osservare un insieme di piani bidimensionali, prima visti dall'alto e poi in un piano tridimensionale, dove ciascuno rappresenta un modello di questa tipologia architettonica e si può osservare che sono reti separate e di conseguenza manca una visione dell'intero sistema. Per questo motivo sono nate prima le architetture 3d statiche e successivamente quelle dinamiche.

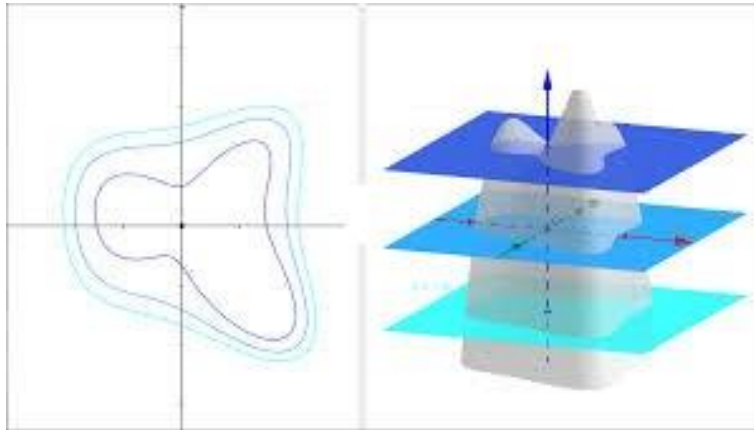


Figura 3: Esempio di architettura 2d

2.3.3. 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 ed 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 architettonica si suddivide in due modelli diversi, il primo statico e il secondo dinamico, il secondo l'evoluzione del primo.

2.3.4. 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 mostra una rete con architettura 3d statica dove i sensori hanno una posizione fissa e sono ancorati nel fondale. Possiamo osservare alcuni svantaggi di questa scelta architettonica ovvero eventuali ostruzioni da attività biologiche sia di deposito con il conseguente innalzamento del fondale marino e la successiva non raggiungibilità della comunicazione in quel nodo, e sia nel canale comunicativo tra due nodi dovuto ad interferenze di attività umane come, per esempio, trivellazioni per l'attività mineraria oppure dovuto più in generale alla vita marina.

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

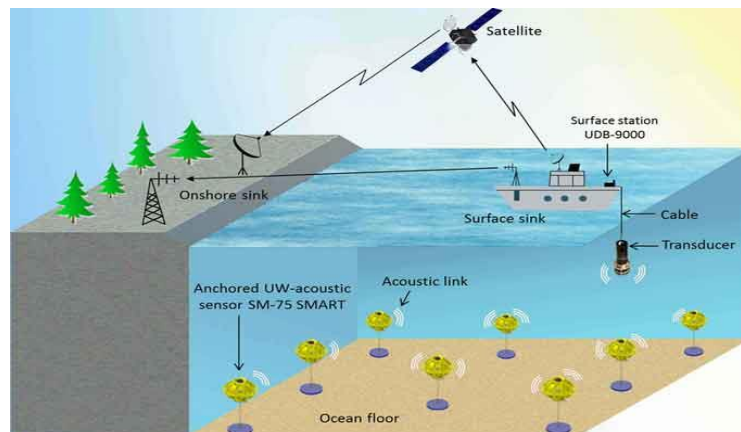


Figura 4: Esempio di architettura 3d statica

2.3.5. 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.

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

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

Un esempio di questa tipologia architetture si può osservare nella figura sottostante. Questa rappresenta un'architettura dinamica in quanto si possono intravedere dei componenti caratteristici. 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 insieme.

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.

Un esempio di questa caratteristica la si può osservare nella figura sottostante. Si possono osservare due reti principali, sconnesse tra di loro. La prima consiste in quella di sinistra che ha una topologia a stella in quanto tutti gli endpoint sono connessi alla componente centrale. Mentre la seconda

consiste in quella di destra con topologia magliata parzialmente connessa in quanto quasi tutti i nodi sono collegati reciprocamente. Da queste osservazioni, si può notare, sempre nella figura sottostante, la presenza di un veicolo autonomo subacqueo, che si disconnette dalla rete di sinistra, si dirige alla rete di destra, ossia quella di destinazione, rendendo possibile il trasferimento, se pur limitato, di pacchetti.

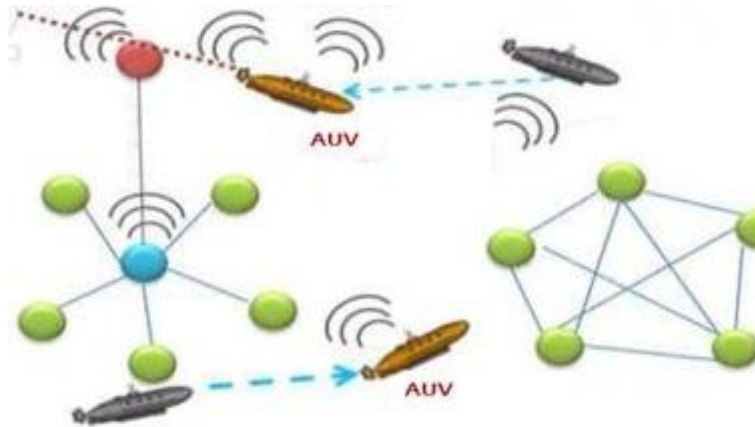


Figura 5: Esempio di architettura 3d dinamica

2.4. Topologia di rete

2.4.1. Introduzione

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. Questo 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, in relazione alle scelte fatte, si possono determinare eventuali vantaggi e svantaggi.

Per questi motivi sono nate tre topologie di rete principali 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 anche di server. L'ultima si compone di una rete multihop con la caratteristica di favorire la comunicazione sfruttando un cammino composto da vari salti, detti hop, usando algoritmi di routing per la gestione dell'instradamento dei pacchetti in maniera efficiente.

2.4.2. Topologia centralizzata

La prima topologia di rete in ambito marino consiste in quella centralizzata. In questa struttura si possono osservare due figure principali. La prima consiste nell'insieme di tutti i calcolatori

appartenenti alla rete, che usufruiscono di servizi che sono installati in macchine remote, e prendono il nome di endpoint. La seconda è caratterizzata da un'unità centrale, che si può chiamare hub, con il compito di gestire la comunicazione tra i vari endpoint.

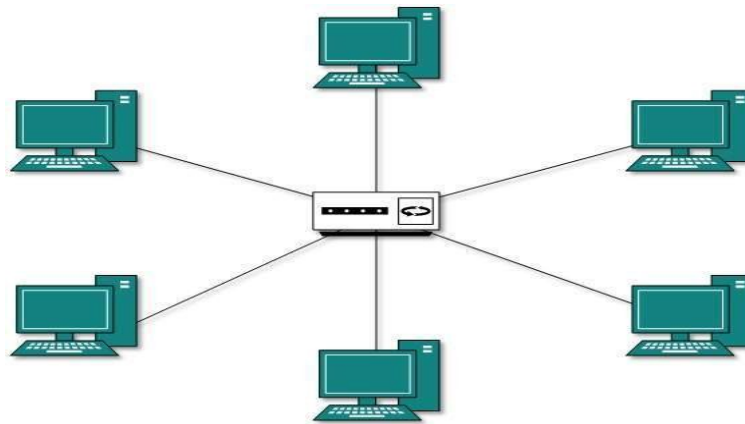


Figura 6: Esempio di topologia di rete centralizzata

Dalla figura soprastante si può osservare un esempio di configurazione di una rete centralizzata nella quale tutti i calcolatori sono collegati ad una stazione principale. Rapportandola nelle reti marine, si può immaginare che tale configurazione sia particolarmente adatta per le reti nelle acque profonde in quanto la figura principale è composta da una boa situata sul livello del mare che collega le due reti eterogenee, quella marina e quella subacquea. Di conseguenza questo ruolo può essere svolto dalla stazione principale della rete, in quanto è collegata contemporaneamente a tutti i 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.

Alcuni esempi di benefici possono essere i seguenti quali 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 a titolo esemplificativo possono essere rappresentati dai seguenti. Il primo consiste nel grado di importanza 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. 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.

2.4.3. Topologia distribuita

Negli ultimi anni, sta nascendo una nuova tipologia di rete di elaborazione di dati. Questa consiste in un sistema distribuito di calcolatori, ossia una tecnica progettuale per orientare l'elaborazione su più elaboratori anziché avere una singola stazione centralizzata.

La caratteristica principale di questa topologia è rappresentata dall'inesistenza di una gerarchia tra i vari nodi, in quanto ciascuna stazione è equivalente alle altre perché ciascuna 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 sottostante. Si può osservare immediatamente che la topologia di rete è quella parzialmente magliata in quanto ciascun calcolatore può essere connesso reciprocamente con altre stazioni comunicando e cooperando per rendere possibili servizi coordinati e risultati congiunti.

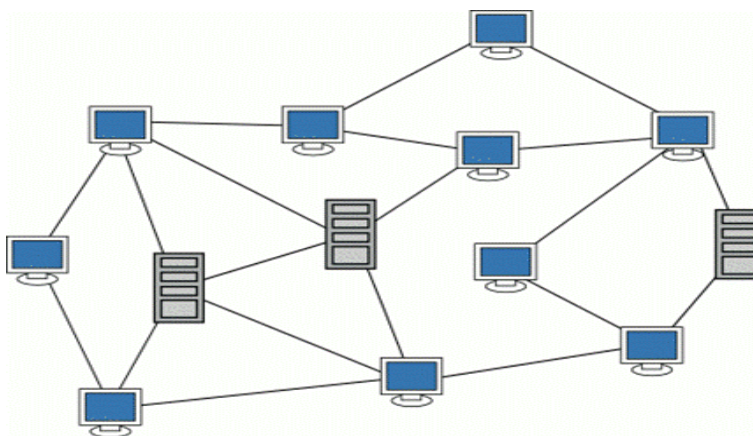


Figura 7: Esempio di rete distribuita

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 può essere la scalabilità perché la crescita dell'intero sistema non è dovuto al potenziamento della stazione centrale ma bensì all'aggiunta di altre stazioni all'interno del sistema.

Mentre alcuni svantaggi possono essere 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 multiplatforma. 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.

2.4.4. 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 nel 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.

Una tecnica che si usa per l'inoltro dei pacchetti è quella dello store and forward che significa "memorizza ed inoltra". Questa rappresenta una tecnica di commutazione di pacchetto che consiste nel suddividere l'informazione da trasmettere in più pacchetti trasmessi individualmente ed in sequenza.

Di conseguenza, a differenza delle altre topologie di rete, 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.

Un esempio di questa topologia la si può vedere nella figura sottostante. Si può osservare l'insieme dei nodi come una rete distribuita parzialmente magliata dove ciascun nodo può essere connesso reciprocamente ad altri nodi. Nel momento in cui bisogna trasferire un'informazione, viene creata una serie di pacchetti di dimensione ridotta da trasferire singolarmente ed in sequenza. Successivamente, tramite gli algoritmi di routing e sfruttando le tabelle di instradamento, di cui parlerò nel capitolo successivo, viene determinata una sequenza di nodi come percorso per trasmettere il pacchetto dal nodo sorgente fino al nodo destinazione.

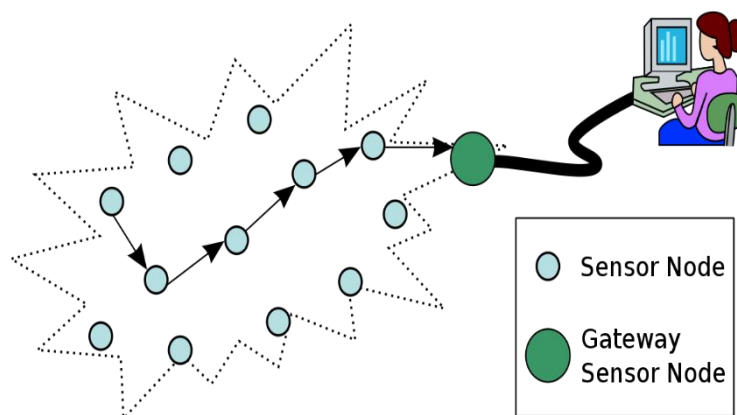


Figura 8: Esempio di rete multi hop

2.5. Tipologia di segnali

2.5.1. Introduzione

Le UWSN consistono in due componenti principali, la prima consiste nell'insieme dei nodi o sensori subacquei mentre la seconda consiste nella loro comunicazione. Dunque, per la progettazione e la realizzazione di una rete sottomarina, ci sono diversi punti critici dovuti alle differenze rispetto alla comunicazione terrestre. Alcune di queste possono essere il costo, la potenza, la memoria ma quella più significativa è rappresentata dalla comunicazione nel canale sottomarino perché si contraddistingue da un'attenuazione maggiore rispetto al canale terrestre. Per questi motivi alcune tipologie di segnali potrebbero essere le seguenti: il segnale radio, ottico ed infine acustico.

2.5.2. Segnale radio

Il segnale radio è composto da "onde radio" che rappresentano delle radiazioni elettromagnetiche appartenenti alle frequenze nell'intervallo 3KHz-300GHz e viaggiano rispettivamente da 100Km a 1mm. Da questo si può osservare 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 dovuto anche alla natura conduttiva dell'acqua in quanto riduce la lunghezza d'onda del segnale.

2.5.3. Segnale ottico

Il segnale ottico lo si può considerare come un qualunque tipo di comunicazione che usa la luce come mezzo trasmissivo. Per questo motivo per poter usare la comunicazione ottica bisogna sfruttare tre componenti principali. La prima consiste in un trasmettitore con il compito di codificare

il pacchetto ricevuto dalla stazione sorgente in un segnale ottico per poi trasferirla verso il ricevitore destinatario. La seconda è caratterizzata dal canale trasmissivo con il compito di trasferire il pacchetto sottoforma di segnale ottico dal trasmettitore fino al ricevitore. Ed infine la terza componente è composta da un ricevitore che è il dispositivo con il compito di decodificare il messaggio ricevuto sottoforma di segnale ottico e inoltrarlo alla stazione di destinazione.

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

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

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

2.5.4. Segnale acustico

Il segnale acustico è la tipologia principale usata in ambito marino. Questo è dovuto principalmente a due fattori. Il primo consiste nella frequenza in quanto l'acustica sfrutta una bassa frequenza nel range 20Hz-20KHz e proprio per questo motivo, comporta una minore attenuazione perché minore è la frequenza minore sarà l'attenuazione. Il secondo motivo è caratterizzato dalla 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. Alcuni di questi possono essere i seguenti. Il primo consiste nell'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. Il secondo è caratterizzato dalla propagazione multipath, ossia un fenomeno di propagazione del segnale acustico su più percorsi per arrivare fino alla stazione di destinazione e tutto ciò può essere causato da condizioni atmosferiche ed eventuale riflessione. Il terzo 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 c'è 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.

Per tali motivi la comunicazione acustica risulta la tipologia di comunicazione più usata in ambito marino. Tuttavia, il paragrafo precedente dimostra che anche questo segnale, ha bisogno di una

fase di raccolta dei dati e di una fase di filtraggio ed elaborazione in quanto soffre di diversi problemi. Per tutto ciò, ci sono ancora molte sfide aperte per poter rendere l'acustica un segnale identificabile senza errori ma comunque è chiaro che rappresenta il mezzo più adatto in ambiente marino.

2.6. I criteri di progettazione

Visto tutti gli aspetti dell'architettura e delle topologie delle UWSN, si può osservare che per poterne progettare e implementare una in modo corretto, bisogna saper gestire alcuni punti di fondamentale importanza. Alcuni di questi, a titolo esemplificativo possono essere 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, e una conseguenza di tutto ciò consiste in possibili variazioni dell'intera infrastruttura e per evitare rallentamenti e malfunzionamenti bisogna riuscire a trovare delle strategie per avere una visione d'insieme in un qualunque momento.
- La gestione energetica, perché qualsiasi componente usato in un'infrastruttura delle UWSN, sono alimentati a batterie e di conseguenza una sfida aperta in questo ambito riguarda 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, funzioni da server o funzioni miste.

3. I protocolli delle UWSN

3.1. La valutazione delle prestazioni

3.2. La gestione energetica

4. Analisi e valutazione delle prestazioni

4.1. Introduzione

4.2. L'architettura

4.3. I criteri di progettazione

4.4. Le tipologie

4.5. Benchmarks

4.6. Le piattaforme attuali

5. Reti underwater per IoT

5.1. Introduzione

5.2. L'architettura

5.3. I criteri di progettazioni

5.4. I protocolli

5.5. I progetti attuali

5.6. Le sfide aperte

6. Esempi di progetti

7. Sviluppi futuri

7.1. Le comunicazioni ibride e adattative

7.2. I progetti futuri

8. Bibliografia

- **Spectrum-aware underwater networks.** A. Ozan Bicen; A. Behzat Sahin; Ozgur B. Akan. IEEE Vehicular Technology Magazine (Volume: 7, Issue: 2, June 2012).
- **On Reliable Data Transfer in Underwater Acoustic Networks: A Survey From Networking Perspective.** Shengming Jiang. IEEE Communications Surveys & Tutorials (Volume: 20, Issue: 2, Secondquarter 2018).
- **Simulation and Experimentation Platforms for Underwater Acoustic Sensor Networks: Advancements and Challenges.** Hanjiang Luo, Kaishun Wu, Rukhsana Ruby, Feng Hong, Zhongwen Guo, Lionel Ni. ACM Computing Surveys May 2017 Article Number: 28.
- **Energy Management and Power Allocation for Underwater Acoustic Sensor Network.** Lianyou Jing; Chengbing He; Jianguo Huang; Zhi Ding. IEEE Sensors Journal (Volume: 17, Issue: 19, Oct.1, 1 2017).
- **Underwater Wireless Sensor Networks: A New Challenge for Topology Control–Based Systems.** Rodolfo W. L. Coutinho, Azzedine Boukerche, Luiz Filipe Menezes Vieira, Antonio Alfredo Ferreira Loureiro. ACM Computing Surveys January 2018 Article Number: 19
- **Dynamic underwater glider network for environmental field estimation.** R. Grasso; P. Braca; S. Fortunati; F. Gini; M. S. Greco. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (Volume: 52, Issue: 1, February 2016).
- **SensIs - Underwater acoustic network for ice-monitoring.** Tor Arne Reinen, Arne Lie, Finn Tore Knudsen. 39th Scandinavian Symposium on Physical Acoustics, Geilo, Norway, Jan. 31 – Feb. 3, 2016.
- **Underwater Sensor Network Applications: A Comprehensive Survey.** Emad Felemban, Faisal Karim Shaikh, Umair Mujtaba Qureshi, Adil A. Sheikh, Saad Bin Qaisar. International Journal of Distributed Sensor Networks 2015(11):1-14.
- **Panel to Prepare Plan for Underwater Network.** David Malakoff. Science 16 Jan 2004: Vol. 303, Issue 5656, pp. 296-297.
- **Communication Architecture for Underwater Wireless Sensor Network.** Seema Verma, Prachi Chaudhary. I.J. Computer Network and Information Security, 2015, 6, 67-74.
- **Underwater Network Management System in Internet of Underwater Things: Open Challenges, Benefits, and Feasible Solution.** Delphin Raj. July 2020 Electronics 9(7):1142.
- **Underwater sensor networks: Applications, advances and challenges.** John Heidemann, Milica Stojanovic and Michele Zorzi. January 2012 Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences 370(1958):158-75.

- **Underwater Wireless Sensor Networks: A Review of Recent Issues and Challenges.** Awan KShah PIqbal KGillani SAhmad WNam Y. January 2019Wireless Communications and Mobile Computing 2019(3):1-20.
- **The challenges of building mobile underwater wireless networks for aquatic applications.** Jun-Hong Cui; Jiejun Kong; M. Gerla; Shengli Zhou. IEEE Network (Volume: 20, Issue: 3, May-June 2006).
- **Underwater acoustic networks.** E.M. Sozer; M. Stojanovic; J.G. Proakis. IEEE Journal of Oceanic Engineering (Volume: 25, Issue: 1, Jan. 2000).
- **Underwater Wireless Sensor Networks: A Survey on Enabling Technologies, Localization Protocols, and Internet of Underwater Things.** Mohammed Jouhari; Khalil Ibrahimi; Hamidou Tembine; Jalel Ben-Othman. July 2019 IEEE Access PP(99):1-1.
- **Underwater Sensor Network Applications: A Comprehensive Survey.** Emad Felemban, Faisal Karim Shaikh, Umair Mujtaba Qureshi, Adil A. Sheikh, Saad Bin Qaisar. November 2015International Journal of Distributed Sensor Networks 2015(11):1-14.
- **Analysis and Optimisations in Depth-based routing for Underwater Sensor Networks.** Tesi di Dottorato 2019 di Muhammad Mohsin Raza Jafri.
- **Tecniche arq per reti acustiche sottomarine.** Tesi di laurea 2011/2012 di Marco Rossi.