

POLITECNICO DI TORINO

Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Sviluppo di un dissalatore solare passivo autonomo



Relatore

Matteo FASANO

Correlatore

Matteo MORCIANO

Candidato

Salvatore GARRANO

A.A. 2019/2020

*...Ai miei genitori, il pilastro della mia vita, le fondamenta dei miei giorni
Alle mie sorelle, insieme il mio specchio ed il mio esatto opposto
Ai miei amici, la miglior famiglia che potessi scegliere
A Loro, che mi mancano infinitamente...*

Sommario

0. Abstract	1
1. Introduzione	3
1.1 Scarsità di acqua nel mondo	3
1.1.1 Insufficienza attribuibile a cause economiche	4
1.1.2 Insufficienza attribuibile a cause fisiche	5
1.1.3 Altre possibili cause	5
1.2 Approvvigionamento d'acqua.....	6
1.3 Sistemi di desalinizzazione dell'acqua.....	8
1.4 Sistemi attivi	11
1.4.1 MSF (Multi-Stage Flash).....	12
1.4.2 MED (Multi-Effect Distillation).....	14
1.4.3 VC (Vapor Compression).....	15
1.4.4 RO (Reverse Osmosis)	17
1.4.5 ED (Electro-Dialysis).....	18
1.4.6 MD (Membrane Distillation).....	20
1.4.7 Confronto qualitativo	23
1.5 Sistemi Passivi	24
1.5.1 Dissalatore ad energia solare (Solar Still)	25
1.5.2 Generatore di vapore solare low cost.....	26
1.5.3 Distillazione per irraggiamento diretto + MD	28
1.5.4 FSS (Flat Solar Still).....	29
1.6 Considerazioni sugli attuali sistemi con solare.....	31
1.7 Confronto tra le prestazioni energetiche.....	32
2. Modello Teorico	35
2.1 Introduzione.....	35
2.2 Principio di funzionamento.....	35

2.2.1	Rimozione del sale	38
2.3	Modello Analitico	39
2.4	Analisi Numerica	43
2.4.1	Setup della simulazione.....	44
2.4.2	Risultati delle simulazioni	50
3.	Prototipazione.....	58
3.1	Introduzione.....	58
3.2	OHDC (<i>Oman Humanitarian Desalination Challenge</i>)	59
3.2.1	Linee guida generali.....	59
3.4	Setup sperimentale	60
3.3.1	Struttura del dispositivo.....	61
3.3.2	Principali differenze tra le due versioni del dissalatore	66
3.3.3	Assemblaggio.....	68
3.3.4	Requisiti del dissalatore.....	76
3.3.5	Layout sperimentale	83
4.	Conclusioni	88
	Lista Figure	90
	Riferimenti	93
	Ringraziamenti	100

0. Abstract

La carenza idrica è uno dei problemi più gravi che il mondo si ritrova a dover affrontare, ad oggi la desalinizzazione rappresenta l'unica tecnologia capace di contrastare questo fenomeno. Tuttavia, le richieste d'acqua continuano ad aumentare a causa di fattori come il cambiamento climatico e la crescita demografica.

Questo costringe gli enti di ricerca di tutto il mondo ad approcciarsi a tale problematica e realizzare sistemi innovativi sempre più efficienti e a costi facilmente accessibili. Sebbene storicamente queste tecnologie sono considerate ad alto consumo energetico, risulta interessante valutare sistemi alimentati da fonti di energia rinnovabili, l'idea di un sistema di desalinizzazione passivo, rappresenta un espediente molto valido per mitigare la scarsità idrica nei paesi più danneggiati da questo fenomeno. Alla base di questo concetto vi è la possibilità di poter sfruttare l'irraggiamento solare come fonte di alimentazione e una combinazione smart di materiali a basso costo che consentano di riprodurre le fasi del fenomeno naturale del ciclo dell'acqua, ovvero, una serie di evaporazioni e condensazioni senza l'utilizzo di organi elettrici o meccanici.

Lo scopo di questa tesi è quindi quello di riadattare in scala più ampia la tecnologia di dissalazione passiva sviluppata dal Politecnico di Torino su una versione più vecchia.

Il lavoro è strutturato in più fasi, innanzitutto è stato analizzato lo stato dell'arte delle principali tecnologie di dissalazione, si è fatto un confronto, su più aspetti, delle diverse configurazioni presenti attualmente sul mercato per poi introdurre soluzioni più economiche e allo stesso tempo efficienti come i sistemi di dissalazione ad energia solare. Dopo aver fornito un quadro generale delle varie tecnologie verrà presentato l'oggetto di questo lavoro, ossia il riadattamento in scala più ampia di un dissalatore solare passivo multistadio capace di riutilizzare il calore latente rilasciato da ogni stadio come fonte di alimentazione termica di quello successivo.

Nello specifico, sarà descritta in dettaglio l'intera fase di progettazione, partendo dalla definizione del design, passando per l'analisi del modello teorico e terminando con la costruzione e il montaggio dei vari componenti finalizzati alla realizzazione del prototipo. Nel corso dell'elaborato saranno opportunamente evidenziate le principali similitudini e differenze tra il nuovo e la prima versione del dispositivo sottolineando i miglioramenti ottenuti.

Il dissalatore è stato progettato seguendo le linee guida dettate dalla *Oman Humanitarian Desalination Challenge (OHDC)*, che ha come scopo quello di raccogliere e valutare, sottoforma di competizione in scala mondiale, idee innovative per incrementare la produzione di acqua potabile e renderla facilmente accessibile anche ai paesi in via di sviluppo. Dopo aver analizzato il modello teorico, la simulazione numerica verrà effettuata mediante l'utilizzo di un software simulativo chiamato COMSOL Multiphysics®, allo scopo di raccogliere i primi dati da confrontare con quelli che saranno raccolti in futuro durante la fase di testing del prototipo.

1. Introduzione

1.1 Carenza idrica nel mondo

Al giorno d'oggi la tecnologia si sviluppa molto rapidamente rendendo più semplice la vita di molte persone, tuttavia alcuni problemi storici rimangono ancora irrisolti, uno di questi è la scarsità di acqua potabile nel mondo. La società di oggi si trova a dover affrontare la necessità di ridurre i consumi, in quanto, le nuove tecnologie richiedono un maggior impiego di energia a cui fa spesso fronte un uso indiscriminato delle risorse idriche [1]. I dati più recenti mostrano addirittura una situazione sempre più preoccupante a causa dei cambiamenti climatici come il surriscaldamento globale, che influenzano notevolmente la quantità di acqua potabile accessibile [2]. Un terzo della popolazione mondiale deve affrontare un *“elevato stress idrico di base”*, mentre un quarto addirittura uno *“stress idrico di base estremamente elevato”* [3]. Con questi termini gli idrologi mettono in relazione la quantità di risorse idriche disponibili in un anno in una determinata area e la popolazione che vi abita (equazione *popolazione-acqua*). Generalmente quando l'acqua disponibile annualmente per persona è inferiore a 1700 m³ si definisce una situazione di stress idrico, quando tale soglia scende al di sotto di 1000 o 500 m³ all'anno si considera una situazione di elevata o estrema scarsità d'acqua [4], il 25% della popolazione mondiale vive in quest'ultima condizione. Nuove ricerche rivelano che oltre 500 milioni di persone vivono in luoghi in cui il consumo annuo di acqua è due volte maggiore rispetto alla quantità reintegrabile dall'atmosfera [5]. Ad oggi non esistono ancora soluzioni esaustive al problema e il numero di persone che non soddisfano il loro fabbisogno d'acqua è destinato ad aumentare sempre più, al passo con l'aumento demografico.

La figura 1.1 mostra la situazione relativa alla scarsità d'acqua nel mondo. Secondo questi dati 1.10 miliardi di persone al mondo non hanno accesso all'acqua, 1.80 miliardi devono affrontare la siccità per almeno sei mesi all'anno e, addirittura oltre 4 miliardi di persone ne soffrono almeno un mese all'anno.

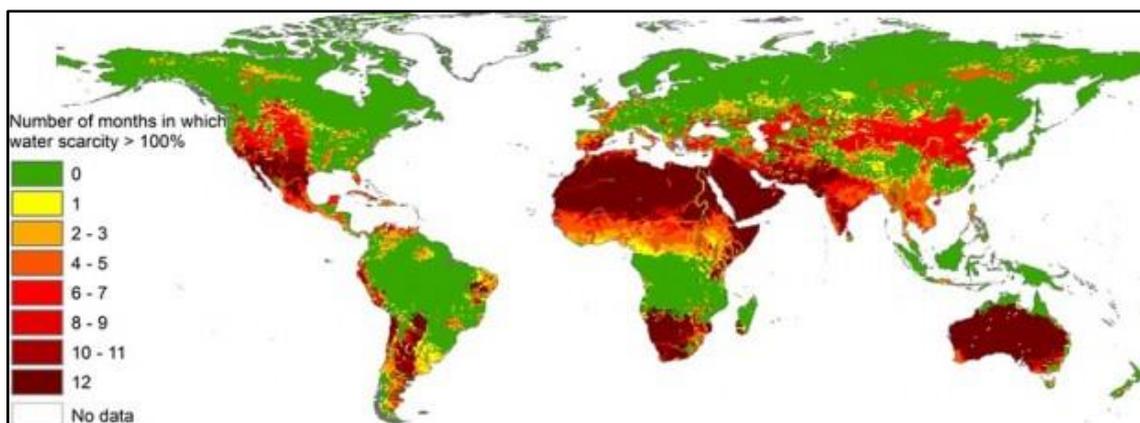


Figura 1. 1 - Carezza d'acqua potabile in scala globale. 'Immagine presa da [5]'

Possiamo suddividere il fenomeno della carezza idrica in due macrocategorie, può essere attribuito a cause di tipo fisiche o economiche, come mostrato in figura 1.2.

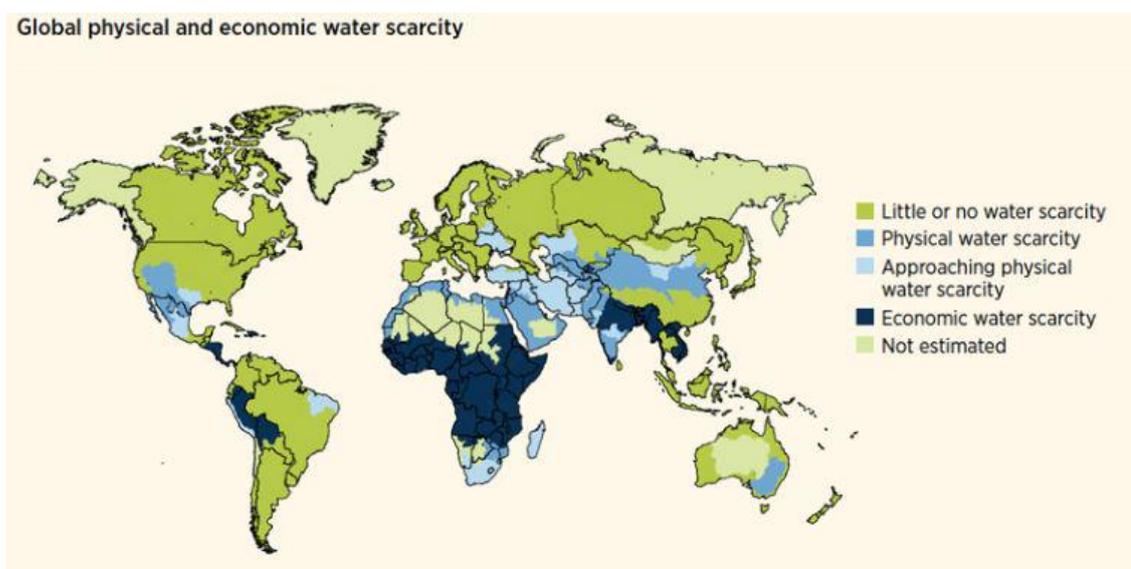


Figura 1. 2 - Carezza fisica ed economica globale. 'Immagine presa da [4]'

1.1.1 Insufficienza attribuibile a cause economiche

Coinvolge quei Paesi in cui la risorsa fisica per soddisfare la popolazione [6] è presente nel territorio ma mancano le infrastrutture idriche adeguate a sfruttare l'abbondanza di acqua. Ne fanno parte paesi dell'Africa, India settentrionale, Bolivia e Perù (vedi fig. 1.2).

1.1.2 Insufficienza attribuibile a cause fisiche

Le regioni che non possiedono le risorse primarie di acqua sono principalmente quelle che si trovano lungo l'equatore (fig. 1.2). La carenza fisica può a sua volta essere divisa in due piccoli sottogruppi; scarsità dovuta all'elevata richiesta, che causa stress idrico, e scarsità dovuta all'elevata popolazione, che causa carenza idrica [7].

Il primo gruppo è calcolato a partire dal prelievo annuale delle risorse naturali, il secondo dall'indice di stress idrico di Falkenmark che descrive l'affollamento di persone che condividono la stessa fonte [8]. È più semplice fare una previsione della scarsità fisica rispetto a quella economica, infatti fenomeni come la crescita demografica e il cambiamento climatico, sono ragioni che portano a poter dire che il problema è destinato a crescere. In molte risorse idriche la velocità di estrazione dell'acqua è superiore al tempo necessario per rigenerarla tramite il ciclo di vita dell'acqua [9], bisogna quindi trovare soluzioni a questo problema radicale.

1.1.3 Altre possibili cause

L'uomo ha sfruttato con successo molte delle vie navigabili messe a disposizione dalla natura, costruendo infrastrutture e sistemi di irrigazione che hanno permesso a molte civiltà di crescere e prosperare, sottovalutando però il fatto che tali sistemi idrici (fiumi, laghi, falde acquifere ecc..) si stanno via via prosciugando [10]. Oltre alla crescita demografica, che negli ultimi 50 anni ha visto raddoppiare la popolazione terrestre, la causa della scarsità può essere attribuita anche a fenomeni quali l'inquinamento o ad un eccessivo utilizzo in agricoltura.

L'inquinamento delle acque è dovuto a diverse cause tra cui l'uso di pesticidi e fertilizzanti che penetrando nel terreno inquinano le falde acquifere sotterranee. In alcuni casi i loro effetti sono immediati, in altri possono essere necessari anni prima che si accumulino nell'ambiente per poter poi essere riconosciuti [9]. Il 70% dell'acqua potabile accessibile è sfruttata dall'agricoltura, di cui però circa il 60% viene sprecata a causa di sistemi di irrigazione inefficienti e con molte perdite. Questo spreco sta prosciugando molte risorse, e allo stesso tempo molti paesi tra cui India, Cina, Australia, Spagna e Stati Uniti stanno per raggiungere il limite di risorse idriche [9].

1.2 Approvvigionamento d'acqua potabile

Per soddisfare la domanda d'acqua nel mondo bisogna utilizzare le risorse idriche presenti sulla terra. L'acqua sul nostro pianeta è presente praticamente ovunque, per un totale in volume di circa 1.40 miliardi di km^3 , la stragrande maggioranza si trova in mari e oceani, una piccola percentuale sulla superficie terrestre e una componente infinitesima addirittura in atmosfera sottoforma di gas. La figura 1.3 mostra nel dettaglio come è distribuita l'acqua sul nostro pianeta, evidenziando quanto di essa è effettivamente utilizzabile come risorsa idrica.

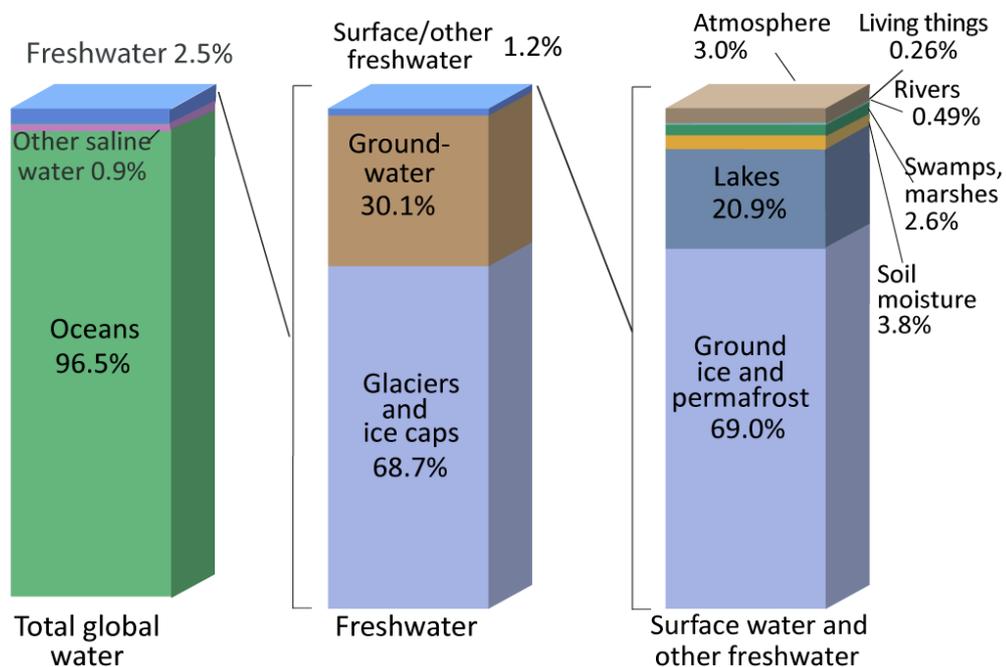


Figura 1.3 - Distribuzione dell'acqua sulla Terra. 'Immagine presa da [11]'

Possiamo notare come dell'approvvigionamento idrico totale oltre il 96% è salino, mentre solo il 2.5% racchiude acqua dolce, ovvero quella necessaria per sopravvivere. Quest'ultima non risulta essere direttamente accessibile in quanto una parte è contenuta nei ghiacciai (circa il 69%) e una parte sottoterra (30%). Solo poco più dell'1.2% di acqua dolce si trova in superficie sottoforma di ghiaccio, laghi e fiumi, questi ultimi i più sfruttati dall'uomo. In sostanza solo circa lo 0.027% dell'acqua totale è utilizzabile dagli esseri viventi [12]. La tabella 1.1 mostra una stima della distribuzione globale dell'acqua.

Sorgente d'acqua	Volume d'acqua [km ³]	Percentuale di acqua totale [%]	Percentuale di acqua dolce [%]
Oceans, Seas & Bays	1,338,000,000	96.54	--
Ice caps, Glaciers & Permanent Snow	26,06,000	1.74	68.7
Groundwater	23,400,000	1.69	--
<i>Fresh</i>	10,530,000	0.76	30.1
<i>Saline</i>	12,870,000	0.93	--
Soil Moisture	16,500	0.001	0.05
Ground Ice & Permafrost	300,000	0.022	0.86
Lakes	176,400	0.013	--
<i>Fresh</i>	91,000	0.007	0.26
<i>Saline</i>	85,400	0.006	--
Atmosphere	12,900	0.001	0.04
Swamp Water	11,470	0.0008	0.03
Rivers	2,120	0.0002	0.006
Biological Water	1,120	0.0001	0.003

Tabella 1. 1 - Distribuzione globale dell'acqua

Come detto in precedenza l'acqua sulla superficie terrestre viene solitamente prelevata da fiumi, mari e laghi, spesso però è possibile attingere ad essa attraverso acque sotterranee presenti nel sottosuolo. La maggior parte delle acque sotterranee presente sul pianeta vengono sottoposte ad un ciclo chiuso detto *ciclo idrologico*. Questo fenomeno consiste in una serie ripetuta di cambiamenti di fase dell'acqua tramite evaporazione e condensazione, la formazione del vapore avviene grazie all'irraggiamento mentre la fase di deflusso principalmente grazie alla gravità. Il ciclo idrologico è fondamentale per riuscire a distinguere le *risorse idriche rinnovabili* da quelle *non rinnovabili*. Sono dette rinnovabili quelle risorse capaci di rigenerarsi in breve tempo, ovvero, tutte quelle che partecipano al ciclo idrologico; si tratta di tutta l'acqua accessibile al livello del suolo o acque sotterranee poco profonde. Parliamo di risorse non rinnovabili riferendoci a ghiacciai o acque sotterranee molto profonde [13].

Solo una minima parte delle risorse idriche presenti sulla Terra può essere utile alla vita degli organismi, è per questo motivo che negli anni molte ricerche hanno portato avanti studi e idee con lo scopo di incrementare il quantitativo di risorse utilizzabili, queste ricerche si concentrano principalmente su: estrazione e desalinizzazione [14] [15].

L'estrazione dell'acqua sotterranea è un lavoro molto complesso e dispendioso a causa dell'utilizzo di impianti di prelievo e di pompe molto costose, per questo motivo il campo di ricerca più diffuso è quello della desalinizzazione che ha portato allo sviluppo di sistemi economicamente più abbordabili e allo stesso tempo altamente efficienti in scala globale.

1.3 Sistemi di desalinizzazione dell'acqua

La desalinizzazione è il processo attraverso il quale i sali minerali vengono rimossi dall'acqua allo scopo di ottenere un prodotto a basso contenuto salino che verrà utilizzato per uso alimentare, industriale o come acqua di raffreddamento. Per la produzione di acqua potabile, la desalinizzazione deve essere effettuata rispettando i livelli di contaminazione imposti dall'*Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS o WHO – World Health Organization)*, ovvero di 500 ppm (*parti per milione*) [16]. Ad oggi i sistemi di desalinizzazione producono poco più dell'1% dell'acqua potabile nel mondo [17], una percentuale che mostra come questa tecnica sia ancora lontana dall'essere la principale fonte di approvvigionamento. Il principale fattore che impedisce il decollo di questa tecnica è rappresentato dall'inquinamento, rendere l'acqua potabile infatti, richiede un elevato consumo di energia (impianti ad osmosi inversa necessitano di 31 MW per fornire acqua a 300000 persone al giorno [18]) e quindi di costi, ma la nascita di nuove tecnologie sembra portare verso una strada praticabile nel prossimo futuro. Nel 2015 venivano prodotti circa 97.5 milioni di m^3 di acqua al giorno per desalinizzazione, numero destinato ad aumentare fino a 192 milioni di m^3 al giorno nel 2050 [19] [20]. La figura 1.4 mostra uno schema generale del principio di funzionamento di un impianto di dissalazione. L'acqua di alimentazione prelevata da una sorgente viene immessa nell'impianto e trattata con un certo consumo di energia, il processo genera due prodotti, da una parte il distillato destinato all'uso comune e dall'altra l'acqua residua o salamoia che sarà scartata.

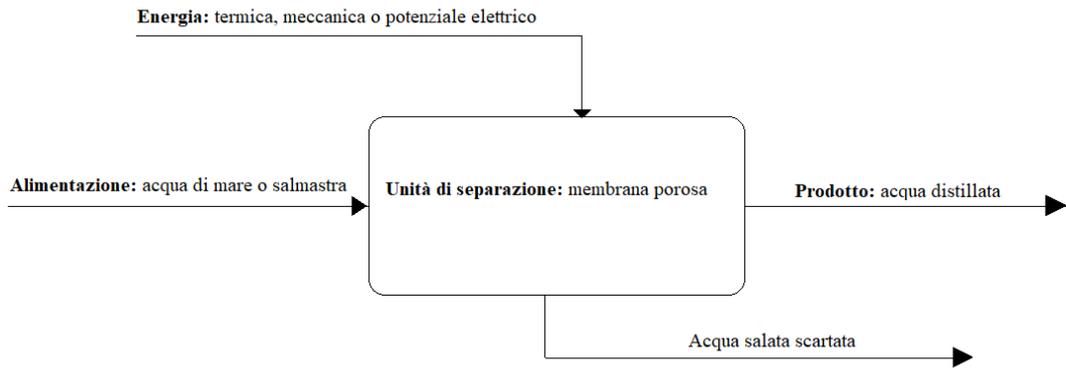


Figura 1. 4 - Schema di un generico impianto di dissalazione

Una pratica utilizzata per contrastare i problemi ambientali è l'integrazione di impianti di desalinizzazione con fonti rinnovabili, come mostra la figura 1.5.

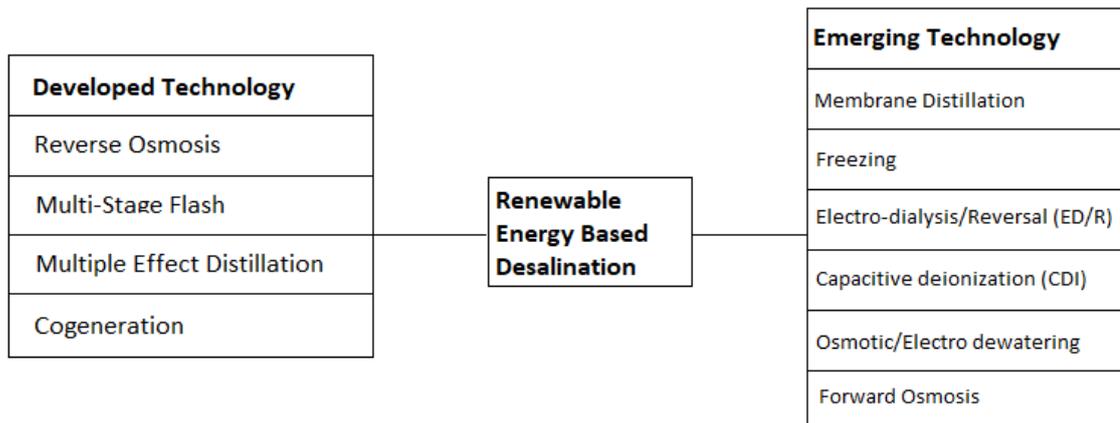


Figura 1. 5 - Tecniche associate a fonti rinnovabili. 'Immagine presa da [21]'

L'acqua prodotta per dissalazione ha un costo più elevato di quella proveniente da risorse naturali (circa 1620 \$ per 1000 m³ [22]), questo aspetto è conseguenza dell'alto consumo di energia richiesto per questo tipo di impianti. Lo scopo dei recenti studi è quindi quello di ridurre tali costi. Esistono sistemi di dissalazione a costi più contenuti e che hanno lo scopo di dissalare l'acqua salmastra, che possiede una salinità di circa 10 g/L [17] contro i 35 g/L dell'acqua del mare (il termine salinità si riferisce alla conducibilità elettrica dell'acqua e fornisce una misura delle sostanze solide disciolte, tipicamente espressa in ppm o mg/kg). Purtroppo, questo campo di ricerca risulta poco attraente in quanto solo l'1% dell'acqua sulla terra ha suddette caratteristiche.

È possibile distinguere i sistemi di dissalazione con il solare in *diretti* e *indiretti*, i primi usano l'energia solare direttamente nei collettori sfruttando l'effetto serra, i secondi invece, sono accoppiati con i sistemi di desalinizzazione tradizionali, l'energia solare captata quindi, è usata per produrre calore o energia da fornire agli impianti. Le tecniche di desalinizzazione indiretta hanno una produttività più elevata, tuttavia i sistemi diretti sono ancora molto diffusi, man mano che diventano più competitivi nei piccoli sistemi di produzione, grazie al loro basso costo e alla loro semplicità di utilizzo [23].

La figura 1.6 mostra una panoramica dei sistemi di dissalazione solare (alimentazione per irraggiamento diretto) secondo la distinzione tra sistemi diretti e indiretti.

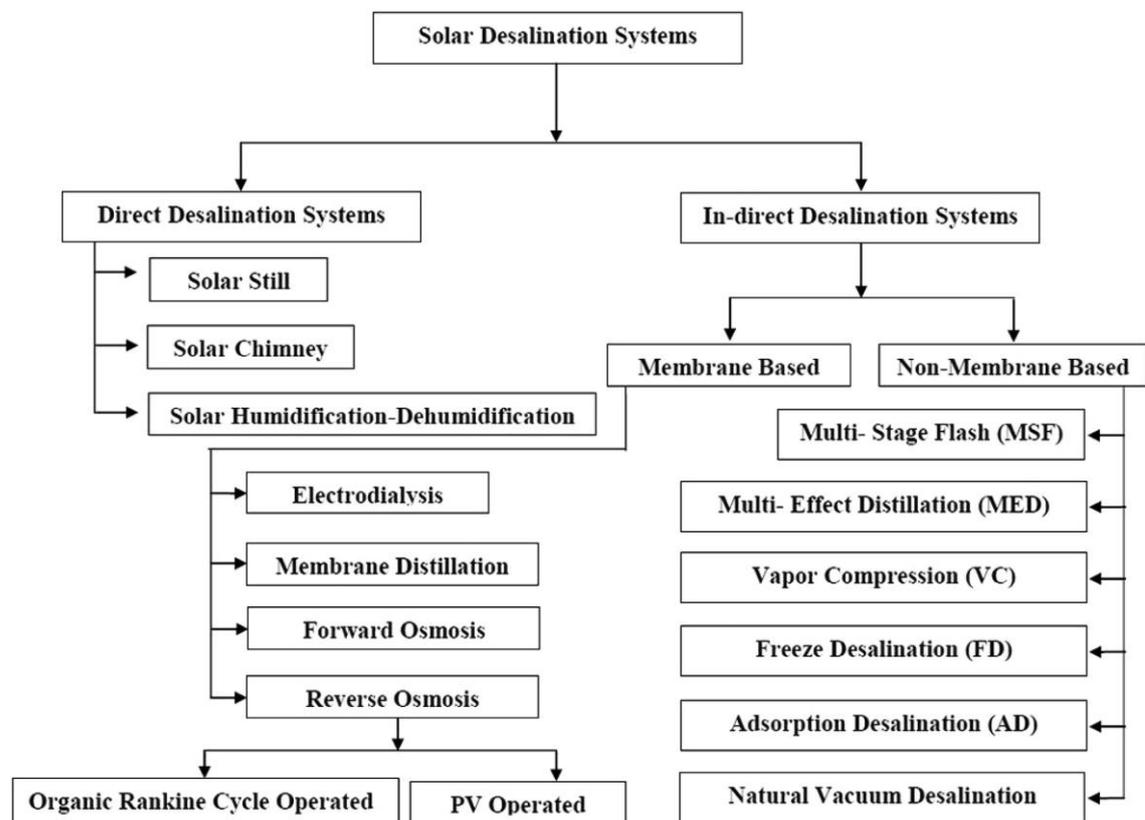


Figura 1. 6 - Panoramica dei sistemi di dissalazione solare. 'Immagine presa da [28]'

Un'altra importante distinzione può riguardare il principio di funzionamento, possiamo infatti distinguere processi di desalinizzazione a *base termica* (cambiamento di fase) o *basata su membrana*. Le tecnologie in base termica sfruttano una fonte di calore per far evaporare l'acqua e successivamente condensarla, lasciando i sali minerali nella

soluzione salina; le tecnologie basate sull'utilizzo di membrane invece sfruttano il principio dell'osmosi inversa per filtrare l'acqua e separarla dal sale. I processi a base termica richiedono elevati costi di gestione e di impianto, inoltre il loro funzionamento richiede un'elevata quantità di energia che proviene principalmente da combustibili fossili [24], per questo motivo, questo tipo di impianti si possono trovare in zone come il Medio Oriente [25] dove il costo del combustibile è maggiormente sostenibile.

Negli ultimi anni, l'utilizzo di sistemi a membrana sta diventando sempre più ampio anche in regioni a basso costo energetico [26] [27], questo grazie alla loro elevata efficienza energetica, il ridotto spazio richiesto, semplicità operativa e di automazione. I sistemi di dissalazione possono ancora essere classificati in funzione del tipo di azionamento in *attivi* e *passivi*. Il primo è così definito ogni volta che è implicito l'uso di fonti di energia esterne; i sistemi passivi, invece, basano il loro principio di funzionamento sulla combinazione smart di materiali ad elevato assorbimento solare e isolanti, evitando così l'aiuto di qualsiasi fonte di alimentazione esterna, elettrica o meccanica che sia.

Di seguito verrà fatta una distinzione tra le tecniche di dissalazione più diffuse, in particolare si è deciso di confrontare i sistemi attivi e passivi.

1.4 Sistemi attivi

Come accennato, i sistemi di desalinizzazione possono essere suddivisi in distillazione termica e dissalazione a membrana, a loro volta questi contengono dei sottogruppi [28].

I principali sistemi a distillazione termica sono *Multi-Stage Flash (MSF)*, *Multi-Effect Distillation (MED)*, *Vapour Compression (VC)*; mentre per quanto riguarda le tecnologie a membrana si parla di dispositivi *Reverse Osmosis (RO)* ed *Electro-Dialysis (ED)*.

Un primo confronto tra le tecniche di dissalazione attiva più comuni è mostrata nella tabella 1.2, successivamente si entrerà nel dettaglio di ognuna di esse.

	Tipologia di processo	Natura Energia	Produttività [m ³ /giorno]	Qualità acqua prodotta [ppmTDS]	Energia media totale richiesta [kWh/m ³]	Costo medio [US\$/m ³]	Impiego
MSF	Distillazione	Termica-Elettrica	23000-528000	10	19.58-27.25	0.52-1.75	Salata/Sal mastra
MED	Distillazione	Termica	91000-320000 12000-55000 Meno di 100	10	14.45-21.35	0.52-1.01 0.95-1.50 2.0-8.0	Salata/Sal mastra
VC	Distillazione	Meccanica-Elettrica	1000-30000	10	7-12 MVC 16.26 TVC	0.87-0.95 2.0-2.6	Salata/Sal mastra
RO	Membrana	Elettrica	Fino a 395000	400-500 (SW) 200-500 (BW)	4-6 (SW) 1.5-2.5 (BW)	0.45-1.72 (SW) 0.26-0.54 (BW)	Salata/Sal mastra
ED	Membrana	Elettrica	Fino a 145000	150-500	0.7-5.5	0.6-1.05	Salmastra
MD	Membrana	Termica-Elettrica	/	/	~100	~15	Salata/Sal mastra

Tabella 1. 2 - Confronto tra tipologie di impianti con efficienza del 30% [29], [28] [30]

L'energia media totale richiesta tiene conto della somma tra quella necessaria alla distillazione e quella necessaria all'azionamento delle pompe [28].

1.4.1 MSF (Multi-Stage Flash)

La distillazione MSF richiede un elevato quantitativo di energia sia termica che elettrica. L'energia termica viene sfruttata sottoforma di vapore a bassa pressione (1-3 bar), nella fase di alimentazione, e vapore a media pressione, per la generazione di vuoti tramite eiettori nelle diverse sezioni dell'impianto [28]. L'energia elettrica invece permette l'azionamento di pompe, circuiti di raffreddamento e i vari dispositivi presenti nell'impianto. Il processo MSF produce tra 10000-35000 m³/giorno di distillato ed è costituito da una serie di stadi (4-40 stadi) in cui i livelli di temperatura e pressione si abbassano progressivamente causando l'evaporazione istantanea (evaporazione *flash*) dell'acqua salata. Lo schema dell'impianto MSF è mostrato in figura 1.7.

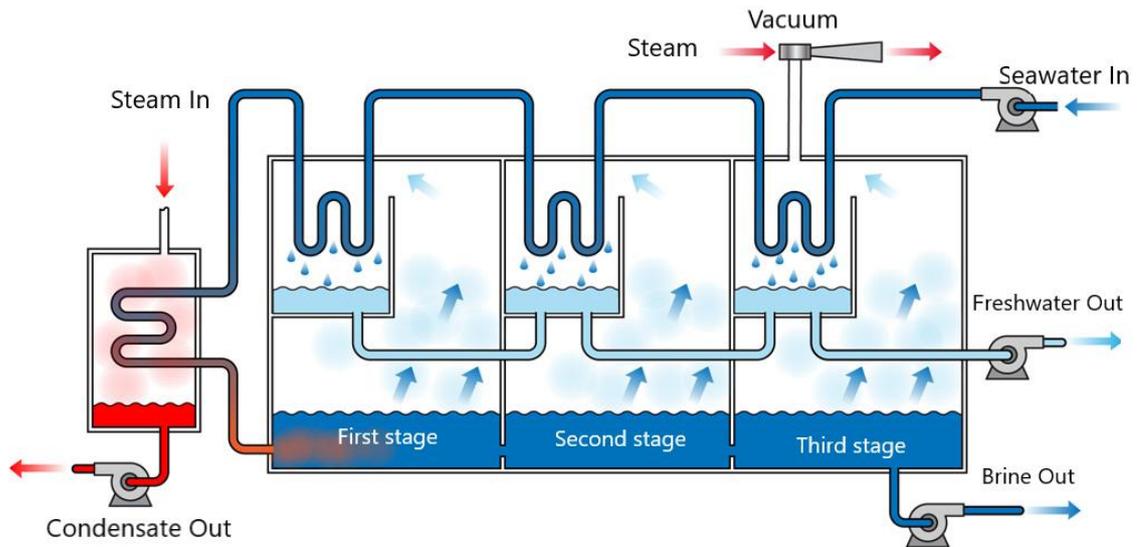


Figura 1. 7 - Schema impianto MSF. 'Immagine presa da [28]'

Il funzionamento degli impianti MSF si basa su un concetto abbastanza semplice [28]. L'acqua salmastra entra nel circuito per mezzo di una pompa di alimentazione, attraversa i vari stadi aumentando progressivamente la temperatura (per preriscaldare l'acqua) fino a raggiungere una temperatura di 90-100°C quando entra nella caldaia. A questo punto l'acqua salmastra ad alta temperatura entra nel primo stadio, in cui pressione e temperatura sono nettamente inferiori, e subisce un'evaporazione istantanea. L'acqua evaporata, una volta a contatto col fascio tubiero dello scambiatore (a temperatura inferiore), condensa nuovamente, raccogliendosi in un bacino posto a mezza altezza nella camera. Ogni stadio è posto in comunicazione col successivo dove sia pressione che temperatura diminuiscono gradualmente avvicinandosi all'ultimo. Il processo di evaporazione e condensazione quindi, avviene in ogni camera ma a temperatura e pressioni inferiori rispetto allo stadio precedente. Anche i bacini di condensa comunicano tra loro, permettendo quindi, di raccogliere via via un distillato con salinità sempre più bassa fino allo scarico.

L'energia elettrica equivalente richiesta per la desalinizzazione, considerando un impianto con un'efficienza del 30%, è compresa nell'intervallo tra 15.83-23.5 kWh/m³, a cui va sommato un ulteriore contributo necessario all'azionamento delle pompe compreso tra 2.5-5 kWh/m³ [28]. Per un impianto con una capacità produttiva compresa tra 23000-528000 m³/giorno, il costo della produzione di acqua si aggira intorno 0.52-1.75 US\$/m³ [28] [31] [32].

1.4.2 MED (Multi-Effect Distillation)

La tecnologia MED ha origini più lontane della MSF, tuttavia, sebbene quest'ultima rappresenti oggi una delle principali tecnologie di dissalazione al mondo (26% della produzione mondiale), la MED detiene ancora il 6% della produzione mondiale [33].

Il principio di funzionamento di questa tecnica sfrutta le diverse volatilità dei vari componenti dell'acqua in modo da far evaporare solo quella dolce. La figura 1.8 mostra lo schema di funzionamento di un impianto MED.

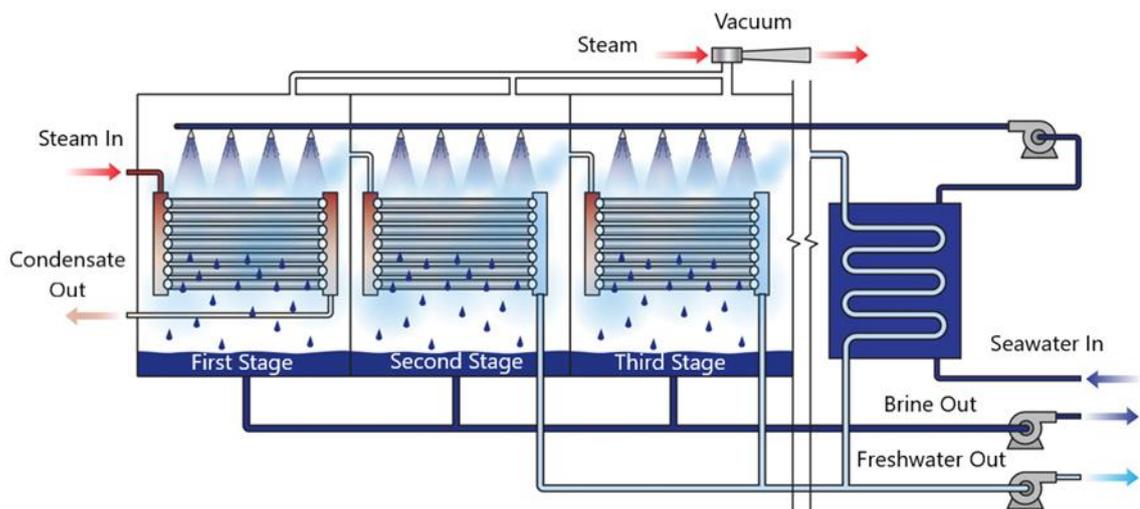


Figura 1. 8 - Schema di un impianto MED. 'Immagine presa da [28]'

L'acqua salata di alimentazione viene immessa nel circuito tramite una pompa e preriscaldata dal vapore proveniente dall'ultimo stadio [28]. I vari stadi sono mantenuti a livelli di pressione e temperatura decrescenti, in particolare, il primo stadio utilizza il calore proveniente da una caldaia a combustibile esterna per portare la temperatura del vapore a circa 70°C, ciò consente l'evaporazione dell'acqua salata spruzzata sullo scambiatore. Il vapore acqueo dolce generatosi passa allo stadio successivo a temperatura e pressione leggermente inferiori, consentendo a sua volta l'evaporazione dell'acqua salata proveniente dagli spruzzi. Gli scambiatori sono costituiti da due tubi verticali e una serie di tubi posti orizzontalmente. Nello specifico, il condotto verticale di sinistra a temperatura più alta consente l'evaporazione dell'acqua, la condensa dolce che si genera scorre nel condotto verticale di destra per poi raccogliersi nel bacino di acqua distillata.

L'acqua salmastra che non riesce ad evaporare si deposita nel fondo della camera ed estratta tramite una pompa. In particolare, il primo stadio serve a generare il vapore acqueo con le condizioni necessarie all'intero processo di distillazione, la condensa generatasi non viene raccolta come distillato ma va scartato.

Solitamente un impianto MED è costituito da un numero di stadi tra 2-16, con una capacità produttiva di 600-30000 m³/*giorno* [28] e richiede l'utilizzo di due tipi di energia, termica ed elettrica. Il processo di distillazione per un impianto con efficienza del 30% richiede un'energia equivalente compresa tra 12.2 e 19.1 kWhe/m³ [28] [34], a cui va sommata l'energia necessaria all'azionamento delle pompe. L'energia totale equivalente richiesta va da 14.45 a 21.35 kWhe/m³.

Per impianti con capacità produttiva superiore a 90000 m³/*giorno* il costo si aggira tra 0.52-1.01 US\$/m³, per impianti di media capacità 12000-55000 m³/*giorno* ammonta tra 0.95-1.95 US\$/m³ [28] [31] [32].

1.4.3 VC (Vapor Compression)

Gli impianti di distillazione VC basano il loro funzionamento sullo sfruttamento del calore generato dalla compressione del vapore acqueo. Per far evaporare l'acqua salata si possono sfruttare due tecniche di compressione del vapore, meccanica (MVC) e termica (TVC) [28]. La figura 1.9 mostra lo schema di funzionamento di un impianto VC con i due metodi di compressione possibili.

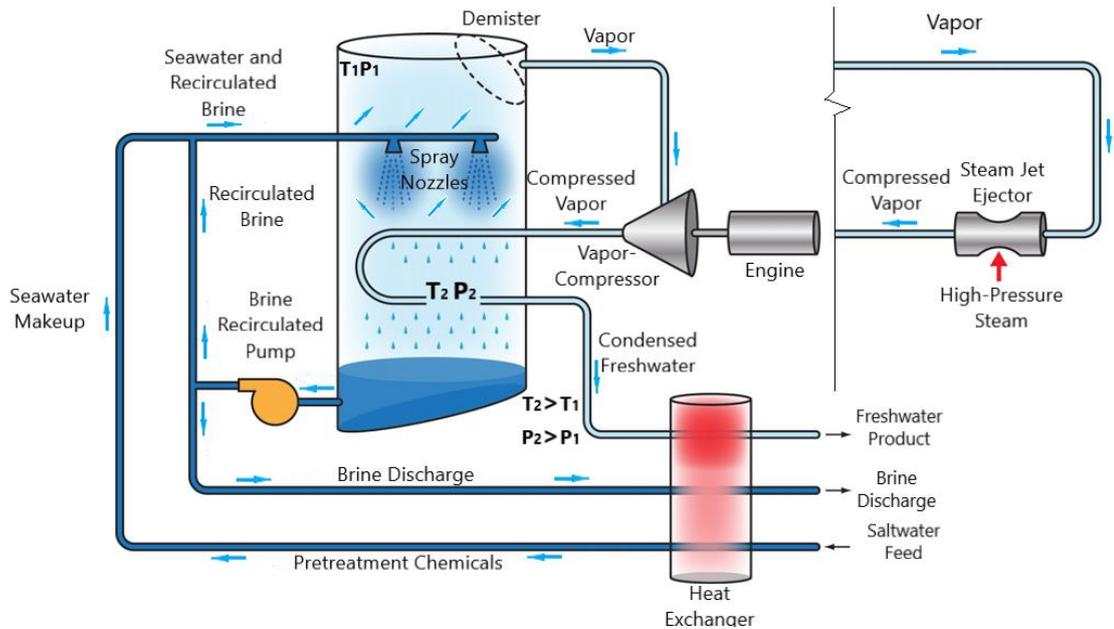


Figura 1. 9 - Schema di un impianto VC (MVC e TVC). 'Immagine presa da [28]'

L'acqua salata di alimentazione entra nel sistema dopo aver attraversato uno scambiatore di calore, una volta raggiunta la camera di evaporazione l'acqua viene spruzzata tramite degli ugelli su un tubo ad alta temperatura, l'acqua condensata si deposita sul fondo, il vapore generatosi invece, subisce una compressione al fine di incrementare ulteriormente la sua temperatura prima di essere estratto come distillato. L'acqua salmastra condensata verrà in parte rimessa in circolo per l'evaporazione e in parte estratta come scarto. Come accennato, la compressione del vapore può avvenire mediante un processo meccanico (MVC) o termico (TVC), il primo sfrutta l'energia elettrica per azionare un compressore, il secondo sistema invece, comprime il vapore tramite un eiettore [28].

Generalmente questi impianti sono utilizzati per piccole-medie produzioni, per capacità produttive di $100-3000 \text{ m}^3/\text{giorno}$ si utilizzano impianti MVC in quanto costituiti da un solo stadio, per affrontare produzioni più ingenti, $10000-30000 \text{ m}^3/\text{giorno}$, si usano impianti TVC, solitamente pluristadio [35] [28] [36].

L'energia meccanica necessaria per un sistema MVC si limita al consumo di elettricità per l'azionamento delle pompe, si tratta un intervallo da 7 a $12 \text{ kWhe}/\text{m}^3$. Per gli impianti TVC invece, servono sia energia elettrica che termica per un consumo totale di circa $16.26 \text{ kWhe}/\text{m}^3$ [34]. Questa tecnologia è solitamente utilizzata per sistemi a bassa

capacità produttiva, circa $1000 \text{ m}^3/\text{giorno}$, con costi che si aggirano tra $2.0\text{-}2.60 \text{ US\$/m}^3$ [28] [32] [31].

1.4.4 RO (Reverse Osmosis)

Il sistema di desalinizzazione per osmosi inversa (RO) è attualmente la tecnica di dissalazione più affidabile e utilizzata al mondo [37], il 61% [33] dell'acqua dolce è prodotta con questa tecnologia che consiste in una depurazione pressurizzata dell'acqua salata per mezzo di un filtro composto da una membrana semipermeabile che consente il passaggio dell'acqua e respinge il sale. Questo processo consente di ottenere una separazione netta di concentrazione salina ai lati opposti della membrana, acqua distillata da una parte e la soluzione salina dal lato a pressione maggiore [28]. La figura 1.10 mostra uno schema di un comune impianto RO.

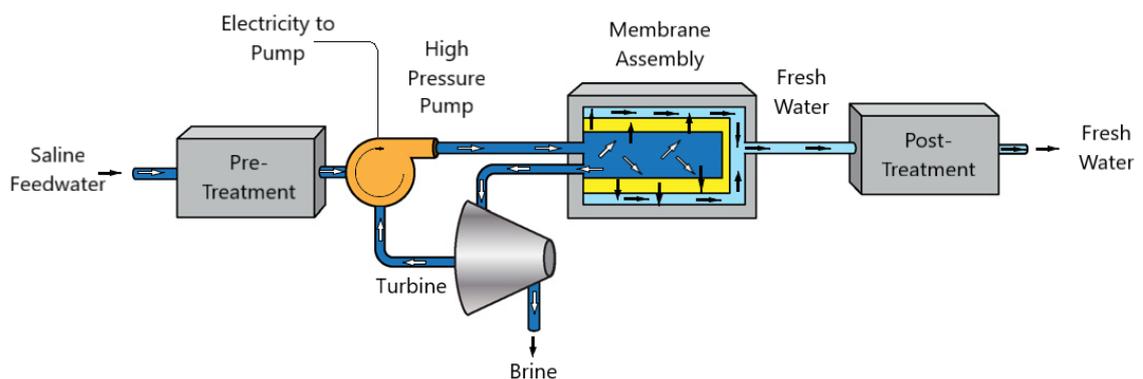


Figura 1. 10 - Schema impianto RO. 'Immagine presa da [28]'

L'impianto è composto da quattro sottosistemi: 1) pre-trattamento; 2) pompa alta pressione; 3) membrana; 4) post-trattamento. Il pre-trattamento dell'acqua di alimentazione consiste in: filtrazione, sterilizzazione e aggiunta di componenti chimici per evitare incrostazioni; la pompa serve a generare la pressione necessaria a far passare il fluido attraverso la membrana; le membrane sono progettate per filtrare acqua a circa 500 ppm, dopo aver attraversato la membrana l'acqua viene divisa in due flussi, uno pieno di rifiuti che viene scartato e un altro che contiene il prodotto distillato; il post-trattamento elimina i gas come idrogeno solforato e regola il pH [28].

La capacità produttiva dipende dalla loro applicazione, si passa da $0.1 \text{ m}^3/\text{giorno}$ per uso domestico, a $395000 \text{ m}^3/\text{giorno}$ per uso commerciale.

L'unica forma di energia richiesta è di tipo elettrico, il consumo dipende unicamente dalla concentrazione salina dell'acqua in quanto, una maggior salinità richiede una maggior energia sottoforma di pressione osmotica. Per i tipici impianti con acqua marina (SWRO) e produttività di $24000 \text{ m}^3/\text{giorno}$ si consuma un livello di energia elettrica da 4-6 kWhe/m^3 , per impianti con acqua salmastra (BWRO) invece, da 1.5 a 2.5 kWhe/m^3 [28] [34].

Negli ultimi anni il costo della produzione mediante RO si è abbassato, per i grossi impianti SWRO (produttività tra $100000\text{-}320000 \text{ m}^3/\text{giorno}$) l'intervallo è $0.45\text{-}0.66 \text{ US}\$/\text{m}^3$; per impianti di medie dimensioni ($15000\text{-}60000 \text{ m}^3/\text{giorno}$) il costo si aggira intorno $0.48\text{-}1.62 \text{ US}\$/\text{m}^3$; per piccoli impianti ($1000\text{-}4800 \text{ m}^3/\text{giorno}$) da 0.7 a $1.72 \text{ US}\$/\text{m}^3$ [28] [32] [31].

Per impianti BWRO con capacità produttiva tra $40000\text{-}46000 \text{ m}^3/\text{giorno}$, il costo medio si aggira intorno $0.26\text{-}0.54 \text{ US}\$/\text{m}^3$.

1.4.5 ED (Electro-Dialysis)

Dopo il sistema RO, quello ED è probabilmente la più importante tecnologia basata su membrana, in quanto una tra le più diffuse per dissalazione dell'acqua salmastra. Il suo principio di funzionamento, schematizzato in figura 1.11, si basa sulla separazione di ioni.

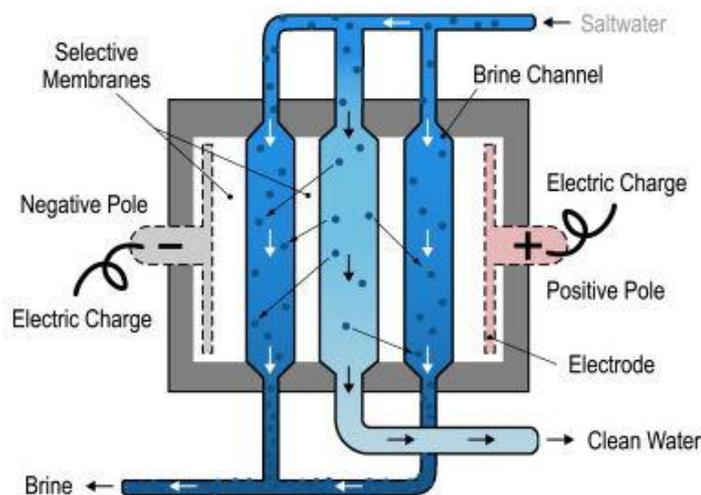


Figura 1. 11 - Schema di un impianto ED. 'Immagine presa da [28]'

L'elettrodialisi (ED) è un processo che consiste in una separazione elettrochimica a pressione ambiente, sfrutta la corrente continua per spingere gli ioni di sale dell'acqua distillata attraverso una membrana, ottenendo una separazione distinta delle due fasi. La tecnica sfrutta la dissoluzione del sale in acqua, attraverso la quale viene scomposta in ioni positivi (Na^+) e ioni negativi (Cl^-). I componenti fondamentali che costituiscono questo sistema sono: 1) sistema pre-trattamento; 2) membrane selettive; 3) pompa bassa pressione; 4) alimentazione a corrente continua; 5) post-trattamento [28].

Il sistema di alimentazione porta l'acqua di mare nel circuito grazie l'utilizzo di pompe a bassa pressione. L'acqua quindi, entra in un contenitore in cui delle membrane per lo scambio ionico sono posizionate in parallelo per formare dei canali alternati. Gli elettrodi, generalmente in niobio o titanio rivestiti di platino, vengono caricati da un generatore di corrente continua posto esternamente. Quando l'acqua salmastra attraversa i canali e gli elettrodi sono carichi, gli ioni positivi di sale attraversano la membrana cationica e si dirigono verso gli elettrodi negativi, viceversa, gli ioni negativi di sale attraversano la membrana anionica dirigendosi verso gli elettrodi positivi, il risultato sarà la rimozione del sale dall'acqua [28], in particolare, la salamoia scorre nei canali esterni mentre il distillato nel canale centrale [38] [39]. Le operazioni di pre e post-trattamento vanno eseguite in serie col sistema, allo scopo di rimuovere i residui galleggianti che rischiano di sporcare le membrane. Quando il sistema lavora per lungo tempo bisogna ripulire le membrane per mantenere un'efficienza costante, tale operazione viene generalmente eseguita invertendo gli elettrodi, in questo modo, si invertono i flussi e gli ioni depositati sulla membrana vengono rimossi. Il processo in questione è chiamato *Electrodialysis Reversal (EDR)* [28]. Generalmente la capacità produttiva di questi impianti varia da 2 a 145000 m³/giorno.

Per tutti i processi a membrana l'unica forma di energia richiesta è quella elettrica, nello specifico, per un sistema ED la corrente continua alimenta gli elettrodi, mentre il sistema di pompe viene azionato solitamente da corrente alternata [28]. Per impianti che lavorano con acqua a bassa salinità (< 2500 ppm) si consumano tra 0.7-2.5 kWhe/m³, per quelli a salinità elevata (tra 2500-5000 ppm) ci si aggira tra 2.64-5.5 kWhe/m³.

I sistemi RO e ED sono i sistemi di desalinizzazione più economici, pre quanto riguarda quest'ultimo, viene spesso preferito al RO per livelli di contaminazione più bassi. Il costo

di produzione dell'acqua per un impianto ED va da 0.6 a 1.05 US\$/m³, dipendente quasi unicamente dal grado di salinità dell'acqua di alimentazione [28] [31] [34].

1.4.6 MD (Membrane Distillation)

La distillazione a membrana è un importante tecnologia per la dissalazione dell'acqua ad elevata salinità, inoltre, può essere impiegata anche nel trattamento delle acque reflue e nella produzione di concentrato liquido. I vantaggi di questo metodo sono stati a lungo trascurati, favorendo il minor costo operativo garantito dai sistemi RO, MSF e MED. Tuttavia, MD ha riscosso nuovamente interesse grazie allo sviluppo di componenti versatili che permettono l'utilizzo di questa tecnica anche in aree remote, e che consentono una riduzione di energia termica ed elettrica, nonché un maggior recupero dell'acqua [40]. La distillazione su membrana ha il grande vantaggio di funzionare a basse temperature e pressioni. Il principio di funzionamento è mostrato in figura 1.12.

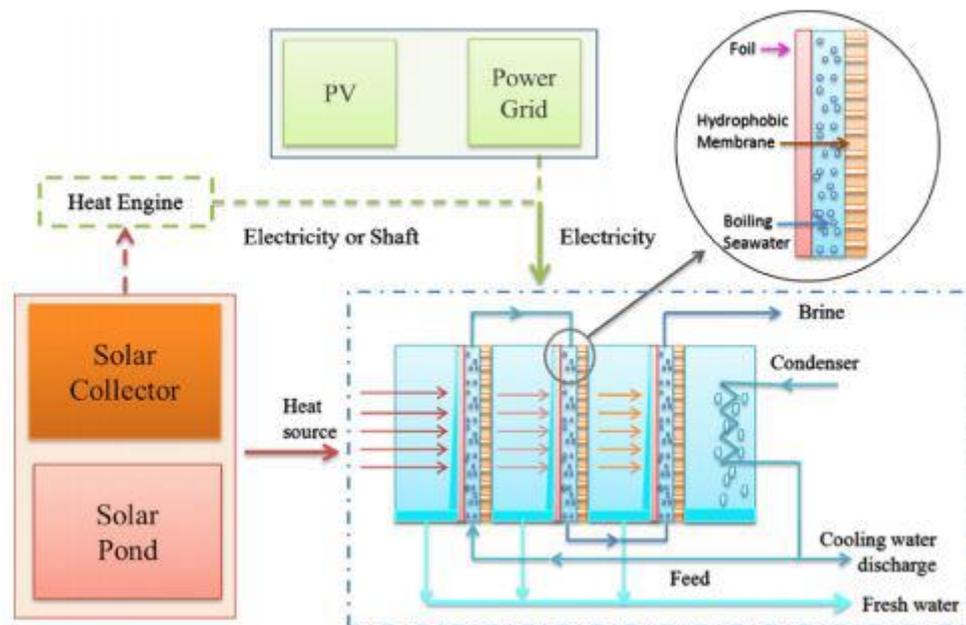


Figura 1. 12 - Schema di un impianto MD. 'Immagine presa da [41]'

Lo scopo di questi sistemi è quello di sfruttare l'evaporazione dell'acqua per eliminare eventuali soluti non volatili. Il vapore acqueo attraversa un canale delimitato da una lamina riscaldata da un lato e una membrana microporosa idrofoba dall'altro, che non

permette il passaggio dell'acqua nella forma liquida, ma permeabile al vapore. Quando il vapore oltrepassa la membrana, guidato dalla differenza di pressione e di temperatura ai lati opposti, condensa formando acqua distillata priva di sali. Il calore latente rilasciato dal vapore può essere riutilizzato in un nuovo stadio. Al fine di aumentare il flusso di vapore acqueo bisogna incrementare al massimo il gradiente di pressione e di temperatura ai lati della membrana, per questo motivo si può pensare di accoppiare il dispositivo con sistemi industriali o assorbitori solari [42] [43].

Esistono quattro configurazioni principali che differiscono per il meccanismo di raccolta del flusso di vapore acqueo dal permeato [44]:

- 1. DCMD (Direct Contact Membrane Distillation):** contatto diretto con un flusso di acqua fredda nel permeato [45]. È la configurazione più semplice e diffusa, entrambi i fluidi, vaporizzato e condensato sono a contatto con la membrana, il vapore attraversa la membrana porosa guidato dalla differenza di pressione ai due lati. Possiedono una buona capacità di separazione del sale ma soffrono di elevate perdite di calore trans-membrana, di conseguenza basso flusso attraverso di essa. I sistemi DCMD testati con soluzioni di NaCl contenenti tra 35000-100000 ppm hanno raggiunto un flusso di membrana da 1 a 10 $L/(m^2 h)$ [46]. Lo svantaggio più grande di questi sistemi è causato dall'acqua fredda sul lato permeato che provoca grandi perdite termiche attraverso la membrana sottile.
- 2. AGMD (Air Gap Membrane Distillation):** il vapore acqueo rimane a contatto con la membrana mentre, dalla parte opposta il fluido freddo condensato è separato da essa per mezzo di un'intercapedine d'aria [45]. Generalmente a parità di temperatura, la configurazione AGMD consente un flusso di massa leggermente più elevato di altre configurazioni, in quanto il traferro isola termicamente il vapore caldo dall'acqua fredda condensata. Il vantaggio di questa configurazione consiste nelle limitate perdite di calore per conduzione. Lo strato di condensa è circa 10 volte più sottile dell'intercapedine d'aria [46]. I flussi di massa per sistemi AGMD operanti con acqua di alimentazione alla temperatura di 70 °C variano in un intervallo tra 10 $L/(m^2h)$ e 65 $L/(m^2h)$ [46] [47].

3. SGMD (Sweep Gas Membrane Distillation): un gas freddo passa nel permeato, il vapore acqueo si diffonde nel gas e viene fatto condensare all'esterno del dispositivo [45]. Rispetto al DCMD le perdite per conduzione sono più basse, inoltre, la resistenza al flusso di massa, generata dal gas, è meno rilevante rispetto al caso AGMD. Lo svantaggio di questa configurazione è che a causa della diffusione del vapore nel gas, il sistema necessita di un condensatore di dimensioni più ampie.

Il sistema SGMD non viene utilizzato per la desalinizzazione in quanto, il vapore acqueo che rimane intrappolato genera un aumento di entalpia e di temperatura di massa che complica il recupero dell'energia alla fine del processo, in quanto il gradiente di temperatura tra ingresso e uscita del sistema non è sufficientemente ampio da permettere un buon trasferimento del calore [46]. Questo inconveniente richiede un sistema di raffreddamento esterno che però rende il ciclo troppo complesso e costoso per una desalinizzazione dove il recupero di energia è di fondamentale importanza.

4. VMD (Vacuum Membrane Distillation): come per il SGMD anche in questo caso la fase di condensazione avviene all'esterno della membrana, ma anziché del gas viene si usa il vuoto. Questo sistema fornisce le migliori prestazioni in termini di flusso di massa grazie ad un miglioramento della differenza di pressione ottenuto meccanicamente [46]. Un sistema, ad esempio, che lavora ad alta temperatura (85 °C) raggiunge un flusso di 71 L/(m² h) [48], un secondo sistema [47], operante con flusso entrante a 40 °C e una pressione nel permeato pari a 300 Pa, genera un flusso di ben 146 L/(m²h); un terzo sistema [49], che utilizza un flusso turbolento in ingresso e il vuoto (0.5 atm) nel permeato genera 40 L/(m² h). Questo indica che una differenza di pressione applicata meccanicamente è vantaggiosa nei sistemi VMD, si possono mantenere basse le temperature di alimentazione pur ottenendo un flusso elevato [46].

La figura 1.13 mostra uno schema delle diverse configurazioni esposte sopra, il sistema SGMD non è rappresentato in quanto non viene utilizzato per la desalinizzazione.

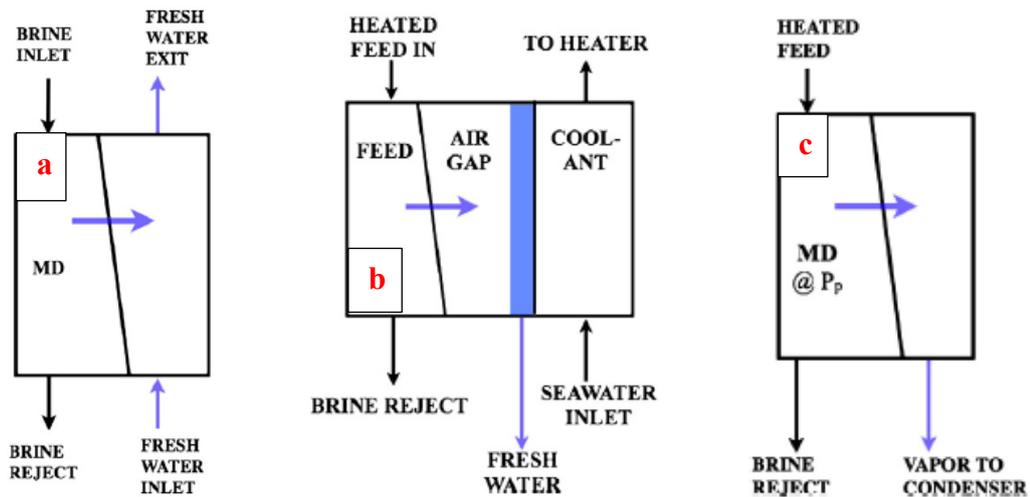


Figura 1. 13 - a) DCMD; b) AGMD; c) VMD. 'Immagine presa da [46]'

Il consumo energetico per i sistemi MD è molto più elevato rispetto a quello di altre tecniche viste, circa 100 kWh/m^3 , mentre l'energia elettrica richiesta è molto inferiore $1.5\text{-}3.65 \text{ kWh/m}^3$. La resa è molto alta e raggiunge intervalli compresi al $60\text{-}80\%$ [30]. Per quanto riguarda il costo dell'acqua distillata non si hanno ancora molte informazioni in letteratura, ma questa tecnica è considerata una tecnologia in grado di abbassare notevolmente il costo. Si stima un costo di circa $15 \text{ US\$/m}^3$ per impianti con produttività di 100 L/giorno e una membrana di 10 m^2 [30].

1.4.7 Confronto qualitativo

Nella seguente tabella (1.3) si è cercato di racchiudere quelli che possono essere considerati vantaggi o svantaggi dei vari metodi di dissalazione.

Ripercorrendo quanto scritto nelle sezioni precedenti possiamo dire che ogni tipologia impianto eccelle in qualche categoria rispetto alle altre, gli impianti ad osmosi inversa (RO) ad esempio, sono tra i più diffusi per la loro capacità di rimozione di ioni, proteine e prodotti chimici non facilmente separabili con altri metodi; gli impianti MSF e MED invece, possiedono un'elevata capacità produttiva e allo stesso tempo garantiscono un'elevata qualità del prodotto; infine i sistemi VC e ED, risultano i meno ingombranti.

Metodo	Vantaggi	Svantaggi
Multi-Stage Flash (MSF)	<ul style="list-style-type: none"> - Funzionamento semplice [50] - Alta capacità produttiva - Alta qualità del prodotto (10 ppm) - Flessibilità di salinità dell'acqua salata - Basso input energetico 	<ul style="list-style-type: none"> - Bassa resa 25-40 % - Pre-trattamento dell'acqua di alimentazione - Elevati costi di manutenzione e operativi [51] - Miglioramenti limitati
Multi-Effect Distillation (MED)	<ul style="list-style-type: none"> - Alta capacità produttiva - Alta qualità del prodotto (10 ppm) - Facile manutenzione - Elevata efficienza - Basso consumo energetico [50] - Flessibilità di salinità dell'acqua salata 	<ul style="list-style-type: none"> - Bassa resa 25-50 % [30] - Difficoltà nel controllo qualità prodotto - Elevato ingombro - Tempi di costruzione lunghi
Vapour Compression (VC)	<ul style="list-style-type: none"> - Alta qualità del prodotto (20 ppm) - Basso ingombro - Brevi tempi di costruzione - Resa elevata 85-97 % [28] 	<ul style="list-style-type: none"> - Alti costi operativi - Elevato consumo energetico - Nessun controllo del prodotto
Reverse Osmosis (RO)	<ul style="list-style-type: none"> - Acqua di alimentazione salata/salmastra - Flessibilità qualità/quantità produzione - Basso consumo energetico - Design semplice [52] - Bassa manutenzione - Funzionamento a temperatura ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> - Bassa resa 30-45 % - Alto impatto ambientale - Bassa qualità del prodotto 200-500 ppm - Alti costi di investimento e manutenzione - Elevate pressioni d'esercizio
Electrodialysis (ED)	<ul style="list-style-type: none"> - Bassi costi di investimento e operativi - Alta resa 80 % - Basso consumo energetico - Basso ingombro [53] [54] [55] - Flessibilità salinità acqua in ingresso 	<ul style="list-style-type: none"> - Pretrattamento del feed - Capacità di produzione bassa - Qualità del prodotto dipende dal feed - Trattamento acqua fino a 3000 pmmTDS
Membrane Distillation (MD)	<ul style="list-style-type: none"> - Bassi costi operativi e di manutenzione - Elevata robustezza - Nessun problema di corrosione [56] - Basso consumo elettrico [41] - Basse Temperature e Pressioni di funzionamento - Alta resa 60-80% [30] 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevata energia termica richiesta - Processo costoso [56] - Design non ottimizzato [56]

Tabella 1. 3 - Confronto qualitativo tra le tecnologie di dissalazione attiva attuali [29] [28]

1.5 Sistemi Passivi

I sistemi di dissalazione sono necessari per soddisfare le sempre più ingenti richieste di acqua dolce, tuttavia, seppur le tecniche sono varie e diffuse, bisogna tenere in considerazione che alcuni costi risultano tutt'ora insostenibili per alcuni paesi in via di sviluppo. I sistemi di desalinizzazione passiva nascono con lo scopo di sviluppare una tecnologia che utilizzi fonti rinnovabili e capace di operare autonomamente, ovvero senza

la necessità di organi meccanici o elettrici che ne consentano il funzionamento. Le fonti di energia rinnovabili comunemente utilizzate per la desalinizzazione sono il solare, l'eolico, il geotermico e la combinazione solare/eolico. Nei paragrafi successivi saranno discussi alcuni esempi di dissalatori passivi alimentati da energia solare.

1.5.1 Dissalatore ad energia solare (Solar Still)

La dissalazione solare viene utilizzato per purificare l'acqua da agenti inquinanti compresi sali, metalli e microbi. In molti aspetti simula il ciclo naturale dell'acqua alternando le fasi di evaporazione e condensazione, è costituito da pochi componenti e richiede costi operativi e di manutenzione bassi [57]. La configurazione più semplice del dissalatore solare consiste in un contenitore isolato termicamente sul fondo, contenente acqua di mare e una copertura in vetro inclinata (fig. 1.14a).

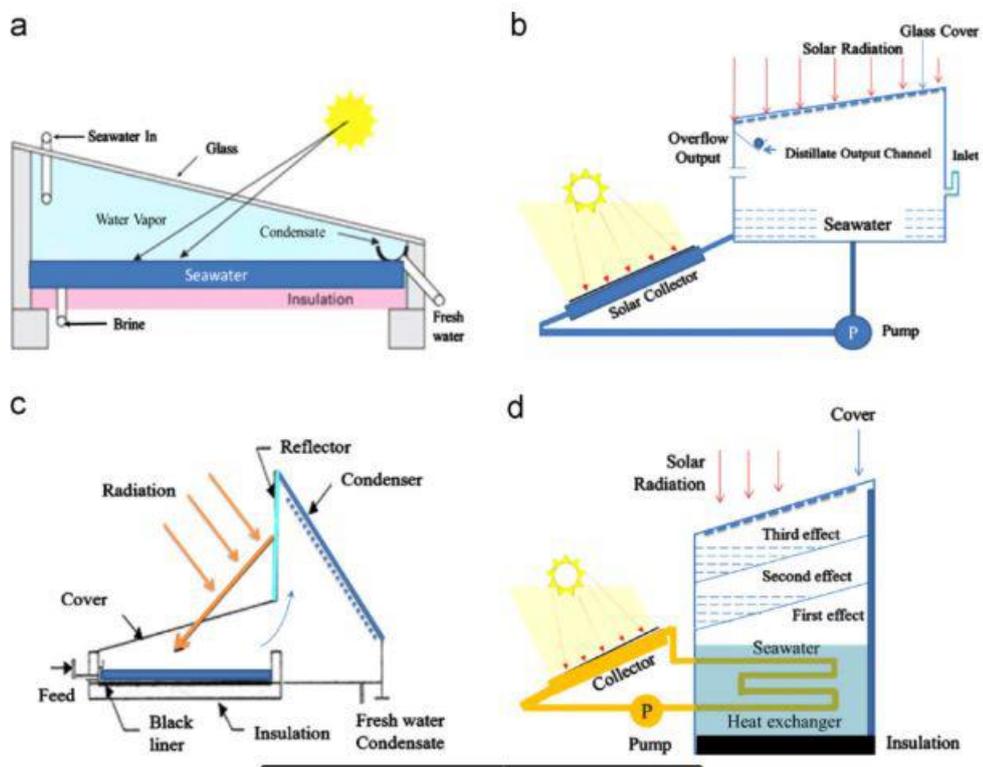


Figura 1. 14 - a) Stadio singolo; b) Accoppiamento con collettore; c) Accoppiamento con condensatore; d) Dispositivo Multistadio. 'Immagine presa da [41]'

Le radiazioni colpiscono il vetro e scaldano l'acqua sottostante facendola evaporare, il vapore, a contatto col vetro, si condensa e scorre lungo il piano inclinato raccogliendosi in un contenitore posto a valle del sistema. Nel corso degli anni sono state sviluppate diverse configurazioni che ne hanno migliorato le prestazioni, alcuni esempi sono mostrati in figura 1.14(b-c-d). Tuttavia, nonostante questa tecnologia garantisca un'elevata qualità del distillato, a costi relativamente bassi, e soprattutto a zero impatto ambientale, non viene impiegata a livello industriale a causa della sua bassa capacità produttiva [58]. La produttività infatti, dipende dall'area di lavoro del dispositivo, che di solito è abbastanza ridotta, e dalle zone climatiche in cui viene utilizzato. Non a caso le maggiori applicazioni di questa tecnica si hanno in regioni aride, ricche di sole e con un quantitativo d'acqua limitato.

1.5.2 Generatore di vapore solare low cost

La generazione di vapore per energia solare è un modo intelligente per dissalare l'acqua poiché utilizza solo fonti di energia rinnovabili evitando inquinamenti. Tuttavia, questa tecnica non è ancora adatta alla produzione di grandi quantità nonostante i molti studi effettuati per aumentarne produttività ed efficienza. Uno dei motivi principali che ne limita l'efficienza è il contatto diretto tra l'assorbitore solare e l'acqua, questa particolarità costruttiva rende inevitabili le dissipazioni termiche e quindi il decadimento prestazionale. L'energia termica trasferita dall'assorbitore solare alla massa d'acqua non viene interamente sfruttata per l'evaporazione e, la dissipazione aumenta al crescere della quantità d'acqua trattata, questo comportamento limita la scalabilità del sistema. Una soluzione a questo fenomeno è stata fornita da Li et al., e presentata nella figura 1.15B [59].

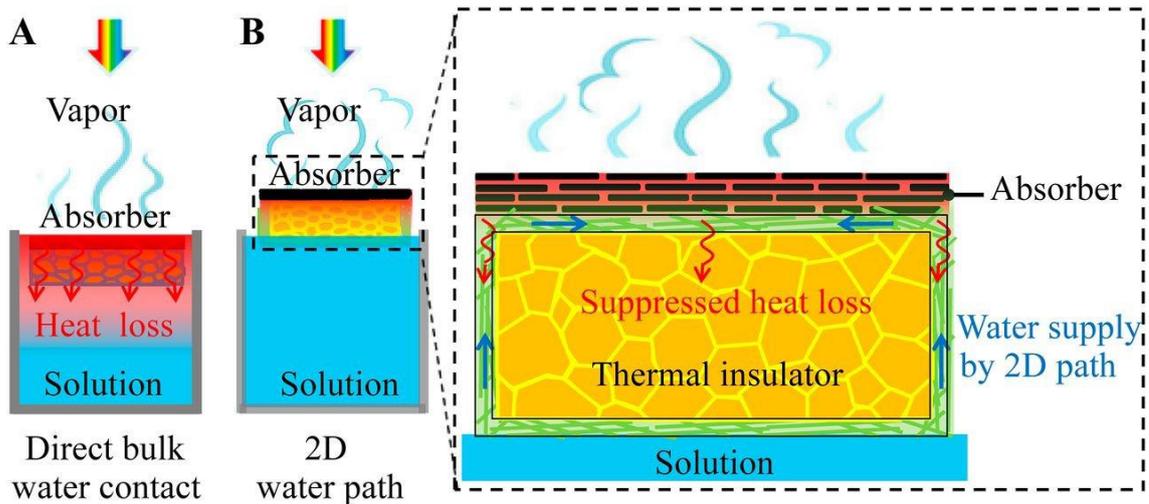


Figura 1. 15 - A) Evaporazione tradizionale per contatto diretto; B) Soluzione 2D di Li et al. 'Immagine presa da [59]'

L'obiettivo di questo dispositivo è quello di creare un percorso d'acqua 2D per sopprimere la perdita di calore e fornire un modo efficiente per produrre acqua. Un isolante termico galleggiante di polistirolo è posizionato sull'acqua e avvolto in un foglio idrofilo in cellulosa. L'acqua quindi, scorre in questo foglio per capillarità e una volta raggiunta la superficie superiore si diffonde sullo strato 2D [59]. Una volta in cima, l'acqua sfrutta interamente l'energia solare raccolta dall'assorbitore per l'evaporazione. L'assorbitore ha una conduttività termica bassa ed è costituito da uno strato di ossido di grafene con una struttura porosa, ideale per consentire il passaggio del vapore acqueo e non della soluzione liquida. La struttura completa del dispositivo è mostrata in figura 1.16.

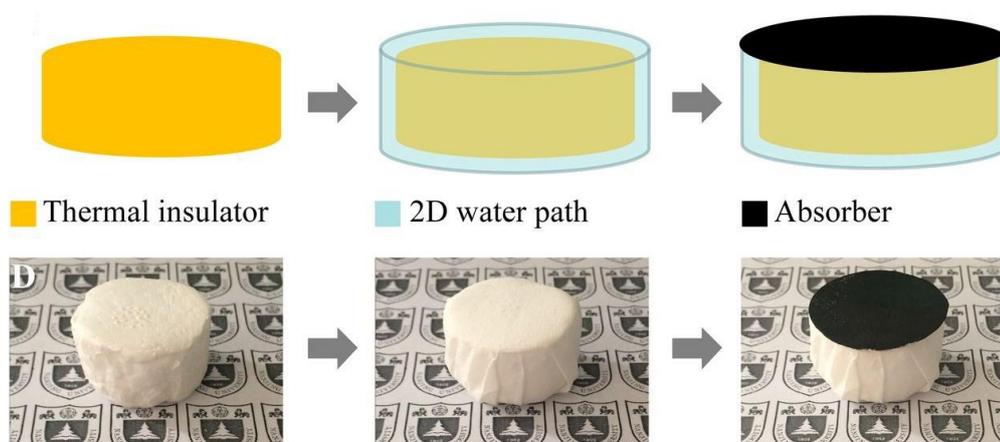


Figura 1. 16 - Generatore di vapore. 'Immagine presa da [59]'

Questa configurazione mostra un livello di produttività superiore a quella di molte altre tecniche passive, sotto irraggiamento di 1000 W/m^2 raggiunge una produttività di $1.45 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ h})$ [59]. Inoltre, anche l'efficienza energetica è aumentata e risulta essere dell'80%, ma soprattutto non è più vincolata dalla quantità di acqua trattata, questo espediente rende il dispositivo utilizzabile anche in aree remote prive di infrastrutture idriche [59].

1.5.3 Distillazione per irraggiamento diretto + MD

La tecnologia MD è già stata presentata nella sezione dei sistemi attivi, come già visto, la distillazione con membrana ha la capacità di funzionare a basse temperature e pressioni ma a causa dell'elevato quantitativo di energia richiesto, non si è ancora diffuso a livello industriale.

In questa configurazione la luce solare viene sfruttata come fonte di alimentazione esterna per l'evaporazione dell'acqua di mare, il vapore acqueo attraversa quindi la membrana porosa grazie alla differenza di pressione tra le due superfici. Nella tecnologia MD è fondamentale massimizzare il flusso di vapore acqueo che attraversa la membrana, a questo scopo è necessario incrementare il gradiente di pressione del vapore (in funzione del gradiente di temperatura) tra i due piani. Massimizzare il flusso di vapore vuol dire aumentare la produttività di acqua dolce, è importante quindi scaldare ulteriormente l'acqua di alimentazione accoppiando il sistema con altri processi industriali o, combinandoli con assorbitori solari [42] [43].

Una valida alternativa è stata proposta di Dongare et al., ovvero, scaldare localmente la membrana di alimentazione al fine di ridurre il trasferimento di calore indesiderato che può indurre fenomeni come la *polarizzazione della temperatura*, che innalza la temperatura di massa all'ingresso e al distillato [60]. A questo scopo si utilizza una variante del sistema MD tradizionale ovvero una *distillazione solare con membrana nanofotonica* (NESMD). Le nanoparticelle sono incorporate nella superficie calda della membrana per migliorare l'assorbimento solare. L'acqua evapora sulla superficie calda, attraversa la membrana priva di sali e condensa sul lato freddo, con questa configurazione il flusso di vapore è notevolmente più alto. La figura 1.17 mostra un confronto tra la configurazione MD tradizionale e la NESMD [61].

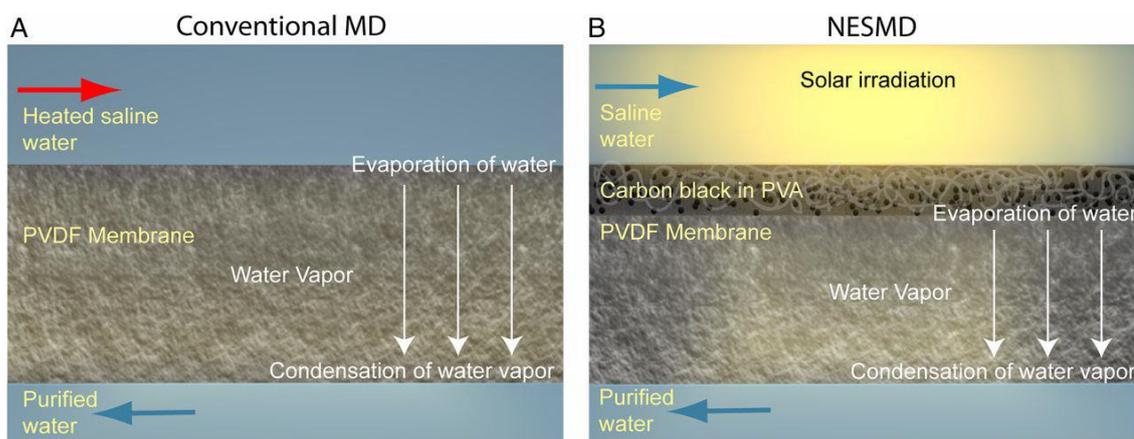


Figura 1. 17 - Confronto tra configurazione MD vs NESMD. 'Immagine presa da [61]'

Lo strato di adsorbimento è realizzato con nanoparticelle di carbone nerofumo (carbon black - CB). È necessario rispettare una specifica concentrazione di CB nell'alcool polivinilico (PVA) per ottimizzare la capacità di assorbimento della luce solare [61]. Rispetto alla configurazione tradizionale, quella NESMD, oltre ad un flusso di vapore più elevato presenta anche una migliore efficienza solare ed un rifiuto di sale del 99.5%, queste caratteristiche la rendono una tecnica molto interessante anche per studi in larga scala [61]. Questa tecnologia mostra prestazioni di buon livello, con un irraggiamento solare di 700 W/m^2 si raggiunge una produttività di $0.5 \text{ L/m}^2 \text{ h}$ [61].

1.5.4 FSS (Flat Solar Still)

Come visto nei paragrafi precedenti, la configurazione classica del dissalatore solare passivo prevede una superficie trasparente inclinata (ISS – Inclined Solar Still) di un certo angolo per catturare la radiazione solare, tuttavia esistono anche configurazioni più compatte che prevedono una disposizione orizzontale della superficie assorbente, comunemente dette FSS (Flat Solar Still) [62], progettate con una copertura in vetro ultra-idrofilo. Dalla letteratura, i risultati indicano che l'efficienza energetica dell'FSS raggiunge oltre il 60% nei mesi autunnali, contro un 36% dell'ISS nello stesso periodo [62]. La figura 1.18(a-b) mostra le principali differenze costruttive tra le due configurazioni.

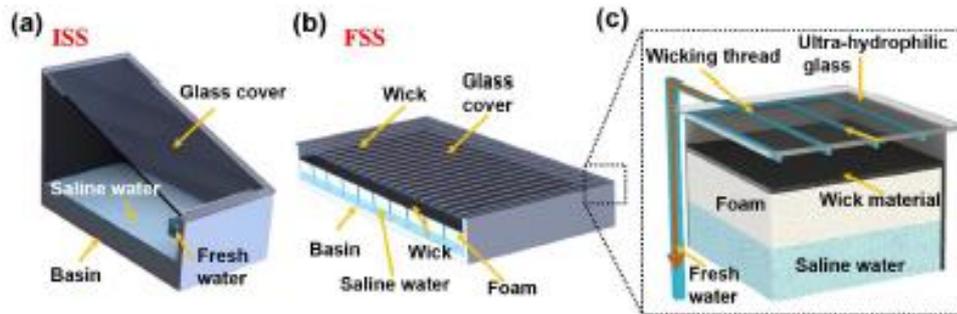


Figura 1. 18 - a) ISS; b) FSS; c) Dettaglio costruttivo dell'FSS. 'Immagine presa da [62]'

Il principio di funzionamento del sistema ISS è stato ampiamente discusso nel paragrafo precedente, la configurazione FSS evita la struttura inclinata quindi, l'acqua condensata sulla copertura di vetro si raccoglie per capillarità per mezzo di uno stoppino. Il sistema dunque, è caratterizzato da pareti della stessa altezza, ciò determina una sezione di dispersione termica ridotta rispetto alla configurazione ISS e un maggior recupero del calore latente, migliorando difatti la produttività del dispositivo. Quest'ultima può addirittura aumentare estendendo il concetto ad una configurazione multistadio. La figura 1.18c mostra in dettaglio la composizione del dispositivo FSS [62]. Il bacino è realizzato in schiuma e lamiera di ferro zincato per impedire la dispersione del calore dell'acqua salata su cui galleggia. L'acqua salata viene trasportata verso l'alto per azione capillare dal bacino attraverso le strisce di materiale stoppino e quindi riscaldata dall'energia solare. La schiuma galleggiante consente la localizzazione del calore e l'evaporazione dell'acqua salata. Nel frattempo, le nanoparticelle di carbone nerofumo si disperdono sulla superficie dello stoppino per migliorare l'assorbimento solare e l'evaporazione dell'acqua [62]. Il bacino superiore è sigillato da una copertura in vetro e diversi fili di cotone che raccolgono l'acqua di condensa che vi si accumula, successivamente l'acqua assorbita dai fili verrà trasportata per capillarità verso l'esterno [62].

Le produttività massime delle due configurazioni sono rispettivamente $0.42 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ h})$ per ISS, e $0.55 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ h})$ per la configurazione FSS [62].

1.6 Considerazioni sugli attuali sistemi con solare

I sistemi di dissalazione con solare più diffusi sono quelli indiretti, ovvero quelli in cui i sistemi di captazione dell'energia solare sono accoppiati ai sistemi tradizionali. In questo paragrafo si cercherà di confrontare le principali tecnologie secondo vari aspetti.

Il sistema solar still è la configurazione più economica ma, come visto, necessita di grandi sezioni di lavoro, limite che la rende adatta alla produzione in piccola scala. La figura 1.19 mostra una panoramica tra i vari processi di dissalazione diretta con il solare più diffusi attualmente.

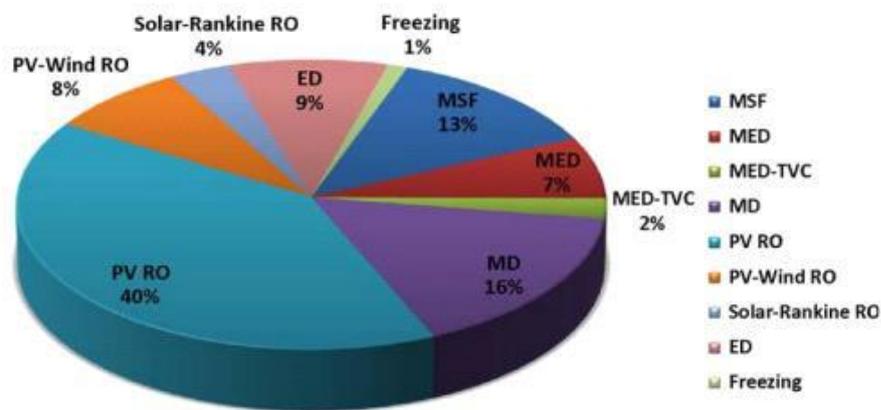


Figura 1. 19 - Diffusione dei sistemi indiretti con il solare. 'Immagine presa da [63]'

I sistemi RO sono i più diffusi (52%) e si accoppiano molto bene con i pannelli fotovoltaici, a seguire gli impianti a membrana MD (16%) ed MSF (13%). La tabella 1.4 mostra alcuni dati caratteristici.

Il GOR (Gained Output Ratio) è il rapporto tra la portata d'acqua distillata e la portata di vapore in ingresso richiesta.

	Produttività [$m^3/$ <i>giorno</i>]	Energia Termica [kWh/m^3]	Energia Elettrica [kWh/m^3]	GOR
Solar Still	<100	/	/	0.5
Solar MD	0.15-10	150-200	/	0.5-8.1
Solar MED	>5000	60-70	1.5-2	9.3-12
PV-RO	<100	20-45	0.5-4 acqua di mare 4-6 acqua salmastra	/

Tabella 1. 4 - Caratteristiche tecniche (valori medi)

1.7 Confronto tra le prestazioni energetiche

In questo paragrafo sarà fatto un confronto tra le prestazioni dei principali sistemi di desalinizzazione solare passiva o attiva che si trovano in letteratura. Tra le tecnologie passive si trovano: dissalatori multistadio (risultati ottenuti da prove sperimentali effettuati in laboratorio su: prototipi a 3 e 10 stadi con membrane PTFE con pori da 0.1 μm ; stime di valori ottenuti su di un prototipo a 15 stadi con membrana PTFE e pori da 0.1 μm); materiali altamente all'avanguardia per la generazione di vapore solare; processi di distillazione a membrana (MD) alimentati da irradiazione diretta; materiali a basso costo per la generazione di vapore solare; alambicchi solari [64].

Tra le tecnologie attive: alambicchi solari combinati con componenti attivi (ad es. pompe); processi di distillazione a membrana (MD) alimentati da collettori solari termici; processi di osmosi inversa (RO) alimentati da pannelli fotovoltaici (PV) [64].

I confronti tra queste tecnologie sono riportati nella tabella 1.5, le grandezze presenti sono: q_{solar} irradianza media durante la procedura di test; S superficie netta esposta alla radiazione solare; J portata massica di acqua distillata prodotta per metro quadrato di superficie esposta alla radiazione solare; e_s energia solare necessaria per produrre un metro cubo di acqua distillata; $1/e_s$ litri di acqua distillata prodotta da 1 kWh di energia solare in ingresso [64].

Category	q_{solar} [W/m ²]	S [m ²]	J [L/m ² h]	e_s [kWh/m ³]	1/ e_s [L/kWh]	Type
3 stages, PTFE 0.1 μm	900	1.24E-02	1.442	624	1.602	Passive
10 stages, PTFE 0.1 μm	900	1.24E-02	2.947	305	3.274	Passive
15 stages, PTFE 0.1 μm	900	1.24E-02	3.920	230	4.356	Passive
Advanced solar steam	1000	1.96E-03	1.076	929	1.076	Passive
Advanced solar steam	2000	1.96E-03	1.850	1081	0.925	Passive
Advanced solar steam	3000	1.96E-03	2.960	1014	0.987	Passive
Advanced solar steam	5000	1.96E-03	5.280	947	1.056	Passive
Advanced solar steam	6600	1.96E-03	7.670	860	1.162	Passive
Advanced solar steam	8500	1.96E-03	9.950	854	1.171	Passive
Advanced solar steam	9000	1.96E-03	10.790	834	1.199	Passive
Advanced solar steam	10000	1.96E-03	12.000	833	1.200	Passive
Advanced solar steam	1000	3.14E-04	0.708	1412	0.708	Passive
Advanced solar steam	2000	3.14E-04	0.600	1667	0.600	Passive
Advanced solar steam	4000	3.14E-04	0.593	1688	0.593	Passive
Advanced solar steam	6000	3.14E-04	0.625	1600	0.625	Passive
Advanced solar steam	10000	3.14E-04	0.667	1499	0.667	Passive
Advanced solar steam	1000	6.16E-04	0.950	1053	0.950	Passive
Advanced solar steam	2000	6.16E-04	1.110	901	1.110	Passive
Advanced solar steam	3000	6.16E-04	1.223	817	1.223	Passive
Advanced solar steam	4000	6.16E-04	1.410	709	1.410	Passive
Advanced solar steam	6000	6.16E-04	1.435	697	1.435	Passive
Low-cost solar steam	1000	8.61E-04	1.100	909	1.100	Passive
Low-cost solar steam	10000	1.00E-04	11.800	847	1.180	Passive
Low-cost solar steam	1000	5.31E-04	1.450	690	1.450	Passive
Low-cost solar steam	1000	1.60E-03	1.280	781	1.280	Passive
Low-cost solar steam	3000	1.60E-03	3.660	820	1.220	Passive
Low-cost solar steam	5000	1.60E-03	6.240	801	1.248	Passive
Low-cost solar steam	7000	1.60E-03	9.340	749	1.334	Passive
Low-cost solar steam	10000	1.60E-03	13.300	752	1.330	Passive
Low-cost solar steam	12000	1.00E-04	14.020	856	1.168	Passive
Low-cost solar steam	1000	7.85E-03	0.518	1931	0.518	Passive
Direct irradiation + MD	700	2.80E-03	0.300	2333	0.429	Passive
Direct irradiation + MD	700	2.80E-03	0.100	7000	0.143	Passive
Direct irradiation + MD	700	1	0.500	1400	0.714	Passive
Direct irradiation + MD	700	1	0.200	3500	0.286	Passive
Solar still	441	3.76E-01	0.412	1070	0.935	Passive
Solar still	622	4.90E-02	0.392	1585	0.631	Passive
Solar still	850	6.40E-01	0.700	1214	0.824	Passive
Solar still	700	6.40E-01	0.936	748	1.337	Passive
Solar still - combined	600	5.00E-01	1.530	392	2.550	Active
Solar still - combined	650	3.14E+00	0.344	1889	0.530	Active

Solar still – combined	520	9.60E-02	2.083	250	4.006	Active
Solar still - combined	500	1.00E+00	0.625	800	1.250	Active
Solar collectors + MD	500	2.00E+04	NA	3869	0.258	Active
Solar collectors + MD	500	1.90E+04	NA	3648	0.274	Active
Solar collectors + MD	500	4.00E+03	NA	750	1.334	Active
Solar collectors + MD	550	1.80E+01	0.711	773	1.293	Active
Solar collectors + MD	588	2.00E+01	7.840	75	13.333	Active
Solar collectors + MD	588	2.00E+01	2.940	200	5.000	Active
Solar collectors + MD	1000	7.00E+00	2.143	467	2.143	Active
Solar collectors + MD	950	5.73E+00	4.363	218	4.593	Active
Solar collectors + MD	600	2.16E+00	0.460	1304	0.767	Active
PV + RO	330	NA	NA	22	45.000	Active
PV + RO	500	NA	NA	43	23.286	Active

Tabella 1. 5 - Prestazioni delle tecnologie di desalinizzazione solare. 'Tabella estratta da [64]'

Gli esperimenti effettuati su dispositivi passivi multistadio (3 e 10) con membrana PTFE da 0.1 μm mostrano che a parità di superficie irradiata la portata massica J è raddoppiata nei sistemi con 10 stadi e l'energia solare richiesta (e_s) per produrre 1000 litri di acqua distillata è addirittura la metà. Tra i generatori di vapore avanzati a parità di superficie irradiata si nota che maggiore è il valore della radiazione diretta maggiore sarà la resa in termine di portata massica J , con un valore di e_s praticamente costante per q_{solar} compresi tra 6600-10000 W/m^2 . Tra i generatori di vapore a basso costo invece, rapporti q_{solar}/J si mantengono abbastanza alti con valori di $1/e_s$ più o meno costanti a parità di superficie irradiata. Le tecnologie basate sul funzionamento con organi meccanici possiedono superfici di lavoro molto ampie e valori di resa importanti anche con radiazioni solari di piccole entità (circa 600 W/m^2), di questa famiglia fanno parte i sistemi MD con collettori solari e gli alambicchi solari combinati.

La dicitura "NA" indica che il relativo dato non è disponibile.

2. Modello Teorico

2.1 Introduzione

In questa sezione si discuterà il modello teorico a supporto del principio di funzionamento, sebbene il dispositivo possa sembrare relativamente semplice, la fisica che lo governa non è elementare. È quindi importante comprendere bene le leggi che consentono al dispositivo di operare, al fine di ottenere una panoramica completa di quali possono essere i suoi limiti e dove potrebbe essere effettivamente migliorato. Una volta definite le formule fisiche e il design del dispositivo si effettuerà una simulazione numerica con COMSOL Multiphysics® al fine di constatare se le modifiche effettuate durante la fase di sviluppo comportino effettivi miglioramenti.

2.2 Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento del dissalatore in questione è analogo a quello della versione precedente [64], la figura 2.1 mostra uno schema del dispositivo.

Si può notare che il prototipo in questione è costituito da tre stadi, il sistema di alimentazione è composto da *membrane idrofile* che sporgono dall'evaporatore di ogni stadio e prelevano acqua salata da un apposito bacino [64]. L'acqua risale ed entra nel circuito sfruttando le forze capillari della membrana idrofila, dopo continua il suo percorso aiutata dalla pendenza della struttura e dalla gravità. L'idea base è quella di ridurre al minimo la distanza caratteristica tra i due strati idrofili al fine di consentire un ciclo di evaporazione-condensazione multiplo completo ed efficiente.

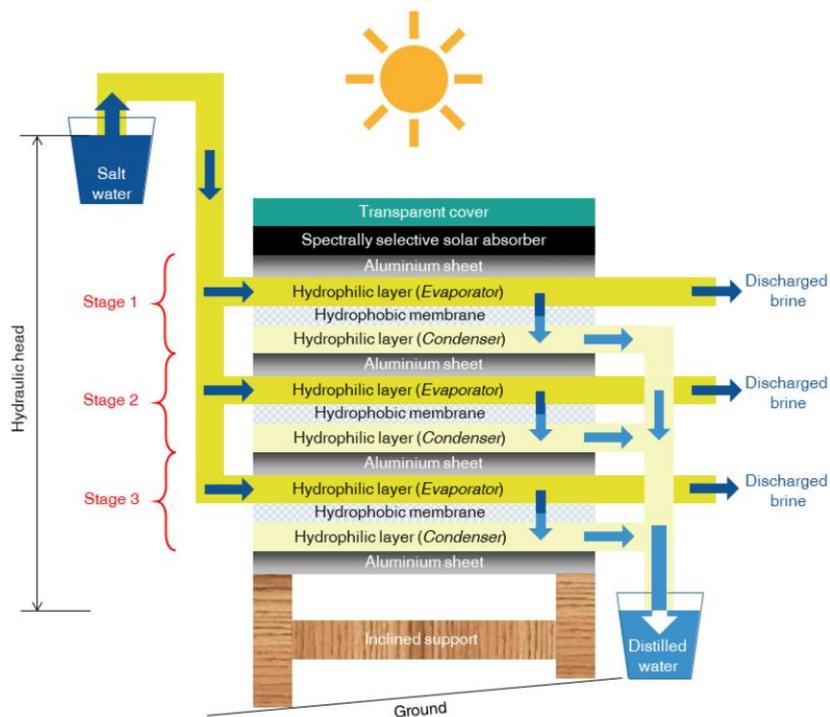


Figura 2. 1 – Schema stratigrafia globale del dispositivo. ‘Immagine presa da [65]’

Le membrane idrofile sono incollate con silicone e nastro biadesivo a delle piastre sottili di alluminio di sezione $56 \times 38 \text{ cm}$ e spessore 1 mm , le caratteristiche della lastra di alluminio ci permette di considerare una conduzione monodimensionale attraverso la sua sezione. Nel primo stadio, la faccia superiore della lastra è coperta da un assorbitore solare realizzato in TiNOX®, un materiale adatto all’assorbimento delle radiazioni solari grazie alle sue caratteristiche di elevata assorbanza (0.95), bassa emissività (0.04 così da limitare le perdite termiche) e costo relativamente basso ($5 \text{ \$/m}^2$). Un pannello in PMMA (Polimetilmetacrilato) è posto sopra l’assorbitore in modo da ridurre il trasferimento di calore convettivo, il materiale scelto garantisce un’elevata trasparenza alla luce solare (0.93), ha una buona resistenza meccanica capace di riparare il TiNOX® da eventuali urti, ed è economico ($1,80 \text{ \$/m}^2$). Con questa configurazione la piastra di alluminio si scalda per irraggiamento e trasferisce il calore all’acqua salata permettendole di evaporare. Il flusso di vapore attraverso la *membrana idrofobica* è guidato dalla differenza della tensione di vapore, che a sua volta dipende dalla differenza di temperatura e dalla *salinità* dell’acqua o *attività*). La figura 2.2 mostra il funzionamento appena

descritto.

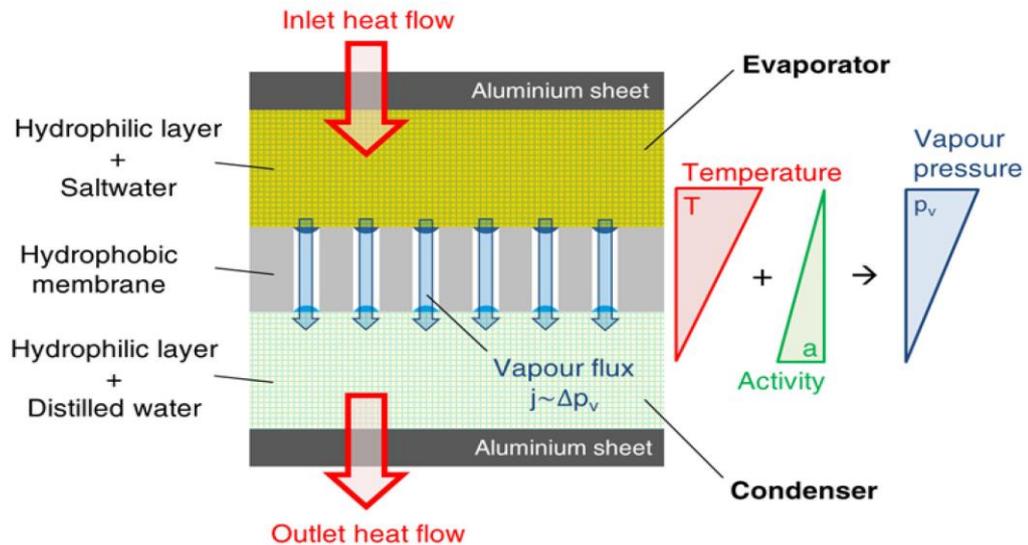


Figura 2. 2 - Principio di funzionamento del singolo stadio. ‘Immagine presa da [64]’

L'idrofobicità della membrana è data sia dalla struttura geometrica che dalla composizione chimica della superficie, il vapore si condensa nel lato della superficie a temperatura inferiore e si raccoglie nella membrana idrofila del condensatore sottoforma di acqua distillata [64]. Quest'ultima viene raccolta in un contenitore posto esternamente al sistema attraverso un prolungamento della membrana idrofila dell'evaporatore e per azione della gravità. Durante questo processo il calore latente di condensa viene riutilizzato come fonte di calore in ingresso dallo stadio successivo, permettendo di superare i limiti termodinamici a cui era soggetto il “dispositivo modello”. Nella configurazione in analisi sono stati implementati solamente tre stadi, principalmente per motivi di ingombro e di costi. Nell'ultimo stadio il condensatore è lasciato a contatto con l'aria aperta per permettere una migliore dissipazione del calore verso l'esterno e quindi di aumentare il gradiente termico (di conseguenza anche il flusso di vapore). Data l'altezza del nuovo dispositivo, la capillarità da sola non è sufficiente a consentire il flusso dell'acqua all'interno del sistema, tramite la formula di Young-Laplace si è calcolata l'altezza massima di risalita (pari a 6 cm), quindi, per immettere

l'acqua di alimentazione nel sistema si è posizionato il bacino di prelievo ad una certa altezza, fig. 2.1, garantendo così un adeguato carico idraulico. Per facilitare il deflusso dell'acqua nelle membrane si è deciso di sfruttare la gravità imponendo una pendenza di 17° al sistema. Quest'ultima è stata calcolata tenendo in considerazione le dimensioni del sistema e tenendo sotto controllo la velocità di percorrenza dell'acqua nelle membrane, al fine di garantire il ciclo evaporazione-condensazione.

2.2.1 Rimozione del sale

Durante il processo di distillazione l'acqua che evapora dagli strati idrofili si separa dal sale che rimane depositato sulla membrana stessa aumentandone dunque la concentrazione salina. Questo fenomeno influisce sulla produttività complessiva del dispositivo che di volta in volta dovrà distillare acqua con salinità sempre maggiore [64], possiamo definire una grandezza, chiamata *attività* dell'acqua che indica il rapporto tra la tensione di vapore dell'acqua in un certo materiale e la tensione di vapore dell'acqua pura ed è inversamente proporzionale alla concentrazione salina. Dunque, si può affermare che la produttività globale è inversamente proporzionale alla salinità, nello specifico diminuisce quando quest'ultima aumenta, come indicato dalla legge di Raoult (2.1), che descrive come la salinità e la temperatura delle soluzioni influenzano la tensione di vapore:

$$\Delta p_v = a(Y_E)p_v(T_E) - a(Y_C)p_v(T_C) \quad (2.1)$$

Δp_v è la differenza tra le tensioni di vapore dell'acqua tra le due facciate della membrana idrofobica, dipendenti dalle temperature T_E e T_C ; a è l'attività dell'acqua, che dipende dalle frazioni di massa salina Y_E e Y_C . I pedici E e C indicano rispettivamente le grandezze calcolate in evaporatore e condensatore.

Al fine di garantire prestazioni efficienti e durature bisogna fare in modo di rigenerare le membrane idrofile degli evaporatori semplicemente sciacquandole con acqua salata (con salinità di 35 g/l) alla fine di ogni giornata di lavoro.

2.3 Modello Analitico

La forza motrice di ogni stadio del distillatore risiede nel gradiente di pressione del vapore esistente tra ciascun evaporatore e condensatore. Questo dipende dal gradiente di attività dell'acqua (inversamente proporzionale alla salinità) e alle tensioni di vapore (direttamente proporzionali alle temperature) ai due lati della membrana idrofobica. Precedentemente tramite l'equazione 2.1 si è visto come queste grandezze fossero correlate, adesso risulta interessante analizzare il loro significato fisico [64]. Innanzitutto, l'attività dell'acqua può essere espressa mediante una formula più accurata, ipotizzando condizioni ideali avremo:

$$a = \frac{M_{NaCl}(1-Y)}{M_{NaCl}(1-Y) + N_{ion}M_{H_2O}} \quad (2.2)$$

Dove, M_{NaCl} e M_{H_2O} sono rispettivamente le masse molari di cloruro di sodio e acqua. Nello specifico valgono $M_{NaCl} = 58.44 \text{ g/mol}$ e $M_{H_2O} = 18.015 \text{ g/mol}$. Inoltre, il numero di ioni in una molecola di cloruro di sodio è $N_{ion} = 2$. È quindi possibile calcolare l'esatto valore dell'attività dell'acqua sia sul condensatore che sull'evaporatore, usando i rispettivi valori di salinità dell'acqua Y (dove $Y = m_{salt}/m_{solution}$) [64]. Per l'acqua marina la salinità vale $Y = 0.035$, mentre l'attività dell'acqua nel lato evaporatore $a_e = 0.978$. Per quanto riguarda il lato condensatore invece, la salinità è supposta essere nulla, in quanto esso contiene solo acqua distillata, quindi l'attività dell'acqua è $a_c = 1$ [64]. Come detto sopra, un altro parametro che influenza il gradiente di pressione del vapore ai due lati della membrana idrofoba è la tensione di vapore. Questo valore può essere stimato attraverso diverse equazioni correlate alla temperatura, nel nostro caso di studio verrà utilizzata la correlazione semi-empirica di Antoine, mostrata di seguito [64]:

$$\log[p_v] = A - \frac{B}{C+T-273.15} \quad (2.3)$$

Dove p_v è la tensione di vapore espressa in mmHg, mentre A, B e C sono costanti relative al materiale, infine, T è la temperatura espressa in kelvin. L'equazione 2.3 è valida per un intervallo di temperatura limitato, corrispondente ad un range di pressione tra 0.01-2 bar.

Al di fuori di questo intervallo, l'equazione di Antoine perde il suo significato fisico, tuttavia, risulta alquanto adatto in questa applicazione. In questo caso, mentre il valore della temperatura varia durante le ore di lavoro, le costanti del materiale valgono rispettivamente: $A = 8.07$; $B = 1730.63$; $C = 233.42$ [66] [64].

Ripercorrendo i passaggi compiuti dal prof. Chiavazzo et al. [64] nella prima versione del dissalatore, verrà adesso fornita una soluzione analitica della portata massica di acqua prodotta (J). A questo scopo si è combinato il “*modello di Maxwell-Stefan*” e il “*modello dusty-gas*”. Mentre il primo tiene conto sia del potenziale chimico che dei fenomeni di diffusione molecolare, il secondo considera l'interazione tra le molecole di gas con le pareti e il flusso viscoso (solitamente presente nelle tecnologie di distillazione a membrana) generato dal gradiente di pressione totale che attraversa la membrana. Successivamente, al fine di semplificare il modello sono state applicate le seguenti ipotesi [64]:

- Approssimazione della miscela di vapore acqueo composto da idrogeno e azoto ad una miscela binaria di vapore acqueo e aria;
- Idealmente le particelle d'aria sono bloccate nei pori del mezzo, poiché l'aria è poco solubile in acqua. Il flusso molare dell'aria è quindi nullo;
- Il flusso viscoso è considerato nullo in quanto la pressione totale non varia tra i due lati opposti della membrana. L'intero sistema lavora alla pressione ambiente;
- Si considerano gas ideali, è quindi possibile calcolare il potenziale chimico di vapore acqueo come $\mu_w = \mu_{w,puro} + RT \ln[x_w]$; dove μ_w è il potenziale chimico del vapore acqueo, $\mu_{w,puro}$ il potenziale chimico del vapore acqueo puro, R la costante universale dei gas ideali ($8.314 J/mol$), T la temperatura espressa in gradi Kelvin, x_w la frazione molare dell'acqua;
- Quando si utilizza una membrana con una dimensione dei pori di $0.1 \mu m$, si può considerare il regime puro di Knudsen, questo si verifica quando il percorso libero principale delle molecole è comparabile o superiore con la scala del sistema (le pareti porose). Membrane con pori più grandi (ad esempio $3 \mu m$) si approssimano

invece, con una serie di Knudsen e resistori molecolari. Questo concetto sarà trattato meglio quando il coefficiente di diffusione globale sarà calcolato come contributo di Knudsen e della diffusione molecolare;

- Calcolando il rapporto tra la pressione parziale del vapore acqueo e la pressione totale (pressione atmosferica), è possibile ricavare la frazione molare dell'acqua, risulterà un valore molto inferiore all'unità, $x_w \ll 1$. Ciò è dovuto al fatto che la condensa si deposita a valle del foro e non all'interno della membrana, dove invece è presente anche aria.

Tramite queste considerazioni, è stato possibile approssimare la portata massica specifica dell'acqua dolce con una serie di Taylor del primo ordine [64]:

$$J = K \Delta p_v \quad (2.4)$$

Dove Δp_v si ottiene dall'equazione 2.1, mentre K è il coefficiente di permeabilità del gap tra i due strati idrofili, che può essere approssimato come la somma del contributo delle permeabilità delle membrane. Nel dettaglio, questa grandezza prevede la combinazione di tre contributi fondamentali (Eq. 2.5), il primo tiene conto dell'interazione tra i vapori, il secondo esprime un contributo dato dall'interazione tra vapore e parete dei pori (meno efficace aumentando la dimensione dei pori), l'ultimo termine si riferisce all'interazione tra vapore e aria nel gap [64], vale a dire:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\frac{\epsilon_m P D_{wa} M_{H_2O}}{p_a \tau R T d_m}} + \frac{1}{\frac{2 \epsilon_m r M_{H_2O}}{3 R T d_m \tau} \sqrt{\frac{8 R T}{\pi M_{H_2O}}}} + \frac{1}{\frac{P D_{wa} M_{H_2O}}{p_a R T d_{air}}} \quad (2.5)$$

Dove:

- ϵ_m è la porosità della membrana;
- P è la pressione totale;
- D_{wa} coefficiente di diffusione del vapore acqueo nell'aria;
- p_a media aritmetica della pressione parziale dell'aria;
- τ tortuosità (tendenza dei pori ad inclinarsi);
- d_m spessore della membrana;

- d_{air} spessore del gap di aria;
- r raggio medio del poro della membrana;

nello specifico il prodotto PD_{wa} è già stato calcolato empiricamente [64], e risulta ancora valido per questa applicazione, ovvero $PD_{wa} = 1.19 \cdot 10^{-4} T^{1,75}$ [67]. Per stimare la correlazione tra la tortuosità e la porosità della membrana si può utilizzare la relazione di Mackie-Mearns:

$$\tau = \frac{(2-\varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m} \quad (2.6)$$

L'approccio descritto dalle equazioni precedenti trova supporto nella letteratura [68] [69], inoltre i valori ottenuti dall' Eq. 2.5 sono già stati verificati durante lo studio del dispositivo più piccolo ottenendo dati in linea con quelli sperimentali.

In ogni fase del distillatore, il flusso di vapore specifico (q) espresso in $[W/m^2]$ tra evaporatore e condensatore è dovuto principalmente a causa del cambiamento di fase dell'acqua e del trasferimento di calore per conduzione:

$$q = \frac{k_{eff,g}}{d_{gap}} (T_E - T_C) + J\Delta h_{LV} + q_l \quad (2.7)$$

Dove:

- $k_{eff,g}$ conduttività termica effettiva nel gap tra aria e membrana;
- d_{gap} spessore di ogni stadio;
- Δh_{LV} calore latente di vaporizzazione;
- q_l perdite termiche specifiche sulle superfici laterali;

Sfruttando le analogie con un circuito elettrico si può rappresentare il trasferimento di calore per conduzione tramite delle resistenze termiche in serie [64], come in figura 2.3. Nello specifico, dall'alto verso il basso, sono rappresentate le resistenze termiche dovute a: trasferimento di calore convettivo e conduttivo tra ambiente ed evaporatore del primo stadio; attraverso il TiNOX e l'isolante termico convettivo; una serie di resistenze conduttive dovute agli strati multipli del dispositivo; trasferimento di calore convettivo

tra dissipatore di calore e ambiente [64]. Le frecce blu indicano il calore latente recuperato tra evaporatore e condensatore.

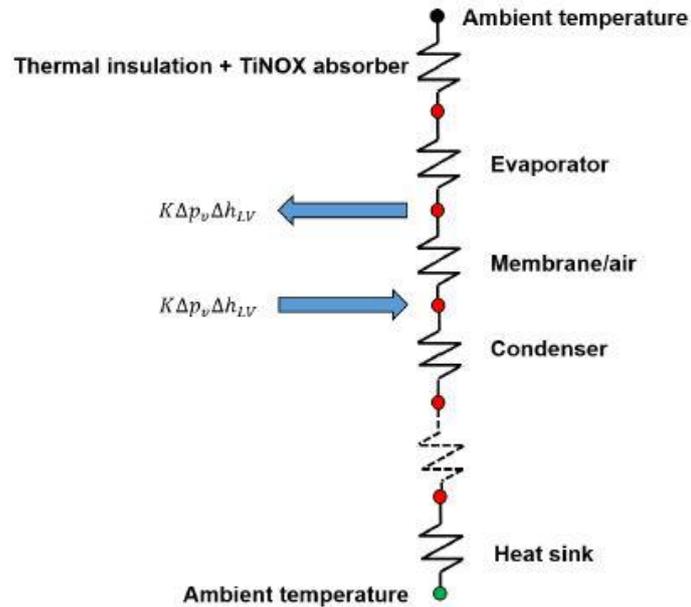


Figura 2. 3 - Circuito termico equivalente monodimensionale. 'Immagine presa da [64]'

Bisogna specificare che, in condizioni stazionarie, il flusso d'acqua attraverso le membrane idrofile è guidato esclusivamente dal carico disponibile imposto dalla pendenza e non più dalle forze capillari [64]. Tuttavia, la velocità del flusso è molto bassa, tale da poter essere considerato un flusso di tipo laminare. La convezione all'interno delle membrane può essere trascurata, è quindi possibile attribuire interamente alla conduzione il processo di trasferimento del calore. Queste considerazioni sono particolarmente importanti per effettuare le simulazioni con COMSOL Multiphysics® discusse nei paragrafi successivi.

2.4 Analisi Numerica

COMSOL Multiphysics® è una piattaforma di analisi agli elementi finiti che consente di rappresentare graficamente un modello CAD ed effettuare simulazioni sul funzionamento al fine di valutarne le prestazioni teoriche. Nel caso specifico si è ricreato il modello 3D

del dissalatore multistadio rappresentando solo l'effettiva area di lavoro con un approccio completamente accoppiato. Il software richiede una serie di passaggi necessari alla riproduzione dell'ambiente di lavoro. Il primo step consiste nella selezione delle leggi fisiche che saranno applicate al modello, successivamente si riproduce la geometria del componente per strati, associando a ciascuno di essi il relativo materiale con le relative caratteristiche. Una volta generato il componente saranno applicate le leggi fisiche scelte inizialmente associandole ai relativi domini e impostando le opportune condizioni al contorno. Infine, per avviare la simulazione numerica è necessario costruire una mesh del sistema in modo da creare una rappresentazione analitica del dissalatore e consentire l'elaborazione dei dati. Nelle successive sezioni sarà fornita una spiegazione più dettagliata dei passaggi eseguiti e i parametri impostati.

2.4.1 Setup della simulazione

Geometria e Materiali

Il dissalatore è rappresentato come una sovrapposizione di strati rettangolari che rappresentano l'area di lavoro effettiva del dispositivo. Nello specifico il primo stadio è formato da otto blocchi, ovvero:

1. assorbitore solare in TiNOX®;
2. supporto evaporatore in alluminio;
3. evaporatore in microfibra idrofila;
4. membrana idrofobica (in PTFE con pori da 0.1 μm);
5. condensatore in microfibra idrofila;
6. supporto condensatore in alluminio;
7. due supporti laterali in gomma (CR – policloroprene).

Gli altri due stadi invece, contengono gli stessi blocchi del primo ma privo di assorbitore solare e supporto in alluminio dell'evaporatore. Il secondo ed il terzo evaporatore, infatti, condividono lo stesso supporto in alluminio del condensatore dello stadio precedente. Ogni blocco ha uno spessore di 1 mm fatta eccezione per le strisce di gomma spesse 3 mm e di sezione 56.5 x 1.75 cm. La sezione dell'assorbitore solare e dei fogli di alluminio è di 56.5 x 38 cm, le membrane idrofobiche e idrofiliche hanno area 56.5 x 34.5 cm. La superficie effettiva di lavoro è pari a circa 1949.25 cm^2 .

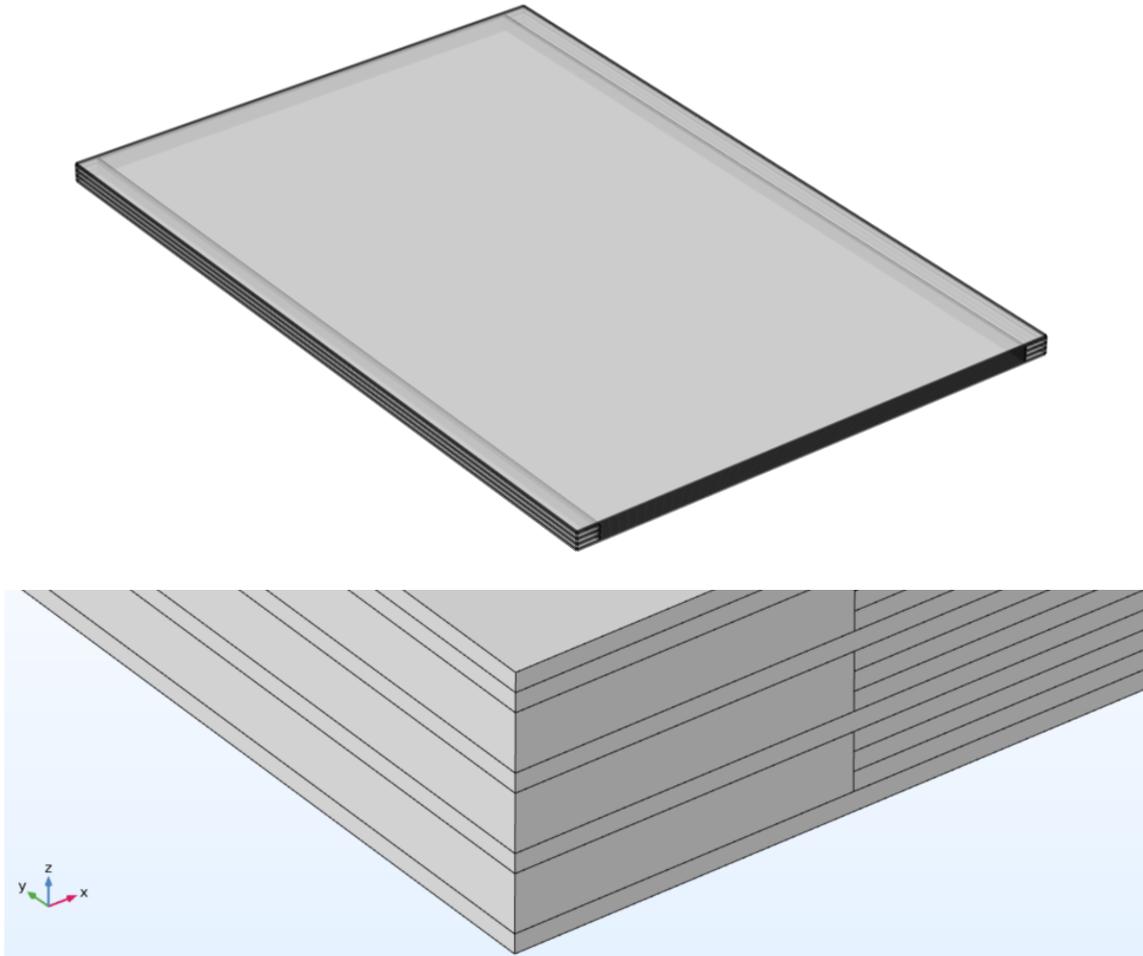


Figura 2. 4 - Vista ortogonale (in alto), Zoom sul multistrato (in basso)

Le membrane idrofile che compongono l'evaporatore e il condensatore vengono rappresentati come strati d'acqua con conducibilità termica data dalla media pesata di acqua (70%) e microfibra (30%), quest'ultima con proprietà termiche molto simili a quelle del cotone:

$$k_{microfiber} = 0.3 \cdot k_{cotton} + 0.7 \cdot k_w \quad (2.8)$$

Dove $k_{cotton} = 0.04 \text{ W/mK}$ e $k_w = 0.6 \text{ W/mK}$. La quantità d'acqua assorbita è stata calcolata confrontando i pesi delle membrane asciutte e bagnate, le membrane idrofobe sono state rappresentate in parallelo con il gap tra evaporatore e condensatore, rispettivamente con le dimensioni di $d_m = 0.15 \text{ mm}$ per le membrane e $d_{air} = 0.85 \text{ mm}$

per il gap d'aria. Lo spessore d_{gap} di questo strato è dato dalla somma dei due precedenti, per quanto riguarda la conducibilità termica di ogni strato vale [64]:

$$\frac{1}{k_{gap}} = \frac{1}{[k_{air}\varepsilon_m + (1-\varepsilon_m)k_{PTFE}] \frac{d_{gap}}{d_m}} + \frac{1}{k_{air} \frac{d_{gap}}{d_{air}}} \quad (2.9)$$

k_{gap} è la conducibilità termica globale del gap e tiene conto dei seguenti fattori: conducibilità termica dell'aria $k_{air} = 0.026 \text{ W/mK}$, conducibilità termica della membrana idrofoba $k_{PTFE} = 0.25 \text{ W/mK}$, porosità della membrana $\varepsilon_m = 0.85$, i valori degli spessori d_m , d_{air} e d_{gap} calcolati prima. Dalla 2.9 il valore della conducibilità termica risulta circa 0.0287 W/mK . I supporti di alluminio e di gomma sono stati modellati prendendoli direttamente dalla libreria del software.

Fisica e condizioni al contorno

L'obiettivo è quello di trovare il flusso di vapore e tracciare il profilo di temperatura, trascurando il transitorio in quanto il sistema verrà analizzato in regime stazionario. Per risolvere il sistema numerico bisogna impostare tre condizioni fondamentali: *trasporto di specie diluite, trasferimento di calore in un mezzo poroso, flusso laminare*. Mentre il trasferimento del calore avviene nell'intero sistema, quello della massa interessa solo il dominio delle membrane porose. Poiché l'obiettivo è quello di calcolare il flusso di vapore acqueo attraverso la membrana, per semplicità, si è deciso di modellare il flusso laminare solo negli evaporatori, in quanto non è interessante conoscere il comportamento dell'acqua all'interno dei condensatori. Inoltre, l'assunzione di velocità trascurabile nel condensatore è accettabile in quanto $Re < 10^{-5}$ [64]. Pertanto, le equazioni di Navier-Stokes, correlate a quest'ultimo caso sono state risolte omettendo la dipendenza dal flusso di vapore acqueo. Gli altri due sistemi di equazioni, associate alle altre leggi fisiche, sono stati risolti utilizzando un "approccio completamente accoppiato" permettendo al sistema di risolvere un unico grande sistema di equazioni [64]. A questo scopo il trasferimento di calore, generato dal flusso di vapore che attraversa la membrana, è stato modellato tramite due generatori di calore fissi posti sulle due superfici della membrana, risolte tramite il metodo del moltiplicatore Lagrangiano (λ) [64]:

$$Q_{boundary} = \pm J \cdot \Delta h_{LV} = \lambda \cdot \Delta h_{LV} \quad (2.10)$$

Dove $Q_{boundary}$ è il calore generato, J il flusso di vapore acqueo, λ il moltiplicatore lagrangiano e Δh_{LV} l'entalpia del cambiamento di fase liquido-vapore. Questo debole vincolo si usa nell'approccio completamente accoppiato per legare la fisica attraverso la funzione Lagrangiana, vale a dire la funzione che collega l'equazione del calore 2.7 alla 2.4 attraverso il vincolo appena espresso (2.10).

Il trasporto di massa all'interno della membrana porosa può essere descritto dalla seguente equazione:

$$N = -D_{eff} \nabla c = -D_{eff} \nabla \left(\frac{pv}{RT} \right) \quad (2.11)$$

Dove N è il flusso molare diffusivo, espresso in mol/m^2s , D_{eff} il coefficiente di diffusione effettivo, c la concentrazione molare in mol/m^3 . In particolare, il coefficiente di diffusione è calcolato tenendo in considerazione sia Knudsen che il trasporto molecolare espresso in m^2/s [64]. Considerando l'assunzione $x_w \ll 1$ il coefficiente di diffusione equivalente si calcola come:

$$\frac{1}{D_{eff}} = \frac{1}{D_{wK}} + \frac{1}{D_{wa}} + \frac{1}{D_{wa,air}} \quad (2.12)$$

Dove:

$$D_{wK} = \frac{8r}{3} \cdot \sqrt{\frac{RT}{2\pi M_w}} \cdot \frac{\varepsilon_m d_{gap}}{\tau d_m} \quad (2.13)$$

$$D_{wa} = 1.19 * 10^{-4} \cdot \frac{T^{1.75}}{P} \cdot \frac{\varepsilon_m d_{gap}}{\tau d_m} \quad (2.14)$$

$$D_{wa,air} = 1.19 * 10^{-4} \cdot \frac{T^{1.75}}{P} \cdot \frac{d_{gap}}{d_{air}} \quad (2.15)$$

Essendo D_{wK} il coefficiente di diffusione di Knudsen, D_{wa} il coefficiente di diffusione molecolare e $D_{wa,air}$ il coefficiente di diffusione nello strato d'aria dove il regime di Knudsen non è efficace. Poiché le temperature differiscono in ogni fase, il coefficiente di diffusione globale da assegnare a tutte le membrane è ottenuto come media aritmetica dei diversi D_{eff} calcolati alle diverse temperature [64]. Il valore della concentrazione molare iniziale c_0 da inserire nell'equazione può essere calcolato come:

$$c_0 = \frac{\phi_{rel} \rho_{max}}{M_w} \quad (2.16)$$

Dove ϕ_{rel} è l'umidità relativa pari a 0.2 e ρ_{max} la densità massima dell'acqua a temperatura ambiente per un'umidità relativa al 100%, vale a dire 0.0172 kg/m^3 .

I flussi di calore all'interno del sistema sono stati modellati con diverse condizioni al contorno, ad esempio l'irraggiamento solare è stato modellato come flusso in ingresso nell'assorbitore solare. È stato ipotizzato un flusso di calore di iniziale di $q'_{solar} = 650 \text{ W/m}^2$, a causa dell'assorbanza del TiNOX® e della trasparenza del pannello PMMA, si riduce rispettivamente di un fattore 0.95 e 0.93. I flussi di calore convettivi invece, agiscono su ogni superficie esterna del dispositivo causando dissipazioni termiche. Sulla superficie superiore, il flusso di calore convettivo è stato modellato in serie con la resistenza termica fornita dallo strato di PMMA e lo strato d'aria tra quest'ultimo e il TiNOX®, ovvero:

$$\frac{1}{h_{top}} = \frac{1}{\frac{k_{air}}{d_{air,top}}} + \frac{1}{\frac{k_{PMMA}}{d_{PMMA}}} + \frac{1}{h_{conv,top}} \quad (2.17)$$

Dove, $d_{air,top} = 2 \text{ mm}$ è lo spessore dello strato d'aria tra il PMMA e il TiNOX®, k_{PMMA} la conducibilità termica del pannello PMMA pari a 0.19 W/mK , $d_{PMMA} = 3 \text{ mm}$ lo spessore del pannello PMMA e $h_{conv,top}$ il coefficiente di trasferimento di calore convettivo generato dalla convezione, causato da una velocità del vento di 2 m/s , e assunto pari a $10 \text{ W/m}^2\text{K}$. Il flusso di calore che agisce sul fondo del sistema, fungendo da dissipatore di calore, è invece puramente convettivo, il relativo coefficiente di trasferimento di calore convettivo è stato assunto leggermente inferiore, ovvero pari al 75% del precedente, quindi $7.5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Sulle superfici laterali del dispositivo l' h_{conv} è stato posto pari al 30% di $h_{conv,top}$, ovvero $3 \text{ W/m}^2\text{K}$, supponendo che il vento soffi costantemente verso una direzione uno dei quattro lati non sarà soggetto a flussi d'aria. Tuttavia, il contributo di queste perdite sono minime se confrontate con la grandezza del dispositivo. La temperatura ambiente è stata assunta di 30 °C . Un'altra fonte di perdite è costituita dalle radiazioni, per simularle è stato necessario assumere l'emissività di ciascuna superficie del dispositivo. Nello specifico sono stati assunti i seguenti valori di emissività: 0.04 per il TiNOX® sulla superficie superiore; 0.01 per la superficie sul fondo fatta di alluminio; l'emissività della superficie laterale è stata stimata dalla media ponderata tra gomma, alluminio, microfibra e PTFE e ha prodotto un valore pari a 0.362. Infine, il flusso laminare all'interno dell'evaporatore è stato modellato attraverso due

condizioni al contorno all'ingresso e all'uscita. All'ingresso sono stati imposti temperatura e velocità d'ingresso, la temperatura è pari a quella ambiente, mentre la velocità in ingresso è stata calcolata sapendo che il dispositivo consuma 5 litri di acqua al giorno (con 8 ore di sole). Conoscendo la sezione dell'evaporatore è stato possibile ricavare la velocità pari $5.91 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$. La condizione imposta all'uscita è data dalla pressione ambiente, includendo l'effetto della gravità.

Mesh

A causa delle grandi dimensioni del sistema, la scelta di una mesh uniforme comporterebbe un tempo di calcolo molto lungo, si è deciso quindi di modellare il dispositivo impostando una maglia più fine laddove risulta di maggior interesse. Nello specifico, per tutte le sezioni d'uscita del sistema è stata scelta una mesh "triangolare non strutturata" con dimensione degli elementi impostata su "molto fitta", per le superfici rimanenti è stata scelta una "mesh estrusa" (*Sweep mesh*) con metodo di Meshing delle facce in "Quadrilatero (versione legacy 5.4)" e distribuzione su numero fisso di elementi pari a 10 intervalli longitudinali. La figura 2.5 mostra un dettaglio della mesh effettuata sulle superfici, in alto una visuale globale del sistema, in basso il dettaglio che mostra la differenza tra le due tipologie di mesh utilizzate. Le superfici selezionate in blu sono quelle con mesh triangolare non strutturata.

La Sweep mesh, adattandosi alle caratteristiche del dispositivo, ha permesso di effettuare simulazioni variando lo spessore della membrana idrofobica senza aumentare il costo computazionale ma perdendo leggermente di precisione dei risultati.

Il sistema di equazioni risultante per la simulazione prevede 147191 gradi di libertà da risolvere più 119914 gradi di libertà interni.

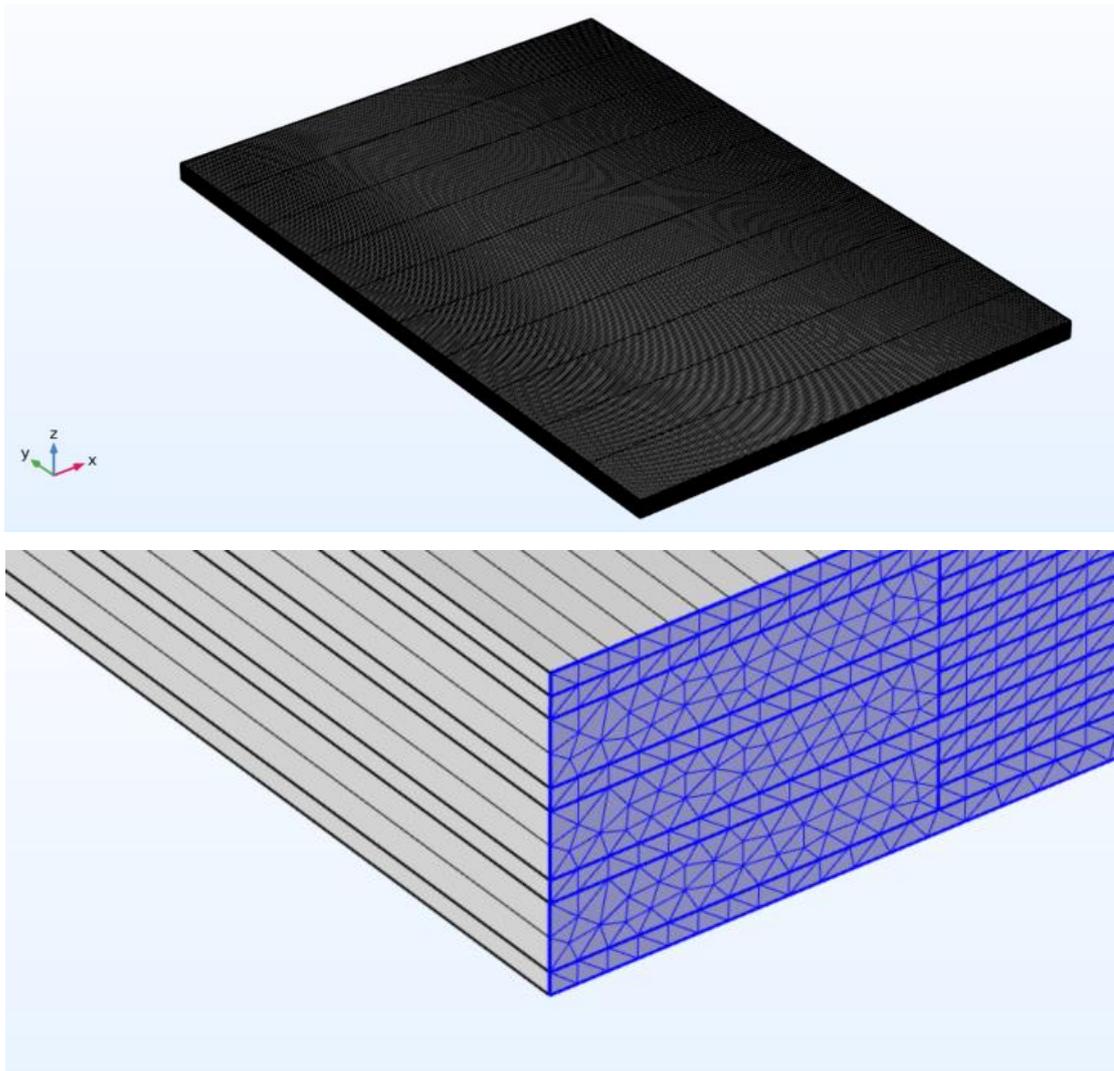


Figura 2. 5 – Mesh completa (in alto); Dettaglio mesh (in basso)

2.4.2 Risultati delle simulazioni

Dopo aver impostato accuratamente tutti i parametri è stata avviata la simulazione numerica allo scopo di ottenere una previsione più o meno attendibile delle prestazioni del prototipo in questione. Il costo computazionale risulta abbastanza ridotto grazie soprattutto all'approccio completamente accoppiato, la convergenza è stata raggiunta dopo 7 iterazioni.

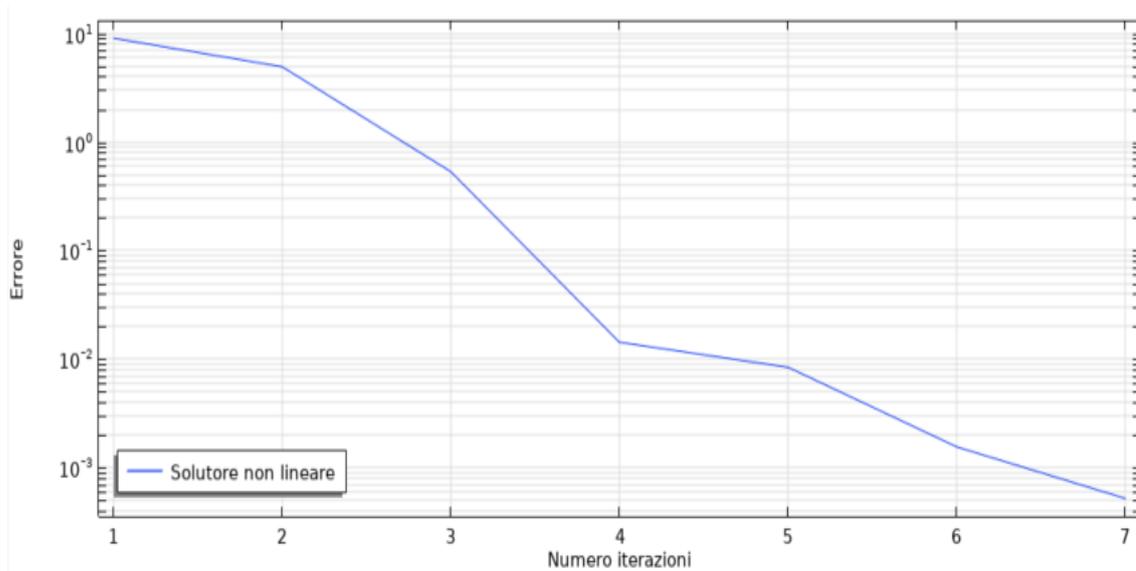


Figura 2. 6 – Iterazioni solutore non lineare

L'obiettivo principale della simulazione è la stima del flusso di vapore acqueo (J) che attraversa la membrana, dai risultati ottenuti questo valore ammonta a 3.7750×10^{-3} mol/s, che corrisponde a 245.2 g/h o $1.258 \text{ L/m}^2\text{h}$. Dal punto di vista delle prestazioni questo valore risulta inferiore a quello della versione a 3 stadi del primo dispositivo che era pari a $1.462 \text{ L/m}^2\text{h}$. Il rendimento del dissalatore risulta pari a:

$$\eta = \frac{NM_w \Delta h_{LV}}{q_{solar}} \cong 24\% \quad (2.18)$$

Contro il 32% della versione precedente [64].

Tuttavia, questo risultato è comprensibile del fatto che l'energia accumulata non serve solamente all'evaporazione dell'acqua ma anche per scaldare il flusso dopo la condensazione del vapore, inoltre, non bisogna sottovalutare l'irradianza media alla quale è stato sottoposto il dissalatore, molto più bassa rispetto a quella dei test effettuati sulla prima versione.

La tabella 2.1 mostra in quale misura l'energia solare viene dissipata nelle varie sezioni del componente:

Canali di dissipazione	Flusso Convettivo [mW]	Flusso Radiativo [mW]	Flusso Totale [mW]
TiNOX® superiore	25249	1705.57	96342
TiNOX® laterale	131.7	119.82	251.52
Alluminio	430.2	381.2	811.4
Evaporatore	/	89.33	89.33
Membrana	95.10	85.49	180.59
Condensatore	92.35	82.09	174.45
Gomma	660.5	579.4	1239.9
Fondo	28765	2545	31310
Riscaldamento acqua	/	/	71870

Tabella 2. 1 - Dissipazioni termiche espresse in [mW]

Canali di dissipazione	Flusso Convettivo [%]	Flusso Radiativo [%]	Flusso Totale [%]
TiNOX® superiore	22.6	1.5	24.1
TiNOX® laterale	0.123	0.107	0.23
Alluminio	0.38	0.34	0.72
Evaporatore	/	0.08	0.08
Membrana	0.085	0.076	0.161
Condensatore	0.082	0.073	0.155
Gomma	0.59	0.518	1.10
Fondo	25.7	2.27	27.97
Riscaldamento acqua	/	/	45.48

Tabella 2. 2 – Peso delle dissipazioni rispetto al totale, espresso in [%]

La tabella 2.2 mostra una stima del peso di ciascuna fonte di dispersione correlata alla quantità $Q'_{solar} = q'_{solar} \cdot S \cdot (0.95 \cdot 0.93) = 111.94 \text{ W}$, ovvero il flusso solare depurato dei fattori correttivi dovuti alle caratteristiche ottiche della superficie superiore, le perdite ottiche sono pari all'11.65% di Q'_{solar} .

Dai valori ottenuti è possibile notare in che canale il calore trasferito all'acqua salmastra diventa una vera propria perdita, nonostante ciò la configurazione adottata risulta una scelta inevitabile se si vuole effettuare un ingrandimento del dispositivo in quanto come già detto, le sole forze capillari non permettono il corretto flusso dell'acqua lungo le

membrane, questo potrebbe causare un essiccamento di quest'ultime con conseguente riduzione della produttività.

La figura 2.7 mostra uno schema delle dissipazioni termiche attraverso le varie superfici del dispositivo e la distribuzione di temperatura nei vari strati.

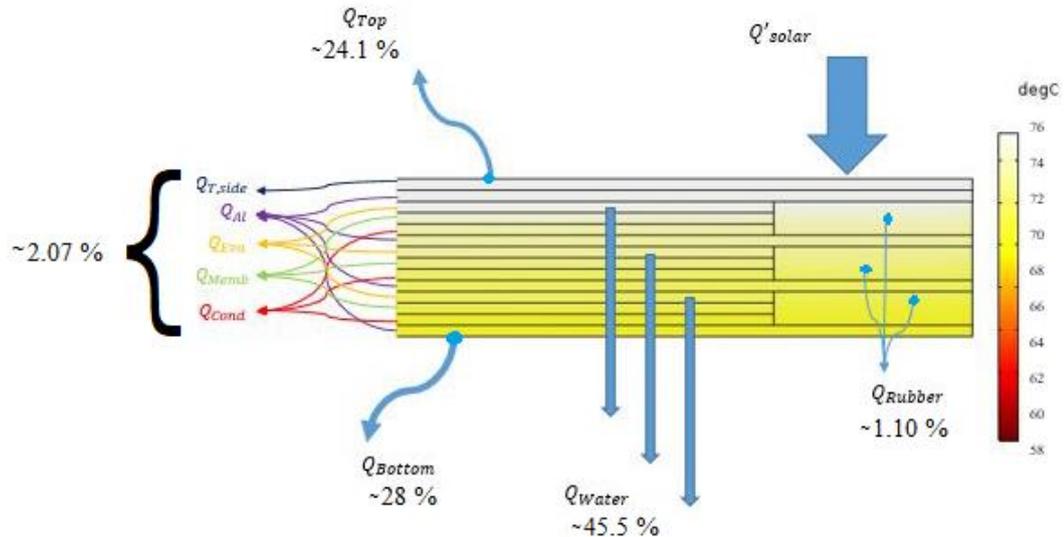


Figura 2. 7 - Distribuzione di temperatura tra gli stadi; Rappresentazione delle dissipazioni termiche

Una volta determinato il flusso di vapore acqueo risulta interessante valutarne la distribuzione all'interno delle fasi del sistema e i relativi profili di temperatura.

I valori raccolti nella tabella 2.2 rappresentano le perdite di calore che il dissalatore dissipa con gli ambienti circostanti, estrapolati dalla simulazione agli elementi finiti, bisogna tener presente che il calore che fuoriesce dalla superficie inferiore include anche il flusso di calore latente rilasciato dopo la condensazione del vapore che, si vuole il più possibile recuperare nelle configurazioni multistadio [64]. In figura 2.7 sono indicate le perdite espresse in percentuale rispetto al Q'_{solar} d'ingresso nel sistema.

Osservando la figura 2.8, si nota un flusso di vapore acqueo opposto all'ingresso dell'ultimo stadio, qui infatti, la differenza di temperatura tra evaporatore e condensatore è troppo bassa per contrastare la componente chimica.

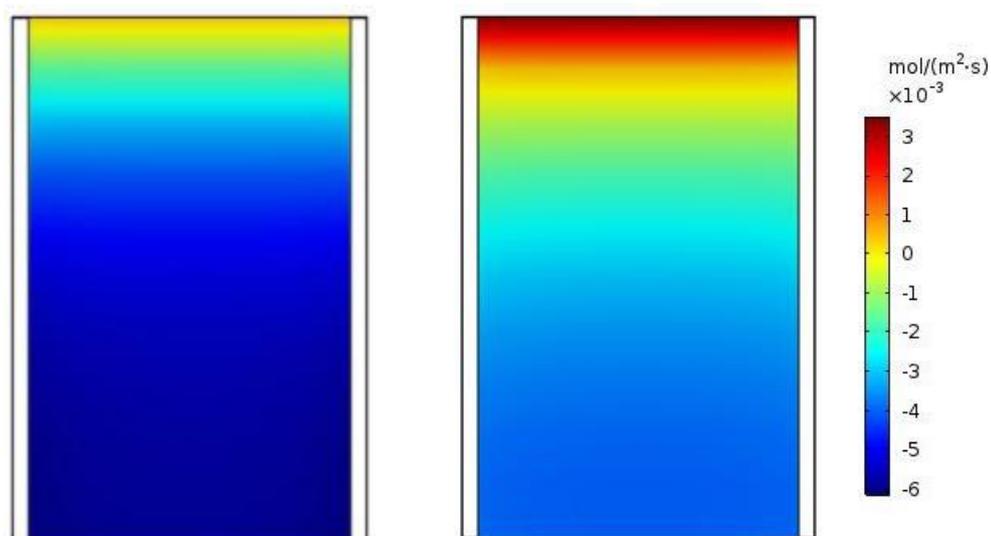


Figura 2. 8 - Distribuzione di acqua distillata sulle superfici superiore (sx) e inferiore (dx). 'Immagine presa da [65]'

La differenza di pressione del vapore acqueo è dettata dalla differenza di salinità tra i due fluidi e non dal gradiente di pressione, la temperatura inoltre, rimane pressoché costante.



Figura 2. 9 - Flusso di vapore acqueo al bordo d'uscita delle tre membrane idrofobe. 'Immagine presa da [65]'

La figura 2.9 mostra il contributo di ogni stadio alla produzione di acqua distillata, nello specifico è mostrato il flusso di vapore acqueo sul bordo inferiore delle tre membrane PTFE. I risultati ottenuti dal prof. Chiavazzo et al. evidenziano che la portata del distillato si riadatta linearmente con il numero di stadi fino ad una certa soglia che dipende dalla

salinità dell'acqua di alimentazione [64]. Superata questa soglia il miglioramento delle prestazioni rallenta a causa di una ridotta differenza di temperatura attraverso ogni fase di distillazione completa che è sempre meno efficace nel contrastare la differenza di tensione di vapore generata dalla salinità [64].

Nel complesso della simulazione, come previsto il primo stadio è quello più performante e fornisce una portata di distillato di 108.72 g/h, il secondo stadio invece 80.76 g/h, infine l'ultimo stadio fornisce una portata di 55.7 g/h. Il contributo di ciascuno stadio rispetto alla produttività totale è di circa 44.3% per il primo, 32.9% e 22.8% per secondo e terzo stadio. Il flusso di portata segue il profilo di temperatura, come mostra la figura 2.10.

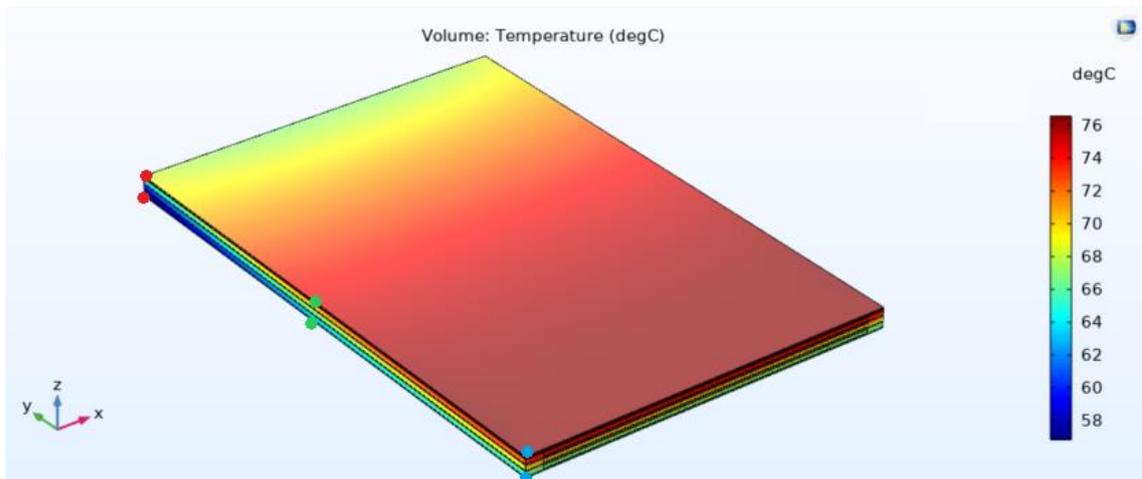


Figura 2. 10 - Distribuzione di temperatura 3D

In particolare, la temperatura tende a diminuire attraversando la sezione del dispositivo, i punti colorati rappresentati in figura 2.10 rappresentano i valori massimo e minimo del profilo di temperatura lungo l'asse (z), rispettivamente nella zona centrale (verde) e nelle vicinanze dei bordi di ingresso (rosso) e uscita (blu), mostrato in fig. 2.11.

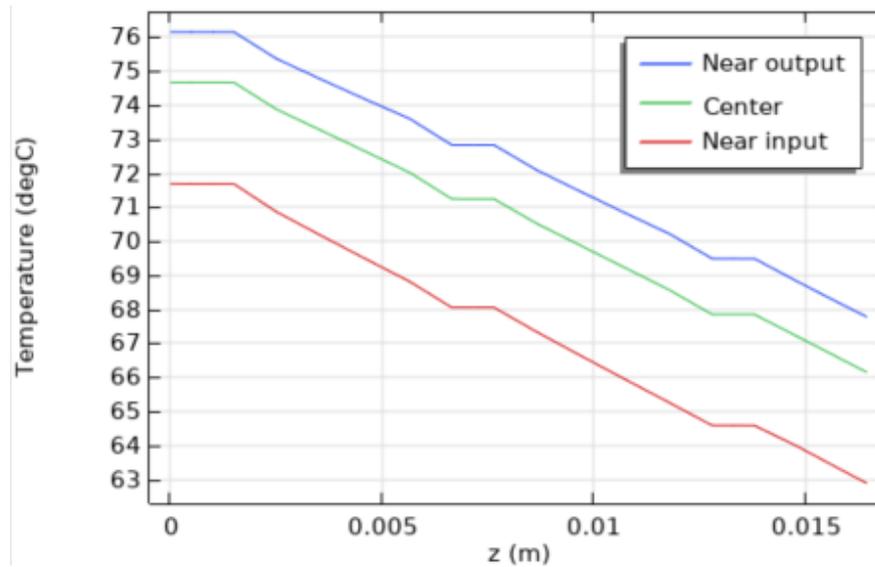


Figura 2. 11 - Profilo di temperatura lungo l'altezza del dispositivo

Si può notare il calo di temperatura causato dai diversi fattori di conducibilità termica. Nella membrana idrofobica, ad esempio, dove questo fattore è il più basso la temperatura si abbassa maggiormente, nell'alluminio invece la temperatura rimane pressoché costante. Il salto di temperatura massimo si ottiene dalla differenza tra la temperatura sulla superficie superiore, in corrispondenza della sezione di uscita, pari a circa 76°C e la temperatura sullo strato di fondo, in corrispondenza della sezione d'ingresso, pari a circa 63°C, generando un gradiente termico totale di appena 13°C. Inoltre, il gap tra le funzioni rappresentate è più ampio confrontando la zona di ingresso e quella centrale. L'andamento della temperatura lungo la sezione longitudinale dell'evaporatore è mostrato in fig. 2.12.

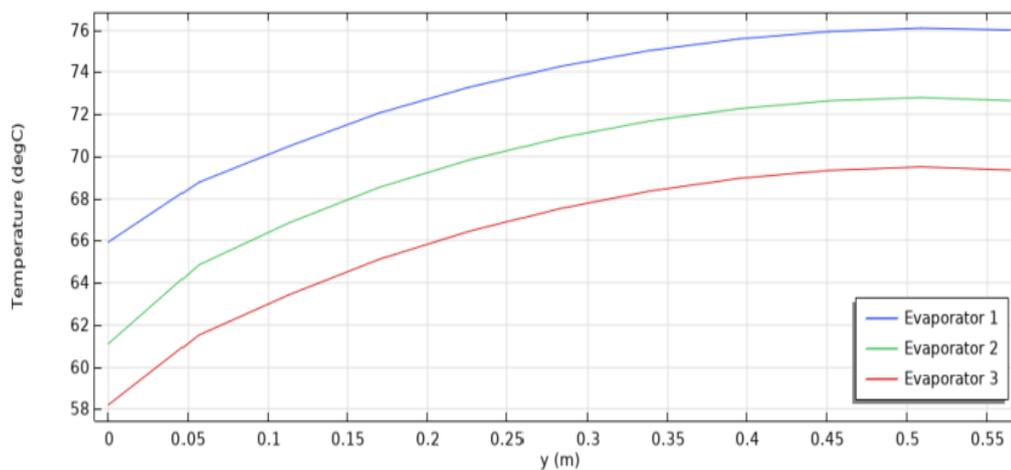


Figura 2. 12 - Profilo di temperatura degli evaporatori

Il profilo delle temperature degli evaporatori lungo l'asse longitudinale (fig. 2.12) mostra un andamento molto simile, ovvero, la temperatura aumenta tra la sezione d'ingresso e quella di uscita, ma allo stesso tempo, i valori iniziale e finale diminuiscono avvicinandosi allo strato inferiore.

Analizzando insieme i due grafici precedenti, si nota come il gradiente di temperatura sia più elevato vicino alla sezione d'ingresso dell'acqua e più basso in corrispondenza della sezione di uscita.

3. Prototipazione

3.1 Introduzione

Un problema comune alla maggior parte dei sistemi di desalinizzazione passiva è l'incapacità di recuperare il calore latente dalla fase di condensazione, infatti, quando l'acqua dolce torna nella sua fase liquida, una notevole quantità di energia viene sprecata nell'ambiente mentre potrebbe essere riutilizzata per migliorare l'efficienza del sistema [64]. Il gruppo di ricerca scientifica del DENERG del Politecnico di Torino, chiamato *SMaLL Laboratory*, ha sviluppato un dispositivo multistadio per risolvere questo problema in modo da permettere al sistema di superare i limiti termodinamici del dissalatore a singolo stadio, ovvero una produzione di $1,471 L/m^2h$ di acqua (considerando una potenza solare pari ad un sole), sfruttando il calore latente di vaporizzazione dell'acqua a $20\text{ }^\circ\text{C}$ [64]. Questo studio è il primo a mostrare concetti innovativi come un processo di distillazione multistadio e un sistema di alimentazione priva di organi meccanici, ciò ha portato a risultati notevoli registrando una produttività considerata proibitiva per i dispositivi studiati finora, ovvero di circa $3 L/m^2h$. I risultati forniti dal modello teorico mostrano una produttività potenzialmente maggiore, addirittura circa $6 L/m^2h$ [64].

Questo risultato potrebbe essere raggiunto ottimizzando alcune funzionalità del dispositivo, quali ad esempio, migliorare lo strato di isolamento termico o cambiare materiali e spessori utilizzati, così facendo però, probabilmente verremmo meno ad uno degli obiettivi centrali del lavoro, ovvero l'economicità [64]. Tuttavia, per rendere utilizzabile il dispositivo, al fine di soddisfare il fabbisogno giornaliero di una singola persona ($2 L/giorno$ [70]), è necessario un potenziamento. Lo scopo di questo lavoro è quello di ingrandire e migliorare il dissalatore solare passivo sviluppato dal Politecnico di Torino [64], basandoci su una combinazione smart di materiali a basso costo. Di seguito quindi, verrà fornita una spiegazione completa dei passaggi effettuati per la realizzazione di questo prototipo in scala e le linee guida che sono state rispettate, [64].

3.2 OHDC (*Oman Humanitarian Desalination Challenge*)

Durante la fase di progettazione e sviluppo del nuovo dissalatore si è pensato di affrontare uno studio che potesse risultare all'avanguardia su diversi fronti, per questo motivo sono state seguite le linee guida imposte da un contest mondiale al quale il Politecnico di Torino ha inviato la propria richiesta di partecipazione. Questo espediente, oltre alla possibilità di competere a livello mondiale, fornisce delle recensioni che permettono di apportare le migliorie necessarie al prototipo. Nella fattispecie il contest scelto è la *Oman Humanitarian Desalination Challenge* (OHDC), una competizione avviata dalla cooperazione di *MEDRC Water Research* e *Oman Research Council*. Non a caso l'Oman è uno dei paesi al mondo più attivi a promuovere concorsi riguardanti nuove tecnologie di dissalazione, in quanto è stato classificato come il 16° paese al mondo che soffre maggiormente di carenza d'acqua. L'obiettivo della competizione è quello di realizzare un dispositivo a costi facilmente accessibili, ma soprattutto in grado di poter essere rapidamente distribuito nelle aree che soffrono maggiormente di scarsità idrica. Sarebbe interessante avere un dispositivo capace di rimuovere virus e batteri dall'acqua inquinata, oltre che il sale, e renderla quindi anche potabile.

3.2.1 Linee guida generali

La OHDC ha fornito una guida dettagliata dei requisiti necessari per poter partecipare alla competizione, si tratta di 9 caratteristiche usate come metro di valutazione per giudicare le tecnologie proposte dai vari concorrenti:

1. **Low Cost** – il dispositivo deve essere distribuito in larga scala nelle zone maggiormente colpite dal fenomeno della carenza idrica, il costo di produzione massimo imposto deve essere di 20,00 \$.
2. **Handheld-size** – il dispositivo deve essere di piccole dimensioni e facilmente trasportabile da una singola persona, per essere trasferito ad una fonte d'acqua vicina.
3. **Easy to use** – il sistema deve essere facile da usare, tenendo conto che l'utente medio potrebbe non avere particolari conoscenze tecniche.

4. **Robust** – il dispositivo deve essere compatto e resistente alla corrosione, deve contenere poche componenti assemblabili onde evitare che la perdita di qualcuno di essi possa rendere inutilizzabile il sistema.
5. **Easily transportable**– leggerezza ed ergonomia permettono il trasporto a mano anche per lunghe distanze.
6. **Minimum rate of production** – bisogna produrre una quantità minima di acqua distillata pari a 3 litri al giorno, poco più del fabbisogno giornaliero per persona.
7. **Stand alone** – il sistema deve essere autonomo, ovvero deve funzionare senza organi meccanici/elettronici esterni, nessuna aggiunta di componenti chimici o carburanti, l'impiego deve avere costi nulli o limitarsi a quelli di manutenzione.
8. **Water quality** – deve essere in grado di depurare 100 NTU (Nephelometric Turbidity Unit), in modo da portare da 35 *g/L* a massimo 1 *g/L* TDS (Total Dissolved Solid) la concentrazione salina dell'acqua, che rappresenta il livello di contaminazione massima accettata dall'OMS [71].
9. **Short-term use** – il dispositivo dovrà essere capace di operare per un tempo minimo di 30 giorni.

3.4 Setup costruttivo

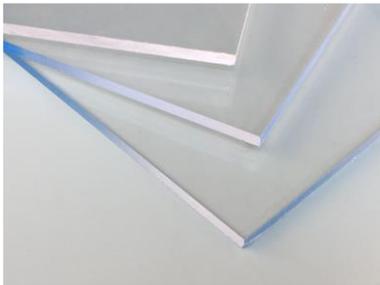
Come già accennato, il design del prototipo è basato su un dispositivo più piccolo già testato, durante la fase di prototipazione sono state apportate delle modifiche per permettere il funzionamento del dissalatore in scala più ampia. Nei paragrafi a seguire saranno elencati e descritti i componenti utilizzati per la realizzazione del prototipo insieme ad una guida tecnica per l'assemblaggio.

3.3.1 Struttura del dispositivo

La realizzazione del prototipo è stata eseguita manualmente in laboratorio. Nel dettaglio il materiale utilizzato è riportato di seguito:



a. **Copertura trasparente:** pannello in PMMA di dimensioni 59.5x42x0.25 cm.



b. **Assorbitore solare:** lastra di alluminio di dimensioni 59.5x42 cm rivestito da uno strato di TiNOX® da un lato.



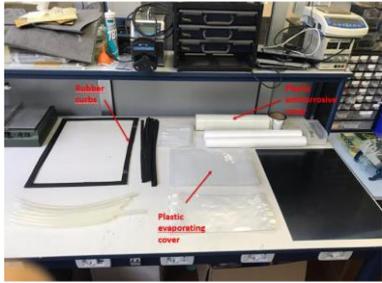
c. **Lastre di alluminio:** x3 fogli di dimensione 56.5x38x0.1 cm.



d. **Membrane idrofiliche:** panni assorbenti in microfibra di grandezza standard 34.5x34.5 cm.

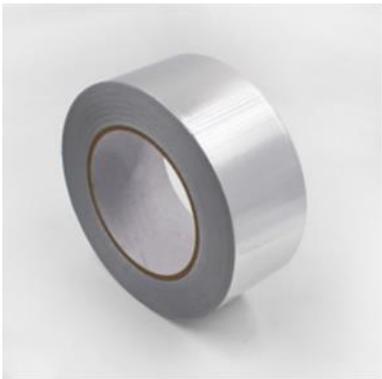


e. **Membrane idrofobiche:** x3 membrane composte in PTFE (polytetrafluorethylene), di dimensioni 63x52 cm, grandezza dei pori compresa tra 0.1 μm e 0.3 μm .



f. **Componenti plastiche:** le strisce sporgenti degli strati idrofili sono protette con polipropilene (PP) per prevenire l'evaporazione dell'acqua; il lato evaporatore delle lastre di alluminio è protetto con pellicola trasparente (LDPE – Low-Density Polyethylene) al fine di evitare fenomeni di corrosione, poiché il metallo

potrebbe venire a contatto con l'acqua.



g. **Nastro adesivo in alluminio:** tagliato a strisce e sovrapposto per formare un foglio flessibile di alluminio di sezione 41x25 cm.



h. **Supporto inclinato:** costruito con compensato, i piedi di supporto hanno sezioni rispettivamente 27x4.3x4.3 cm per quelli posteriori, 16x4.3x4.3 cm quelli anteriori e inclinazione di 17°.



i. **Bulloni:** x14 bulloni M5, A2-70 (in acciaio austenitico, inossidabile), e altrettanti dadi dello stesso materiale.



j. **Bacino di acqua marina:** contenitore in plastica di sezione interna 46x9.5x8.5 cm.



k. **Bacino di scarico salamoia:** contenitore in plastica con dimensioni interne di 29.5x23.8x9 cm.



1. **Sacchetti di raccolta acqua distillata:** x3 cateteri per la raccolta di acqua distillata.

Figura 3. 1 - Componenti utilizzati per lo sviluppo del prototipo

La maggior parte degli elementi descritti sopra sono stati personalizzati e adattati allo scopo. Il pannello PMMA, ad esempio, è stato modellato usando una sega circolare, le lastre di alluminio con una cesoia per avere un taglio accurato, così come i bulloni che sono stati accorciati fino alla lunghezza di circa 1.5 cm. Anche le membrane idrofobiche e idrofile sono state opportunamente modificate, le prime erano disponibili in rotoli larghi 27 cm quindi si è pensato di sovrapporne due e incollarle tramite nastro biadesivo, le membrane idrofile invece, avevano una dimensione standard di 34.5x34.5 cm quindi sono state efficacemente ritagliate per dare la forma necessaria agli evaporatori ed ai condensatori, come mostrato in uno schizzo nella figura 3.2.

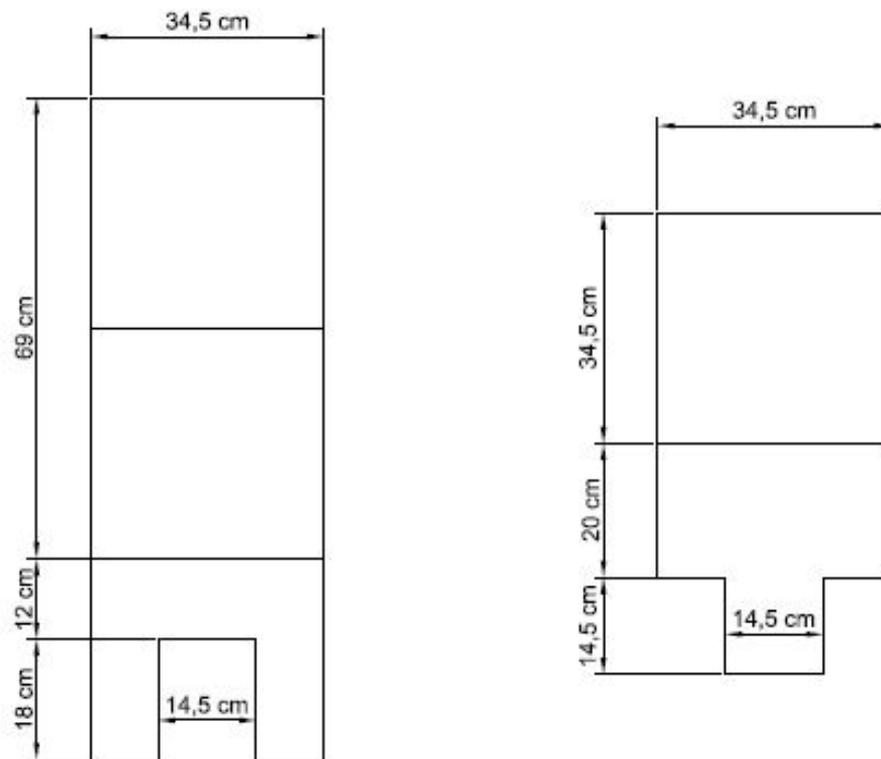


Figura 3. 2 - Schizzo di evaporatore (sinistra) e condensatore (destra). 'Immagine presa da [65]'

Per realizzare ogni evaporatore servono tre membrane idrofile, due invece per quanto riguarda il condensatore, per un totale di 5 membrane idrofile per ogni stadio, ovvero 15 membrane per l'intero dissalatore a 3 stadi. Dalla figura 2.4 si possono notare le strisce di panno poroso che fuoriescono dall'evaporatore e dal condensatore, queste sono attraversate rispettivamente da acqua salmastra e acqua distillata. Per evitare un decadimento delle prestazioni del dispositivo o una perdita di prodotto distillato, si è pensato di foderare i panni idrofili con dei sacchetti realizzati con dei fogli di PP (Fig. 3.3a-b) e sigillati mediante una macchina per il vuoto MACOM VAC2060 (Fig.3.3c).



Figura 3. 3 - a) protezione evaporatore; b) protezione condensatore; c) MACOM VAC2060

Tra il pannello in PMMA e l'assorbitore solare è stata posizionata una guarnizione gommata, allo scopo di ridurre ulteriormente le perdite convettive ma soprattutto per evitare una compressione accidentale degli strati idrofili.



Figura 3. 4 - Tassello M6 inserito nel supporto

Un altro tipo di lavorazione riguarda la costruzione della base di supporto al dispositivo, in particolare si tratta di piedi di appoggio con sezioni 4.3x4.3 cm e altezza rispettivamente 16.3 cm quelli anteriori e 27 cm quelli posteriori. Le lunghezze sono state misurate per garantire una pendenza di circa 17°, un foro di 6 mm è stato realizzato al centro del sostegno in legno e al suo interno si è inserito un tassello filettato per consentire l'accoppiamento col pannello d'alluminio, mediante bulloni d'acciaio austenitico A2-70. Nello specifico lo scopo della pendenza è quello di generare un carico

disponibile tra monte e valle del dispositivo, e di sfruttare la gravità per far fluire l'acqua nel sistema.

Infine, i cateteri sono stati utilizzati come bacino di raccolta dell'acqua distillata. I sacchetti sono stati ritagliati per poter essere accoppiati alle strisce fuoriuscenti dal condensatore, questa soluzione permette un'ottima tenuta del fluido evitando dispersione in ambiente o eventuali contaminazioni e, allo stesso tempo, risponde a perfettamente ai requisiti di economicità e praticità richiesti dal concorso OHDC, sfruttando le valvole a farfalla infatti, è possibile svuotare le sacche al termine di ogni operazione in poco tempo. Nella prima versione del dispositivo si utilizzavano dei tubi di gomma siliconica che indirizzavano l'acqua distillata verso il bacino di raccolta, aumentando quindi la possibilità di contaminazione dall'esterno.



Figura 3. 5 - Catetere di raccolta acqua distillata

3.3.2 Principali differenze tra le due versioni del dissalatore

Come spesso accennato, il dissalatore in analisi rappresenta una sorta di versione 2.0 di un dispositivo sviluppato precedentemente dal gruppo SMaLL del Politecnico di Torino [64] e mostrato in figura 3.6. Di seguito verranno brevemente evidenziate le principali differenze tra le due versioni:

- **Dimensioni.** La caratteristica che per prima salta all'occhio è rappresentata dall'evidente differenza di dimensioni, come già detto la versione 2.0 rappresenta una versione ingrandita della precedente, si è partiti da una sezione utile di 12 x 12 cm [64](fig. 3.6), per poi sviluppare un dispositivo di sezione 56 x 38 cm. La differenza di sezione non ha inciso sulle modalità di impiego delle membrane idrofile e idrofobe.
- **Design di flusso.** Contrariamente alla prima versione [64], il nuovo dissalatore è realizzato imponendo una pendenza di 17° per facilitare lo scorrimento dell'acqua nelle membrane. Nel sistema più piccolo infatti, le forze capillari sono sufficienti a favorire un flusso d'acqua continuo al suo interno, quindi lavorando con aree inferiori l'aiuto della gravità non è necessario per bagnare le membrane interne.

- **Bacino di prelievo.** La prima versione del dispositivo preleva l'acqua salata direttamente dal bacino in cui è posizionato [64], non necessita quindi di piazzare un punto di prelievo a monte in quanto le forze capillari sono sufficienti a fare defluire correttamente il fluido nelle membrane. Inoltre, non è presente un apparato di scarico per l'acqua salata.
- **Pannello superiore.** Il pannello posto sull'assorbitore solare in TiNOX® è realizzato in PMMA nella versione più recente, nella vecchia invece per evitare la convezione nello strato superiore si è utilizzato una struttura creata mediante stampa 3D (vedere figura 3.6) [64].

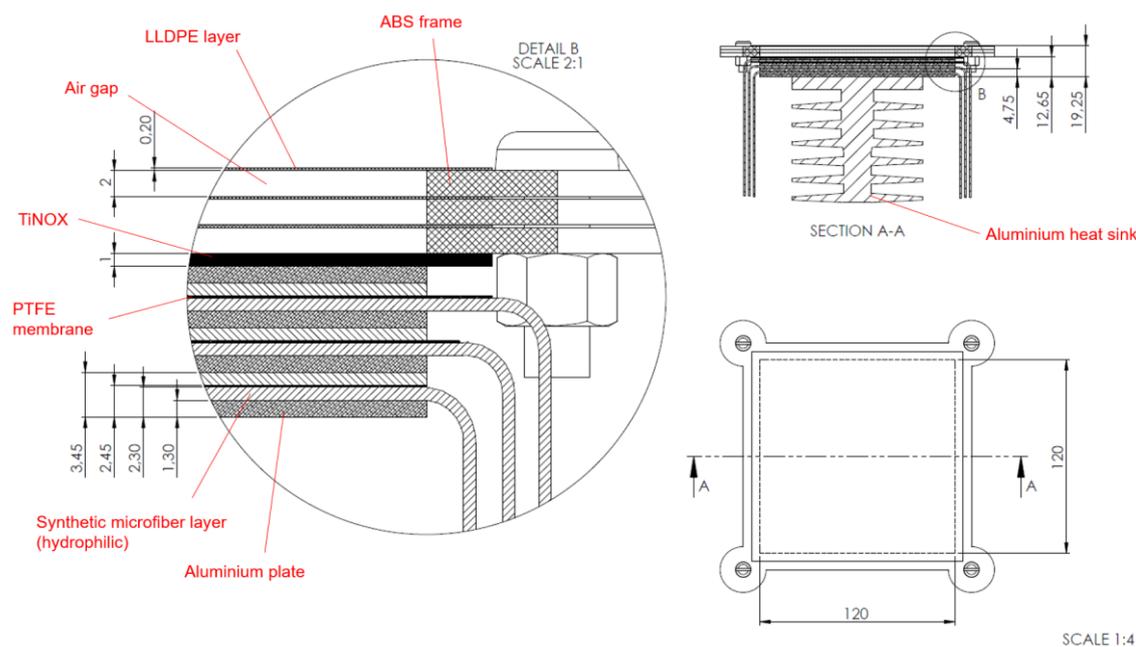


Figura 3. 6 - Disegno tecnico della prima versione del dissalatore passivo. 'Immagine presa da [64]

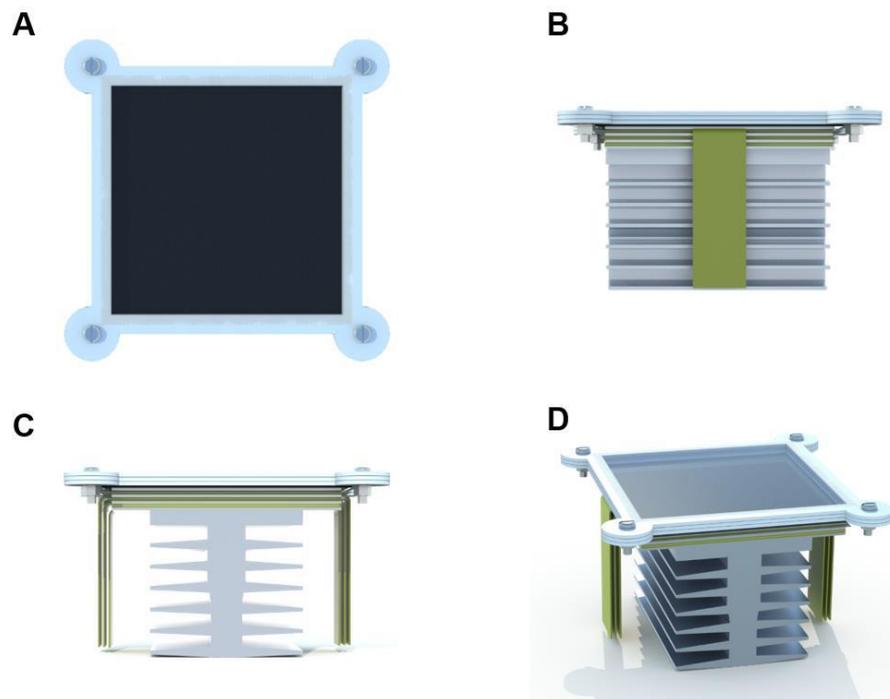


Figura 3. 7 - Modello 3D del desalinatore precedente. Immagine presa da [64]'

3.3.3 Assemblaggio

Dopo aver personalizzato la maggior parte dei componenti bisogna fare particolare attenzione all'assemblaggio delle parti che compongono il dispositivo. Questa sezione ha lo scopo di descrivere in dettaglio la procedura di montaggio, differenziando tra componenti fisse, che una volta montate rimarranno tali, e una mobile che sarà assemblata all'inizio di ogni operazione e smontata alla fine, per consentire le procedure di manutenzione, come il risciacquo delle membrane, o lo svuotamento delle sacche di raccolta. Le due parti andranno ovviamente accoppiate correttamente per sfruttare al meglio la capacità produttiva.

Assemblaggio componenti fissi

Per formare lo strato superiore dell'assorbitore solare, la lastra di alluminio coperta dal TiNOX® deve essere accoppiato alla copertura trasparente. Lo scopo di quest'ultimo non è solo quello di ridurre le dispersioni di calore ma, funge anche da protezione contro il

sale o la polvere che, se depositati sulla superficie del TiNOX® ne ridurrebbero le prestazioni. Le gocce d'acqua della condensa non influenzano la trasmittanza della copertura trasparente, tuttavia il dispositivo è progettato in modo tale che questa non sia direttamente a contatto con il TiNOX®. L'accoppiamento è effettuato tramite l'interposizione di una cornice di gomma sul perimetro del TiNOX® ed il fissaggio per mezzo di otto bulloni M5, come mostrato in figura 3.8a.

Successivamente, evaporatori e condensatori sono stati realizzati fissando le membrane idrofile sulle lastre di alluminio, per evitare che il sale dell'acqua marina corrodese le lastre metalliche si è pensato di ricoprire l'intera superficie con uno strato sottile di pellicola trasparente LDPE, incollato ad esse tramite nastro biadesivo, come mostrato in figura 3.8b.

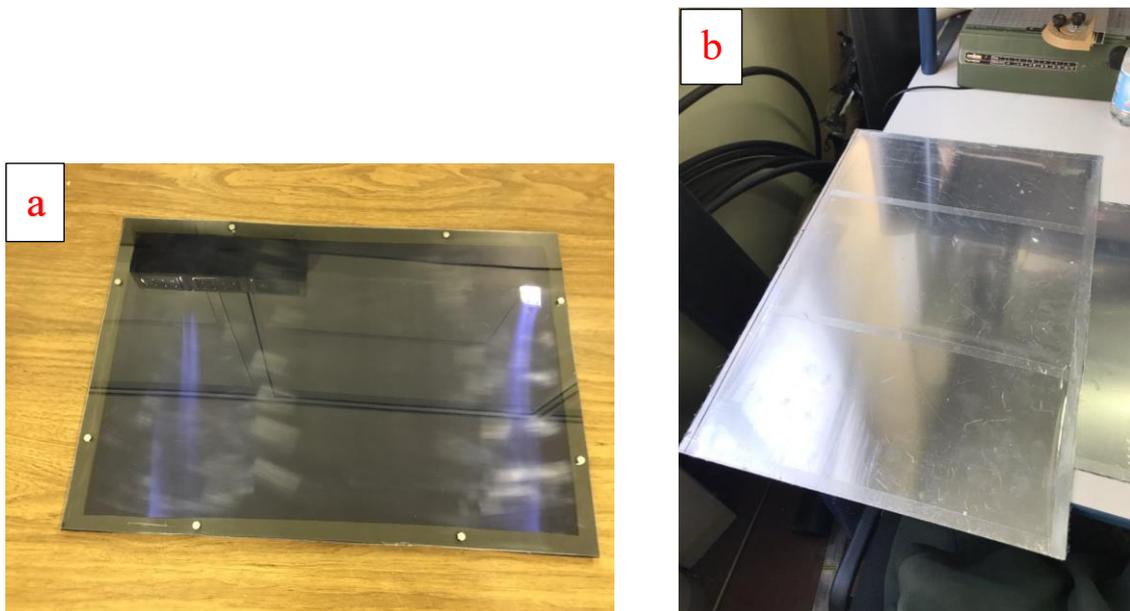


Figura 3. 8 - a) Assorbitore solare; b) Lastra di alluminio

La procedura è svolta cercando di appiattire il più possibile lo strato in LDPE in modo da poter considerare trascurabili le perdite termiche attraverso le intercapedini con la lastra di alluminio. La pellicola LDPE è estremamente sottile, dell'ordine di $10 \mu\text{m}$, con una conducibilità termica bassa (circa $0,33 \text{ W/mK}$ a 20°C [72]), di conseguenza il calore scambiato incontrerà una resistenza trascurabile attraversando la pellicola.

Ogni dispositivo necessita di tre lastre di alluminio, la prima accoglie solo l'evaporatore, quella intermedia contiene l'evaporatore da un lato e condensatore dall'altro, infine la

lastra posta in fondo accoglie solo il condensatore. L'orientamento degli evaporatori è sempre rivolto verso il basso, mentre i condensatori sempre verso l'alto, vedere fig. 3.9. Le membrane sono state fissate sulle lastre di alluminio con nastro biadesivo e silicone, cercando di stenderle al meglio onde evitare di aumentare la resistenza termica attraverso eventuali intercapedini. Per evitare che la sovrapposizione degli strati possa chiudere a pacco il dispositivo, sono state incollati dei frame in gomma sul perimetro delle lastre, in questo modo, da una parte si mantiene il gap tra le membrane idrofile consentendo il ciclo completo di evaporazione/condensazione alla pressione ambiente, dall'altra si riducono al minimo le dispersioni termiche laterali.



Figura 3. 9 - Evaporatore (sinistra); Condensatore (destra)

Altri accoppiamenti riguardano i supporti in compensato, i quali si avvitano con l'ultimo stadio del dispositivo; il fissaggio dei fogli di alluminio per proteggere le strisce di alimentazione sporgenti dall'evaporatore; accoppiamento delle sacche di raccolta

dell'acqua distillata con la membrana idrofila sporgente dei condensatori. Queste ultime aderiscono al loro interno con la copertura di plastica dei condensatori mediante strisce di nastro biadesivo, figura 3.10a.

Il nastro di alluminio protettivo è stato realizzando unendo due strisce di sezione più piccole 3.10b, in seguito è stato fissato sulla parte superiore del primo evaporatore come protezione da un'eventuale evaporazione indesiderata all'esterno del sistema. Questo fenomeno infatti, non solo causerebbe una dispersione del flusso di vapore acqueo ma aumenterebbe la concentrazione salina dell'acqua residua, riducendo la produttività del sistema.

Infine, nella superficie inferiore sono stati eseguiti quattro fori agli angoli del pannello per l'avvitamento dei quattro supporti in compensato mediante bulloni di acciaio austenitico A2-70, come rappresentato in figura 3.10c. Questa soluzione permette di imporre la pendenza desiderata per il corretto funzionamento, allo stesso tempo, conferisce robustezza e leggerezza al dispositivo, senza tralasciare l'impatto economico molto basso. Inoltre, sono facilmente rimovibili e trasportabili separatamente. La superficie inferiore del pannello è lasciata a contatto con l'aria aperta, funzionando come dissipatore di calore. Questa soluzione permette di avere uno scambio convettivo migliore, un flusso di vapore più elevato e quindi una produttività migliore.

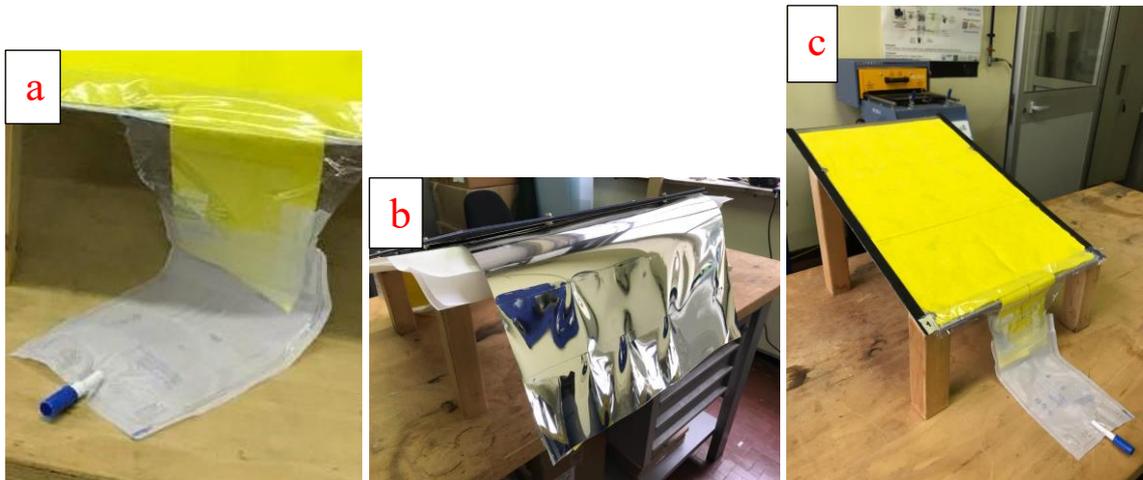


Figura 3. 10 - a) Sacche acqua distillata; b) Schermatura in alluminio; c) Supporti in compensato

Assemblaggio componenti rimovibili

Una volta assemblati i componenti fissi è necessario disporli nella maniera corretta, si tratta di un'operazione molto semplice e rapida ma allo stesso tempo fondamentale per garantire un alto rendimento del sistema. Le operazioni di montaggio e smontaggio dovranno essere ripetute ogni volta che il dispositivo viene messo in funzione.

Il primo strato è composto dal condensatore, posizionato sui supporti e rivolto verso l'alto, su di esso si colloca la prima membrana idrofobica mantenendola stesa per evitare la formazione di vuoti d'aria. Le membrane PTFE sono idrofobiche solo da un lato, bisogna quindi fare attenzione ad orientarla in maniera corretta, inoltre essendo molto delicata bisogna maneggiarla con molta cura ed evitare di forarla, ciò permetterebbe all'acqua di oltrepassare lo strato idrofobo e contaminare l'acqua dolce. Successivamente va posizionato il pannello intermedio, costituito da un lato evaporatore rivolto verso il basso e un lato condensatore rivolto verso l'alto. Sopra ogni condensatore va sempre stesa una membrana idrofobica, infine, lo stadio più in alto è costituito dal pannello evaporatore (ancora rivolto verso il basso). Sulla superficie opposta del pannello va poggiato l'assorbitore solare (fig. 3.8a) descritto in precedenza.

La figura 3.11 mostra in dettaglio la stratigrafia di uno stadio, i successivi sono ricavabili dalla ripetizione in serie di quello rappresentato.

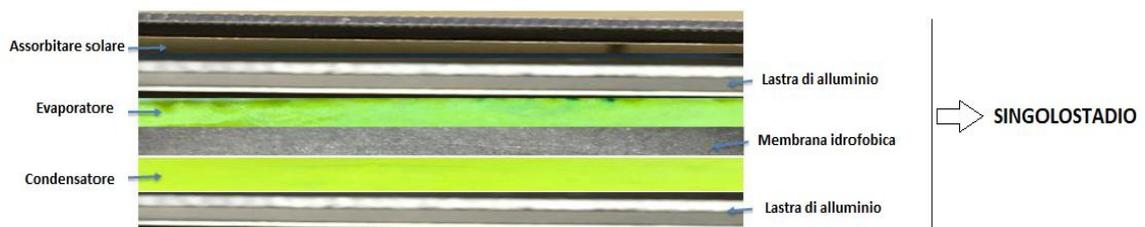


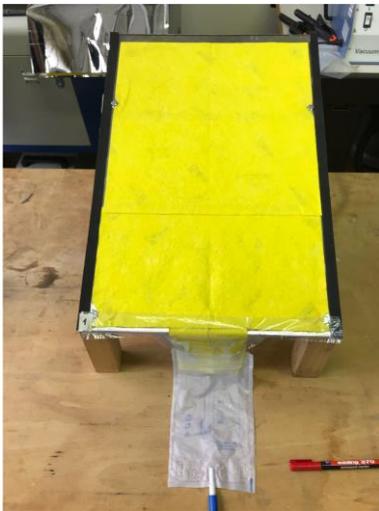
Figura 3. 11 - Stratigrafia del dissalatore

Infine, il dispositivo andrebbe accoppiato con i rispettivi bacini, di alimentazione a monte e di acqua salmastra a valle. Un accorgimento importante è quello di ricoprire il bacino di alimentazione con alcuni fogli riflettenti al fine di evitare la libera evaporazione dell'acqua nell'ambiente, ciò difatti aumenterebbe la concentrazione salina dell'acqua di alimentazione rimasta, riducendo così la produttività del distillatore.

Il dissalatore sviluppato ha una resa ($RE = \text{recovery efficiency}$) pari a 5, ciò significa che necessita di 5 litri/giorno di acqua salata di alimentazione per riuscire a produrre 1 litro/giorno di acqua distillata. L'operatore dedicato dovrà quindi assicurarsi che il bacino di alimento sia riempito della quantità richiesta.

Guida d'istruzioni illustrata

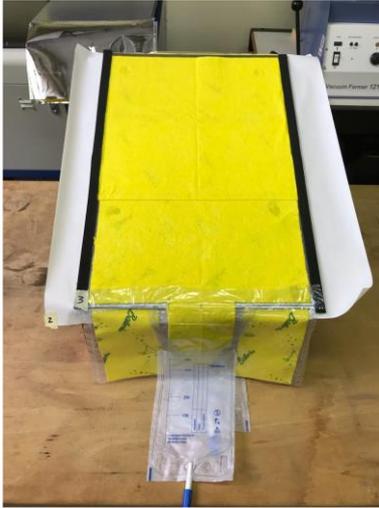
Di seguito è illustrata la sequenza delle operazioni da seguire per l'assemblaggio dei componenti mobili del dissalatore:



1°) Primo condensatore, è lo strato inferiore accoppiato ai supporti, va orientato posizionando la membrana idrofila verso l'alto;



2°) Posizionamento della membrana idrofobica sul condensatore, stendere accuratamente dal lato corretto e senza increspature;



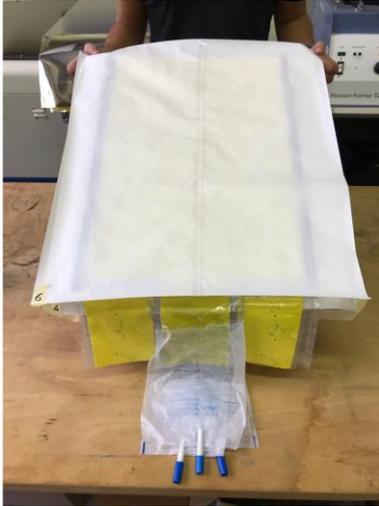
3°) Il pannello a doppia faccia va posizionato orientando il lato evaporatore in basso, lato condensatore verso l'alto cercando di non comprimere troppo la membrana sottostante;



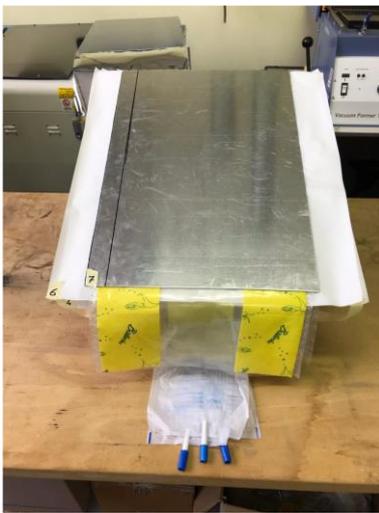
4°) Seconda membrana idrofobica, vedere punto 2°);



5°) Secondo pannello a doppia faccia, seguire le istruzioni al punto 3°);



6°) Terza membrana idrofobica, vedi punto 2°);



7°) Terzo evaporatore posizionato verso il basso, il lato in alluminio va posto libero verso l'alto;



8°) Assorbitore solare va poggiato sulla lastra di alluminio con la superficie trasparente verso l'alto, mantenere il più pulito possibile il pannello;

Per facilitare le operazioni di montaggio sono stati incollati degli adesivi contenenti la sequenza da seguire, il numero posto nell'angolo in basso a sinistra va sempre rivolto

verso l'alto, di seguito si mostrano due immagini rappresentanti l'insieme in vista isometrica e laterale sinistra:



Figura 3. 12 - Dissalatore completamente assemblato nelle viste isometrica (sx) e laterale (dx)

Per beneficiare delle prestazioni ottimali bisognerebbe posizionare il distillatore su una superficie piana con una buona esposizione al sole.

3.3.4 Requisiti del dissalatore

Come discusso nelle sezioni precedenti, la fase di progettazione è stata affrontata tenendo in considerazione i criteri imposti dall'OHDC, sia per partecipare alla competizione sia per assicurare attrazione al dispositivo.

Come approfondimento di quanto accennato nel paragrafo 3.2.1, in questa sezione saranno analizzate nel dettaglio le linee guida imposte dal contest e come il prototipo realizzato soddisfi tali richieste.

1. Low cost

Trattandosi di un dissalatore passivo i costi operativi sono trascurabili, le sole spese che si potrebbero tenere in considerazione riguardano la manodopera necessaria per assemblare il dispositivo e riempire il bacino di acqua di alimentazione, in ogni caso si

tratta di procedure estremamente semplici. Il costo del prototipo può essere associato a quello delle materie prime acquistate in quanto, anche la realizzazione dei singoli componenti ha richiesto operazioni molto semplici con attrezzi spesso molto comuni. La scelta delle materie prime è stata fatta con molta cura per rispondere al meglio al fattore economico, la tabella 3.1 mostra il costo stimato dell'intero dispositivo. I prezzi di riferimento sono stati presi da cataloghi di un fornitore all'ingrosso, vale a dire Alibaba, e ipotizzando di effettuare grandi ordini di materiale.

	Costo Unitario	Quantità	Costo Totale
Membrane idrofilie	0.65 \$/m ²	1.50 m ²	0.98 \$
Buste di plastica	1.80 \$/kg	0.15 kg	0.27 \$
Lastra di alluminio	2.00 \$/m ²	0.85 m ²	1.70 \$
Pannello TiNOX®	5.00 \$/m ²	0.25 m ²	1.25 \$
Cover trasparente	1.76 \$/m ²	0.25 m ²	0.44 \$
Membrane idrofobe	1.00 \$/m ²	0.76 m ²	0.76 \$
Nastro adesivo di alluminio	0.50 \$/m ²	0.10 m ²	0.05 \$
Cordoli di gomma	0.07 \$/m ²	4.48m ²	0.31 \$
Supporti inclinati	0.12 \$/m	1.55 m ²	0.18 \$
Cateteri	0.11 \$/pz	3 pezzi	0.33 \$
Bulloni M5	0.001 \$/pz	14 pezzi	0.01 \$
Totale	/	/	6.28 \$

Tabella 3. 1 - Stima del costo per singolo dispositivo. 'Tabella presa da [65]'

La tabella 3.1 fa riferimento all'acquisto di alcuni componenti già lavorati, se andassimo a considerare il costo delle specifiche materie prime tralasciando la forza lavoro e l'attrezzatura necessaria alla realizzazione otteniamo la tabella 3.2.

	Materiale	Costo Unitario [\$/ <i>kg</i>]	Quantità [\$/ <i>kg</i>]	Costo Totale [\$]
Membrane idrofili	Microfibra	1.50	0.35	0.53
Buste di plastica	PP	0.60	0.20	0.12
Lastra di alluminio	Alluminio	0.99	1.70	1.68
Pannello TiNOX®	Alluminio + TiNOX®	/	0.35	1.26
Cover trasparente	PMMA	0.55	0.73	0.40
Membrane idrofobe	PTFE	7.00	0.05	0.36
Nastro adesivo di alluminio	Alluminio + adesivo acrilico	/	0.01	0.03
Cordoli di gomma	Elastomero	0.40	0.10	0.04
Supporti inclinati	Compensato	0.08	0.75	0.06
Cateteri	Plastica e silicone	/	0.05	0.33
Bulloni M5	Acciaio A2-70	/	0.10	0.01
Totale	/	/	/	4.82

Tabella 3. 2 - Stima del costo del dispositivo in funzione del peso. 'Tabella presa da [65]'

Il costo complessivo della realizzazione del dissalatore è di circa 6.28 \$, molto vicino al costo delle singole materie prime di 4.82 \$. Il dispositivo in questione riesce a produrre in media 1 L/giorno di acqua distillata, quindi per perseguire l'obiettivo iniziale di 3 l/giorno è necessario far lavorare tre dispositivi in parallelo. Il costo va quindi moltiplicato per il numero di unità in parallelo raggiungendo quota 18.84 \$, o considerando il costo della materia prima 14.46 \$. L'analisi economica effettuata non tiene conto del costo

dell'acqua salata né del costo dei bacini di raccolta, in quanto considerati componenti separati dal prototipo. Poiché l'obiettivo iniziale era di sostenere una spesa inferiore o uguale a 20 \$, possiamo affermare che la tecnologia in questione rispetta questo limite imposto.

2. Handheld-size

Le dimensioni complessive del dissalatore sono 60x42x3 cm, rispettivamente lunghezza, larghezza e spessore. Il peso totale invece, ammonta a 4.4 kg per ciascun dispositivo, per un totale di 13.3 kg considerando i tre componenti. Tuttavia, il suo utilizzo comporta un piccolo aumento del peso complessivo dovuto all'accumulo di acqua nelle membrane. Sperimentalmente è stato notato che le membrane possono trattenere una massa totale d'acqua pari a 0.70 kg, in questo caso il sistema raggiungerebbe un peso di 5.1 kg, ovvero 15.3 kg complessivi, risultando ancora un carico gestibile da un uomo adulto. Per facilitare il trasporto si potrebbe sviluppare un opportuno design dell'involucro esterno.

3. Easy to use

L'assemblaggio di tutte le parti può essere eseguito in pochi minuti, il peso relativamente basso consente il trasporto anche per lunghe distanze. Il dispositivo è composto da pochi elementi di ricambio per la manutenzione, inoltre è molto facile da avviare e utilizzare. Inoltre, il suo impiego non richiede l'uso di componenti chimici che potrebbero essere tossici per l'ambiente o per l'operatore.

4. Robust

L'assenza di sostanze chimiche, organi mobili o fili, rende il dispositivo difficile da rompere accidentalmente, nella peggiore delle ipotesi si potrebbe stropicciare o addirittura forare una delle membrane idrofobe causando la contaminazione del prodotto. Nelle condizioni di utilizzo è complicato che ciò si verifichi in quanto le membrane idrofobe si trovano in mezzo a due membrane porose morbide, inoltre, la cornice gommata ha anche lo scopo di proteggere il PTFE da strappi accidentali.

Il dissalatore è capace di funzionare anche nel caso che i vari strati venissero montati con un certo disallineamento, la sua composizione garantisce anche una certa resistenza alla corrosione grazie anche all'applicazione della pellicola trasparente in LDPE sulla superficie in alluminio dell'evaporatore. Al fine di garantire lunga vita al dispositivo si è pensato di progettarlo con sole otto superfici distinte abbastanza grandi da garantire solidità e allo stesso tempo praticità nel trasporto, senza il rischio di perdere componenti ausiliari che ne comprometterebbero il funzionamento.

5. Easily transportable

Di questa proprietà se ne è ampiamente discusso in precedenza, il sistema prima dell'utilizzo pesa complessivamente 13.3 kg (tre dispositivi), l'acqua comporta un basso aumento del peso complessivo senza però comprometterne la praticità nel trasporto. Un'ulteriore accortezza per facilitarne il trasporto potrebbe essere quella di progettare un involucro ergonomico munito di maniglia.

6. Minimum rate of production

Il prototipo a tre stadi consente di riutilizzare l'energia solare in ogni fase prima di disperderla nell'ambiente, offrendo così un sistema con una superficie ridotta rispetto ad altri sistemi solari tradizionali. Durante la fase di sperimentazione, ogni singola unità ha dimostrato di produrre in media $0.57 L kW/h$, in una città come Muscat, Oman, dove l'irradiazione media mensile ammonta a $199 kWh/m^2$ (dati acquisiti da un software online PVGIS), il dissalatore potrebbe produrre una media di 1.15 litri al giorno di distillato. Nel dettaglio, produrrebbe $0.87 L/giorno$ nel caso peggiore, ovvero aria stagnante, $1.26 L/giorno$ nel caso migliore con poco vento.

Per soddisfare il requisito di $3 L/giorno$ è necessario fare lavorare tre unità in parallelo, sebbene questa soluzione sembrerebbe ingombrante da un lato, dall'altro garantisce il beneficio, in caso di guasto di un dispositivo, di poter lavorare con le altre due unità.

La figura 3.13 mostra la configurazione complessiva delle tre unità.

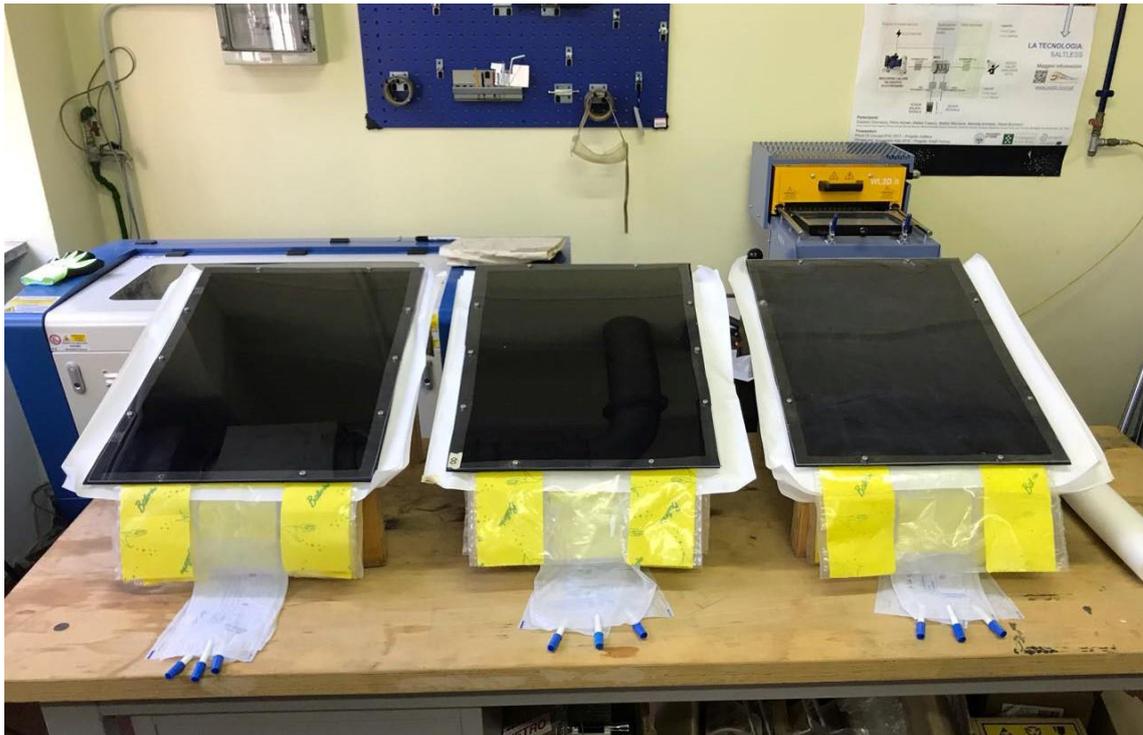


Figura 3. 13 - Configurazione delle tre unità in parallelo

7. Stand-alone

Uno dei vantaggi più grandi di questo sistema è la completa assenza di componenti meccanici o elettronici da azionare, il funzionamento del sistema è garantito dalla presenza del sole. I processi di evaporazione e condensazione sono guidati dall'energia solare termica, questo comporta un grande vantaggio economico ma soprattutto ambientale dal punto di vista dell'inquinamento. Il sistema funziona senza la necessità di un supervisore, tranne per la fase di riempimento del bacino di acqua salata. Per massimizzare le prestazioni si potrebbe tracciare una curva di posizionamento del dispositivo nelle varie fasi della giornata per catturare al meglio i raggi solari.

8. Water quality

La rimozione del sale è un argomento chiave per tutte le tecnologie di distillazione. La maggior parte dei dispositivi di distillazione impiega processi di distillazione termica che garantisce elevate prestazioni. Dagli esperimenti effettuati si ottiene un prodotto con un grado di salinità pari a 0.0 g/L , sebbene il dissalatore sia stato progettato per lavorare con

acqua di mare, è stato dimostrato che può lavorare anche con soluzioni a concentrazione salina maggiore, seppur con un tasso di produzione inferiore di quello di progetto.

La rimozione del sale non rappresenta l'unico requisito necessario per garantire la qualità richiesta, infatti, poiché le membrane idrofobiche permettono solo il passaggio del vapore acqueo, bisogna impedire anche il passaggio delle altre particelle presenti nell'acqua di alimento. Alcuni test eseguiti in laboratorio hanno dimostrato che la torbidità dell'acqua di alimentazione non influenza la qualità del prodotto finale, quindi, non influenza minimamente la scelta della membrana idrofoba. Il test effettuato è rappresentato in figura 3.14.

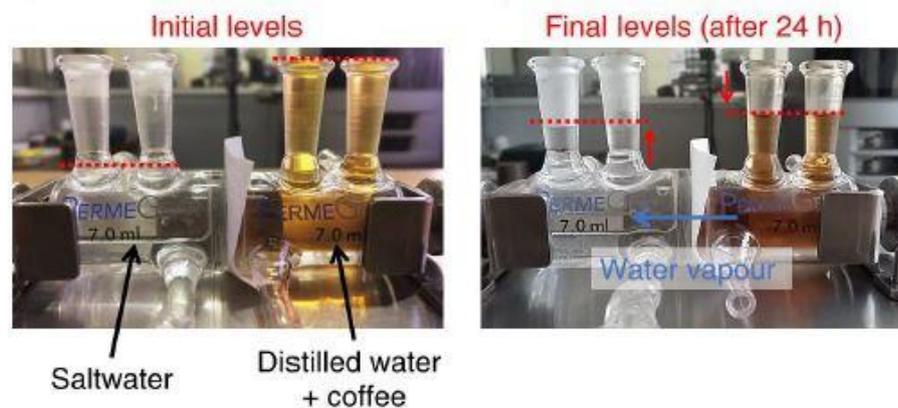


Figura 3. 14 - Test sugli effetti della torbidità sulla scelta della membrana idrofobica

Nella figura a sinistra sono rappresentate due camere contenenti due soluzioni diverse a diversi livelli, una soluzione con acqua di mare a sinistra e una soluzione di acqua distillata più caffè in quella di destra. Le due camere sono separate da una membrana idrofobica in PTFE, come quella utilizzata nel prototipo. Dopo 24 ore, il vapore acqueo della soluzione acqua più caffè ha attraversato la membrana idrofobica per osmosi ma, non è stata osservata alcuna particella di caffè nella soluzione salina, dimostrando così che le particelle solide non riescono a permeare attraverso la membrana. Per quanto riguarda la contaminazione a causa dei batteri valgono le stesse considerazioni, inoltre, le operazioni di rigenerazione che dovrebbero essere eseguite alla fine di ogni giornata e le temperature a cui sono sottoposte le membrane (40°C e 60°C), aiutano a prevenire l'accumulo di particelle e la sterilizzazione parziale dei batteri.

9. Short-term use

Fino a quando la salinità delle membrane idrofile sull'evaporatore viene rigenerata, il dispositivo ha dimostrato di poter funzionare a lungo termine. La rigenerazione delle membrane è fondamentale non solo per ristabilire la giusta tensione di vapore all'interno del sistema, ma anche per impedire la disidratazione delle membrane idrofile a causa del sale. Ciò causerebbe la generazione di un transitorio all'inizio di ogni fase di avviamento, con conseguente riduzione della produttività giornaliera.

3.3.5 Layout sperimentale

In questa sezione verranno analizzati gli strumenti impiegati per definire la configurazione adottata durante la fase sperimentale. Al fine di realizzare la sperimentazione è stato necessario l'utilizzo di alcuni strumenti ausiliari che, una volta connessi al dispositivo permettessero la rilevazione dei parametri oggetto di analisi. Gli esperimenti sono stati attuati principalmente all'aperto a causa della difficoltà nel riprodurre determinate condizioni in laboratorio, tuttavia, alcune prove sono state effettuate anche all'interno della struttura del Politecnico. La configurazione adottata durante la sperimentazione all'aperto è mostrata in figura 3.15.



Figura 3. 15 - Configurazione sperimentale all'aperto

La strumentazione ausiliaria utilizzata nella fase di sperimentazione può essere riassunta nei seguenti elementi e visualizzata nella figura 3.16:

- a) **Laptop:** per l'archiviazione e l'elaborazione dei dati;
- b) **DAQ:** scheda acquisizione dati, per collegare il laptop agli strumenti di misura;
- c) **Termocoppie:** per rilevare il profilo di temperature negli strati del dispositivo;
- d) **Rifrattometro digitale:** misura la concentrazione salina;
- e) **Bilancia digitale:** per la misurazione della massa di distillato;
- f) **Dissalatore:** oggetto di studio;
- g) **Pipetta:** per l'estrazione di campioni d'acqua;
- h) **Lampada al quarzo:** per riprodurre l'irradianza solare;
- i) **Piranometro:** per verificare l'adeguatezza dell'irradiazione emessa dalla lampada





Figura 3. 16 - Strumentazione ausiliaria

Laptop, DAQ e le termocoppie (rispettivamente fig. 3.16(a-b-c)) lavorano in sincronia allo scopo di registrare il profilo di temperatura durante il funzionamento del dispositivo. In particolare, sono state utilizzate sei termocoppie di tipo K composte da NiCr (lega di nichelcromo), quest'ultime sono caratterizzate da una massa termica e da un costo relativamente basso, risultando così particolarmente adatto per le apparecchiature utilizzate. Le termocoppie sfruttano l'effetto termoelettrico del nichel e del cromo per produrre una tensione dipendente dalla temperatura, il segnale viene quindi trasferito ad un sistema di acquisizione dati. In particolare, si tratta di un dispositivo hardware capace di convertire un segnale analogico proveniente dall'ambiente in un segnale digitale elaborabile da un calcolatore.

Nel nostro caso è stato utilizzato un "DAQ TB-9212", montato sul telaio di un "cDAQ-9174". Entrambi gli strumenti sono compatibili a lavorare in serie con il software utilizzato per l'analisi dei dati, chiamato "LabVIEW", in quanto realizzati dalla stessa azienda "National Instrument".

Il rifrattometro digitale, mostrato in figura 3.16d, misura la concentrazione salina ed è stato utilizzato per rilevare la salinità dell'acqua di alimentazione, dell'acqua distillata prodotta, dell'acqua residua nelle membrane (prima e dopo gli esperimenti) e della salamoia. Il dispositivo utilizzato è un "HI96821", prodotto da "FoodCare", e rileva la concentrazione salina mediante l'analisi dell'indice di rifrazione della soluzione. Possiede una risoluzione di 1 g/L e una precisione di ± 0.3 g/L ad una temperatura di 20°C. Per raccogliere i campioni d'acqua si utilizza una pipetta di vetro, fig. 3.16g.

Infine, per misurare la massa del distillato è stata utilizzata una bilancia digitale (fig. 3.16e), nel nostro caso è stata adottata una “PCB 1000-2” prodotta da “KERN”, con una risoluzione di 0.01 g.

Riassumendo, i parametri d’interesse rilevati sono la massa di distillato prodotto, concentrazione salina e temperature del dispositivo. L’irraggiamento solare è un parametro fondamentale da cui dipendono tutte le altre grandezze, quest’ultimo, non è stato rilevato direttamente sul campo per una questione di comodità, in quanto, è stato possibile consultare un software online chiamato “PVGIS” che registra giornalmente i livelli di irradianza solare in molte parti del mondo.

Le considerazioni fatte valgono per i test effettuati all’aperto secondo la configurazione rappresentata in figura 3.15. Tuttavia, in figura 3.16(h-i), sono presenti altri due componenti utilizzati durante la fase di test condotta in laboratorio. In particolare, la fig. 3.16h, mostra una lampada al quarzo “QL-1000” che funziona fino a 1000 W. Con questo elemento si è cercato di replicare la luce solare in un ambiente interno e, mediante un piranometro (fig. 3.16i), si è verificato l’adeguatezza dell’irradiamento emesso dalla lampada. Il piranometro utilizzato è un “LPPYRA08”, questo dispositivo è in grado di misurare l’irradianza globale (somma di irradianza diretta e diffusa) su una superficie piana con una sensibilità di 10 mV/kWm . Questo componente è stato accoppiato in parallelo con lo stesso DAQ collegato alle termocoppie e i suoi dati sono stati elaborati attraverso un codice leggermente diverso in LabVIEW.

La configurazione utilizzata per le prove condotte in laboratorio è mostrata in figura 3.17.



Figura 3. 17 - Configurazione per test in laboratorio

Un'ulteriore differenza tra le due configurazioni riguarda l'uso di tubi di gomma per incanalare l'acqua distillata verso un bacino di raccolta posizionato a valle del dispositivo, solo successivamente questo sistema è stato sostituito dai cateteri, soluzione che si è rivelata più pratica e meno ingombrante.

4. Conclusioni

La carenza d'acqua è un problema di fondamentale importanza che l'umanità si trova ad affrontare, oggigiorno la ricerca si occupa di trovare nuovi metodi per prevenire la siccità in varie regioni del pianeta basandosi principalmente sulla dissalazione dell'acqua. Negli ultimi anni, particolare attenzione è stata rivolta ai meccanismi di dissalazione passiva, ovvero una tecnologia che permette di risolvere due dei più grossi svantaggi della dissalazione, ovvero l'elevato fabbisogno energetico e l'impatto ambientale, derivato sia dallo scarico dell'acqua salmastra sia dalle fonti energetiche sfruttate.

La dissalazione passiva a causa della sua bassa produttività è spesso utilizzata nelle regioni con produzione in scala ridotta, tuttavia, tra questi sistemi il dissalatore solare passivo ad alto rendimento [64] sviluppato al Politecnico di Torino dal gruppo SMaLL guidato dal professor Chiavazzo risulta una tecnologia promettente da utilizzare in larga scala poiché, raggiunge livelli di produttività considerati proibitivi per i sistemi passivi sfruttando esclusivamente fonti rinnovabili come l'energia solare. L'obiettivo di questo lavoro è quindi quello di progettare, realizzare e testare una versione su larga scala di suddetto dispositivo al fine di confermare i risultati ottenuti dal modello teorico e migliorare la configurazione del sistema. La fase di progettazione è stata condotta sulla base di alcune linee guida imposte dalla Oman Humanitarian Desalination Challenge (OHDC), una competizione di livello internazionale che mira a raccogliere idee originali che rispettino determinate caratteristiche come: basso costo, dimensioni ridotte, facilità d'uso, robustezza, facilità di trasporto, produttività minima, qualità del prodotto e possibilità di utilizzo a breve termine. Una volta elaborato un design, le caratteristiche di base del dispositivo e le leggi fisiche che governano il funzionamento, si è cercato di riprodurre un modello 3D su una piattaforma di modellazione CAD, precisamente COMSOL Multiphysics®. Nel corso dell'elaborato sono stati discussi i punti chiave che differenziano questo prototipo dal suo predecessore, in particolare le dimensioni del dispositivo, a causa di queste modifiche i risultati ottenuti risultano leggermente sotto le capacità produttive mostrate dalla vecchia versione, tuttavia i livelli di produttività risultano di alto livello specialmente considerando che la simulazione è stata condotta simulando una radiazione solare di 650 W/m^2 , numericamente si potrebbe ottenere un

fattore di produttività più elevato esponendo il sistema ad una fonte di alimentazione più intensa come si verificherebbe in un test pratico in Oman ad esempio.

Una volta ottenuti risultati attendibili si è proceduto alla fase di messa in opera del dispositivo. La realizzazione fisica del prototipo a 3 stadi passa dall'attenta scelta dei materiali low cost da utilizzare e dalla combinazione smart di questi ultimi allo scopo di rientrare nella caratteristica di economicità richiesta dalla OHDC.

Il capitolo 3. dell'elaborato è interamente dedicato alla realizzazione, in ogni suo dettaglio del prototipo. Le caratteristiche dei materiali scelti, la realizzazione delle sezioni necessarie e una dettagliata descrizione delle operazioni di montaggio e manutenzione da eseguire durante il periodo di test.

Alcune funzionalità del dispositivo potrebbero ancora essere ottimizzate cercando di mantenere le caratteristiche richieste per garantire la competitività del distillatore, un esempio potrebbe essere studiare lo spessore del gap tra l'evaporatore e la membrana idrofoba, al fine di trovare una configurazione ottimale per le diverse condizioni di lavoro a cui può essere soggetto il dispositivo. La fase relativa ai test sul campo potrà suggerire ulteriori informazioni dal punto di vista dell'ottimizzazione e dell'ergonomia del sistema, risultati che andrebbero analizzati al fine di incrementare la produttività del dispositivo senza aumento del costo. Infine, potrebbe risultare interessante realizzare un dispositivo a più di 3 stadi per validare le previsioni stimate dal modello numerico, gli svantaggi apportati dall'aumento di dimensioni e di peso potrebbero essere giustificati da una maggior efficienza anche in prospettiva di applicazioni leggermente differenti.

Lista Figure

Figura 1. 1 - Carenza d'acqua potabile in scala globale. ‘Immagine presa da [5]’	4
Figura 1. 2 - Carenza fisica ed economica globale. ‘Immagine presa da [4]’	4
Figura 1. 3 - Distribuzione dell'acqua sulla Terra. ‘Immagine presa da [11]’	6
Figura 1. 4 - Schema di un generico impianto di dissalazione	9
Figura 1. 5 - Tecniche associate a fonti rinnovabili. ‘Immagine presa da [21]’	9
Figura 1. 6 - Panoramica dei sistemi di dissalazione solare. ‘Immagine presa da [28]’ ..	10
Figura 1. 7 - Schema impianto MSF. ‘Immagine presa da [28]’	13
Figura 1. 8 - Schema di un impianto MED. ‘Immagine presa da [28]’	14
Figura 1. 9 - Schema di un impianto VC (MVC e TVC). ‘Immagine presa da [28]’	16
Figura 1. 10 - Schema impianto RO. ‘Immagine presa da [28]’	17
Figura 1. 11 - Schema di un impianto ED. ‘Immagine presa da [28]’	18
Figura 1. 12 - Schema di un impianto MD. ‘Immagine presa da [41]’	20
Figura 1. 13 - a) DCMD; b) AGMD; c) VMD. ‘Immagine presa da [46]’	23
Figura 1. 14 - a) Stadio singolo; b) Accoppiamento con collettore; c) Accoppiamento con condensatore; d) Dispositivo Multistadio. ‘Immagine presa da [41]’	25
Figura 1. 15 - A) Evaporazione tradizionale per contatto diretto; B) Soluzione 2D di Li et al. ‘Immagine presa da [59]’	27
Figura 1. 16 - Generatore di vapore. ‘Immagine presa da [59]’	27
Figura 1. 17 - Confronto tra configurazione MD vs NESMD. ‘Immagine presa da [61]’	29
Figura 1. 18 - a) ISS; b) FSS; c) Dettaglio costruttivo dell'FSS. ‘Immagine presa da [62]’	30
Figura 1. 19 - Diffusione dei sistemi indiretti con il solare. ‘Immagine presa da [63]’ ..	31
Figura 2. 1 - Schema assemblaggio del dispositivo. ‘Immagine presa da [65]’	36
Figura 2. 2 - Principio di funzionamento del singolo stadio. ‘Immagine presa da [64]’	37
Figura 2. 3 - Circuito termico equivalente monodimensionale. ‘Immagine presa da [64]’	43
Figura 2. 4 - Vista ortogonale (in alto), Zoom sul multistrato (in basso).....	45
Figura 2. 5 – Mesh completa (in alto); Dettaglio mesh (in basso).....	50

Figura 2. 6 – Iterazioni solutore non lineare.....	51
Figura 2. 7 - Distribuzione di temperatura tra gli stadi; Rappresentazione delle dissipazioni termiche.....	53
Figura 2. 8 - Distribuzione di acqua distillata sulle superfici superiore (sx) e inferiore (dx). 'Immagine presa da [65]'.....	54
Figura 2. 9 - Flusso di vapore acqueo al bordo d'uscita delle tre membrane idrofobe. 'Immagine presa da [65]'.....	54
Figura 2. 10 - Distribuzione di temperatura 3D.....	55
Figura 2. 11 - Profilo di temperatura lungo l'altezza del dispositivo	56
Figura 2. 12 - Profilo di temperatura nell'evaporatore	57
Figura 3. 1 - Componenti utilizzati per lo sviluppo del prototipo.....	64
Figura 3. 2 - Schizzo di evaporatore (sinistra) e condensatore (destra). 'Immagine presa da [65]'	64
Figura 3. 3 - a) protezione evaporatore; b) protezione condensatore; c) MACOM VAC2060.....	65
Figura 3. 4 - Tassello M6 inserito nel supporto	65
Figura 3. 5 - Catetere di raccolta acqua distillata.....	66
Figura 3. 6 - Disegno tecnico della prima versione del dissalatore passivo. 'Immagine presa da [64]'.....	67
Figura 3. 7 - Modello 3D del desalinatore precedente. Immagine presa da [64]'	68
Figura 3. 8 - a) Assorbitore solare; b) Lastra di alluminio	69
Figura 3. 9 - Evaporatore (sinistra); Condensatore (destra)	70
Figura 3. 10 - a) Sacche acqua distillata; b) Schermatura in alluminio; c) Supporti in compensato	71
Figura 3. 11 - Stratigrafia del dissalatore	72
Figura 3. 12 - Dissalatore completamente assemblato nelle viste isometrica (sx) e laterale (dx)	76
Figura 3. 13 - Configurazione delle tre unità in parallelo	81
Figura 3. 14 - Test sugli effetti della torbidità sulla scelta della membrana idrofobica..	82
Figura 3. 15 - Configurazione sperimentale all'aperto	83
Figura 3. 16 - Strumentazione ausiliaria.....	85

Figura 3. 17 - Configurazione per test in laboratorio87

Riferimenti

- [1] R. Reitano, «Water harvesting and water collection system in Mediterranean sea. The case of Malta,» *Procedia Engineering*, pp. 81-88, 2011.
- [2] S. M. M. A. C. R. S. Y. K. Colin P. Kelley, «Climate change in the fertile crescent and implications of the recent syrian drought,» *Proceedings of the National Academy of Sciences*, pp. 112(11):3241-3246, 2015.
- [3] P. R. a. L. S. Rutger Willem Hofste, «Wri: 17 countries,home to one-quarter of the world's population, face extremely high water stress,» Aug 2019. [Online]. Available: <https://www.wri.org/blog/2019/08/17-countries-home-one-quarter-worldpopulation-face-extremely-high-water-stress>.
- [4] WWAP (WorldWater Assessment Programme), «Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk,» *The United Nations World Water Development*, Vol. %1 di %2United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, France, 2012.
- [5] CONOU, «La scarsità d'acqua è il problema più grave che abbiamo,» Feb 2016. [Online]. Available: <http://www.rinnovabili.it/ambiente/scarsita-acqua-problema-grave-333/>. [Consultato il giorno 29 Feb 2020].
- [6] R. B. a. U. A. David Seckler, «Water scarcity in the,» *International Journal of Water Resources Development*, pp. 15(1-2):29-42, 1999.
- [7] Malin Falkenmark, Anders Berntell, Anders Jägerskog, Jan Lundqvist, Manfred Matz, Hakan Tropp, «On the verge of a new water scarcity: a call for good governance and human ingenuity,» *Stockholm International Water Institute (SIWI)*, 2007.
- [8] J. L. a. C. W. Malin Falkenmark, «Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: Aspects of vulnerability in semi-arid development.,» *Natural resources forum*, vol. 13, pp. 258-267, 1989.

- [9] D. A. E. B. K. B. S. C. A. C. C. D. S. F. O. D. H. S. K. Brian D Richter, «Tapped out: how can cities secure their water future?,» *Water Policy*, pp. 15(3):335-363, 2013.
- [10] WWF, «worldwildlife,» 2020. [Online]. Available: <https://www.worldwildlife.org/threats/water-scarcity>.
- [11] I. A. Shiklomanov., «Water in crisis: A guide to the world's fresh water resources,» 1993.
- [12] I. A. Shiklomanov, «The world's water resources,» *International symposium to commemorate the*, vol. 25, pp. 93 - 105, 1991.
- [13] FAO, «Review of World Water Resources by Country,» vol. 23, 2003.
- [14] J. J. Gurdak, «Groundwater: Climate-induced pumping,» *Nature Geoscience*, p. 10(2):71, 2017.
- [15] X. J. C. S. N. L. P. G. T. M. C. D. Kuai Fang, «Combining a land surface model with groundwater model calibration to assess the impacts of groundwater pumping in a mountainous desert basin,» *Advances in Water Resources*, pp. 130:12-28, 2019.
- [16] J. R. P. I. C. K. Y. Iman Janghorban Esfahani, «Efficient thermal desalination technologies with renewable energy systems: A state of the art review,» *Korean Journal of Chemical Engineering*, pp. 33(2):351-387, 2016.
- [17] N. Voutchkov, «Desalination: Past, Present and Future,» *International Water Association*, 2017.
- [18] S. Roth, «California's last resort: Drink the pacific,» *Desert Sun*, 2015.
- [19] J. W. Wei He, «Feasibility study of energy storage by concentrating/desalinating water: Concentrated water energy storage,» *Applied energy*, pp. 185:872-884, 2017.
- [20] E. R. E. B.-Z. Hila Frank, «Short term effects of swro desalination brine on benthic heterotrophic microbial communities,» *Desalination*, pp. 417:52-59, 2017.
- [21] M. G. R. Ihsan Ullah, «Recent developments in solar thermal desalination technologies: A review,» *Energies*, p. 12(1):119, 2019.

- [22] S. Gottelier, «A desalination boom in California could help it deal with 'exceptional' drought,» *The Guardian*, 2014.
- [23] J. Lindblom, «Solar thermal technologies for seawater desalination: state of the art,» *Lulea tekniska universitet*, 2003.
- [24] R. A.-D. S. M. P.G. Youssef, «Comparative analysis of desalination technologies,» *Energy Procedia*, pp. 61:2604-2607, 2014.
- [25] T. Y. C. A. P. R. M. R. J. O. L. J. E. D. Pei Xu, «Critical review of desalination concentrate management, treatment and beneficial use,» *Environmental Engineering Science*, pp. 30(8):502-514, 2013.
- [26] M. L. L. Pinar Cay-Durgun, «Nanoporous materials in polymeric membranes for desalination,» *Current opinion in chemical engineering*, pp. 20:19-27, 2018.
- [27] A. D. M. E. Jay R. Werber, «The critical need for increased selectivity, not increased water permeability, for desalination membranes,» *Environmental Science & Technology Letters*, pp. 3(4):112-120, 2016.
- [28] L. L. K. Ali Al-Karaghoul, «Energy consumption and water production cost of conventional and renewable energy powered desalination processes,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 24:343-356, 2013.
- [29] O. A.-J. M.S. Mohsen, «Brackish water desalination: an alternative for water supply enhancement in Jordan,» *Desalination*, pp. 163-174, 1999.
- [30] M. K. R. J. E. J. T. M. J. M. A. M. G.-e. H. H. V. T. Ruh Ullah, «Desalination,» pp. 433:56-67, 2018.
- [31] S. P. Karagiannis IC, «Water desalination cost literature: review and assessment,» *Desalination*, p. 233, 2008.
- [32] F. H. A. Z. K. A. Mezher T, «Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies,» *Desalination*, p. 266, 2011.

- [33] D. K. Manjula Nair, «Water desalination and challenges, the middle east perspective: a review,» *Desalination and Water Treatment*, pp. 51(10-12):2030-2040, 2013.
- [34] S. R., «Energy issues in desalination processes,» *Environmental Science and Technology*, p. 42(22), 2008.
- [35] M. A. X. D. C. Mohammad Shafiur Rahman, «Freezing melting process and desalination: I. Review of the state-of-the-art.,» *Separation & Purification Reviews*, pp. 35(02):59-96, 2006.
- [36] J. Miller, «Review of water resources and desalination technologies,» *Sandia Laboratories*, 2003.
- [37] W. L. M. O. A. I. P.S. Goh, «Membrane fouling in desalination and its mitigation strategies,» *Desalination*, pp. 425:130-155, 2018.
- [38] R. D. K. L. Al-Karaghoul A., «Technical and economic assessment of photovoltaic-direct desalination systems.,» *Renewable Energy*, pp. 35:323-8, 2010.
- [39] H. W. S. K. H. Strathmann, «Electrodialysis in membrane handbook,» 1992.
- [40] M. H. N. Robert A. Johnson, «Understanding membrane distillation and osmotic distillation,» *John Wiley & Sons*, 2017.
- [41] Y. G. E. S. Chennan Li, «Solar assisted sea water desalination,» *A review: Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 19:136-163, 2013.
- [42] P. S. T. V. M. W. M. D. Angela Hausmann, «Integration of membrane distillation into heat paths of industrial processes,» *Chemical engineering journal*, pp. 211:378-387, 2012.
- [43] C.-D. H. Tsung-Ching Chen, «Immediate assisted solar direct contact membrane distillation in saline water desalination,» *Journal of Membrane Science*, pp. 358(1-2):122-130, 2010.
- [44] C. C. C. L. E. F. Deisy Lizeth Mejia Mendez, «Improved performances of vacuum membrane distillation for desalination applications: Materials vs process engineering potentialities,» *Desalination*, pp. 452:208-218, 2019.

- [45] N. L. Abdulaziz M. Alklaibi, «Membrane-distillation desalination: status and potential,» *Desalination*, pp. 171(2):111-131, 2005.
- [46] H. A. A. J. H. L. V. Edward K. Summers, «Energy efficiency comparison of single-stage membrane distillation (MD) desalination cycles in different configurations,» *Desalination*, pp. 290:54-66, 2012.
- [47] I. S. W. K. M. P. A. L. S. Cerneaux, «Comparison of various membrane distillation methods for desalination using hydrophobic ceramic membranes,» *Journal Membrane Science*, pp. 337:55-60, 2009.
- [48] K. S. B. Li, «Novel membrane and device for vacuum membrane distillation based desalination process,» *Journal Membrane Science*, pp. 257:60-75, 2005.
- [49] V. A. A. C. T.Y. Cath, «Experimental study of desalination using direct contact membrane distillation: a new approach to flux enhancement,» *Journal Membrane Science*, pp. 228:5-16, 2004.
- [50] D. Mishra, «Desalination for cost-effective water production,» *Advisian Worley Group*, 2017.
- [51] M. A.-K. Al-Sofi, «Fouling phenomena in multi stage flash distillers,» *Desaliantion*, pp. 126(1-3):61-76, 1999.
- [52] S. K. G. K. RM. Garud, «A short review on process and applications of reverse osmosis,» *Universsal Journal of Environmental Research & Technology*, p. 1(3), 2011.
- [53] A. B. R. A. F. Valero, «Electrodialysis technology theory and applications,» *Desalination, trends and technologies*, 2011.
- [54] K. Westerlig, «The benefits of electrodialysis for desalination,» 2015.
- [55] M. T. J. P. Z. B. K. N. GJ Doornbusch, «Experimental investigation of multistage eletrodialysis for seawater desalination,» *Desalination*, pp. 464:105-114, 2019.

- [56] G. M. Andrea Cipollina, «Coupling sustainable energy with membrane distillation processes for seawater desalination,» *In 2010 1st Internationale Nuclear & Renewable Energy Conference (INREC)*, pp. 1-6, 2010.
- [57] J. N. A. M. G. S. A.-S. Hasan Mousa, «Experimental study and analysis of solar still desalination using phase change materials,» *Journal of Energy Storage*, 2019.
- [58] L. M. George M. Ayoub, «Developments in solar still desalination systems: A critical review,» *Critical reviews in environmental science and technology*, pp. 42(19):2078-2112, 2012.
- [59] W. X. M. T. L. Z. B. Z. S. Z. J. Z. Xiuqiang Li, «Graphene oxide-based efficient and scalable solar desalination under one sun with a confined 2D water path,» *Proceedings of the National Academy of Science*, pp. 113(49):13953-13958, 2016.
- [60] M. I. V. G. L. Martinez Diez, «Temperature and concentration in membrane distillation of aqueous salt solutions,» *Journal of membrane science*, pp. 156(2):265-273, 1999.
- [61] A. A. S. P. K. R. Z. N. J. H. O. N. J. W. T. W. A. D. M. E. Pratiksha D. Dongare, «Nanophotonics-enabled solar membrane distillation for off-grid water purification,» *Proceedings of the National Academy of Sciences*, pp. 114(27):6936-6941, 2017.
- [62] S. W. S. R. J. Z. H. J. M. A. K. H. L. J. Z. N. Y. Guilong Peng, «A compact flat solar still with high performance,» *arXiv*, 2020.
- [63] P. R. A. M. T. A. Hassan E.S. Fath, «A comprehensive technoeconomical review of indirect solar desalination,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 4187-4199, 2011.
- [64] M. M. F. V. M. F. P. A. Eliodoro Chiavazzo, «Passive solar high-yield seawater desalination by modular and low-cost distillation,» *Nature Sustainability*, p. 1(12):763, 2018.
- [65] G. Baiamonte, «Scale- up of a solar-driven modular desalination device for remote areas,» *Master's degree thesis*, 2019.

- [66] J. M. P. J. P. O. Bruce E. Poling, «The properties of gases liquids,» *Mcgraw-hill*, vol. 5, 2001.
- [67] Y. R. Z. W. F. A. & L. J. Yun, «Direct contact membrane distillation mechanism for high concentration NaCl solutions.,» *Desalination 188*, pp. 251-262, 2006.
- [68] T. M. Mohamed Khayet, «Membrane distillation: principles and applications,» *Elsevier*, 2011.
- [69] D. R. L. Kevin W. Lawson, «Membrane distillation,» *Journal of membrane Science*, pp. 124(1):1-25, 1997.
- [70] P. H. Gleick, «Basic water requirements for human activities: meeting basic needs,» *water international*, pp. 21(2):82-92, 1996.
- [71] F. Edition, «Guidelines for drinking water quality,» *WHO chronicle*, pp. 38(4):104-8, 2011.
- [72] GoodFellow. [Online]. Available: <http://www.goodfellow.com/E/Polyethylene-Low-Density.html>.
- [73] M. Floerke, «The key effects of climate change,» Dec 2009. [Online]. Available: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/sci/tech/7821082.stm>.
- [74] K. R. H. Sharon, «A review of solar energy driven desalination technologies,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 41:1080-1118, 2015.
- [75] «Renewable and Sustainable Energy Reviews,» *Energy consumption and water production cost of conventional and renewable energy powered desalination processes*, pp. 343-356, 2013.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare direttamente tutti coloro che hanno contribuito alla realizzazione di questa tesi. Sono estremamente grato al mio Relatore prof. Matteo Fasano, per avermi dato la possibilità di lavorare a questo progetto. Mi piacerebbe estendere i ringraziamenti anche al mio Correlatore Dr. Matteo Morciano, perchè la sua costante presenza e la sua disponibilità sono state fondamentali per lo sviluppo di questo lavoro. Esprimo loro la mia più assoluta gratitudine per aver condiviso le loro capacità, i loro approfondimenti e la loro conoscenza, per aver reso questa esperienza più semplice ed interessante.

Grazie alla mia famiglia, che mi ha sempre sostenuto e guidato nelle scelte, in particolare i miei genitori e le mie due sorelle.

Ringrazio tutti miei amici, quelli di una vita e quelli conosciuti in questi anni vissuti fuori, i colleghi della “Danieli & C. Officine Meccaniche S.P.A.”, di “AGSI” e “AGHA Steel”, per gli insegnamenti di ogni giorno in ambito lavorativo.

Grazie ai membri del “Ce la faremo” per gli stimoli quotidiani. Grazie al “Torba pi tutti” per le distrazioni che mi servivano. Grazie al “dickslappetalosa4cri” con cui ho condiviso tutta l’esperienza torinese. Grazie ai miei amici di sempre Peppe L. e Peppe Z. per il loro immenso sostegno morale e agli amici di tante battaglie universitarie, Buccino, Branca, Paola, signor Marco, Angelo, Gabriele, senza il loro aiuto tutto questo non sarebbe stato possibile.

Il conseguimento di questo risultato è tanto merito loro quanto mio.