

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Ingegneria Industriale DII
Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Energetica

Titolo tesi

SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO AD ACQUA DI UN
MODULO FOTOVOLTAICO: ANALISI DEI PROFILI DI
TEMPERATURA E STUDIO DELL'IDROFOBIA ED
IDROFILIA SUPERFICIALE.

RELATORE

Prof.ssa Anna Stoppato

CORRELATORE

Ing. Alberto Benato

CANDIDATO

Raffaele Di Simone

MATRICOLA:1127882

Anno Accademico 2017/2018

INDICE

1. INTRODUZIONE	3
2. SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO PER MODULI FOTOVOLTAICI	5
2.1 Metodi di raffreddamento attivi	6
2.1.1 Sistemi di raffreddamento ad acqua	6
2.1.2 Sistemi di raffreddamento ad aria	9
2.1.3 Sistemi di raffreddamento con materiali PCM	12
2.1.4 Conclusioni	13
2.2 Metodi di raffreddamento passivi	15
2.2.1 Conclusioni	20
3. DESCRIZIONE DEL SISTEMA ANALIZZATO E MISURE PRELIMINARI	22
4. ANALISI DEI PROFILI DI TEMPERATURA PER OGNI CICLO E PRESSIONE	31
4.1 Analisi dei profili di temperatura con la 1 ^a configurazione di ugelli	31
4.1.1 Analisi generale delle prove eseguite con la 1 ^a configurazione di ugelli	70
4.1.2 Conclusioni	78
4.1.3 Calcolo delle perdite di acqua tra monte e valle del modulo	79
4.2 Analisi dei profili di temperatura con la 2 ^a configurazione di ugelli	81
4.2.1 Analisi generale delle prove eseguite con la 2 ^a configurazione di ugelli	108
4.2.2 Confronto con la 1 ^a configurazione e conclusioni	114
5. BAGNABILITA' SUPERFICIALE: ASPETTI LEGATI ALLA RUGOSITA' SUPERFICIALE, IDROFILIA ED IDROFOBIA DI UNA SUPERFICIE	119
5.1 Studio dell'idrofobia e superidrofobia superficiale	129
5.2 Studio dell'idrofilia e superidrofilia superficiale	136
5.3 Conclusioni	140
6. FLOATING PHOTOVOLTAIC SYSTEM	142
6.1 Conclusioni	160
7. CONCLUSIONI	161
BIBLIOGRAFIA	163
RINGRAZIAMENTI	166

1. INTRODUZIONE

Questo lavoro di tesi ha lo scopo di valutare da un punto di vista sia termico che di efficienza energetica un sistema di raffreddamento per moduli fotovoltaici che utilizza ugelli spruzzatori ed acqua come fluido termovettore.

Nei successivi paragrafi, dopo una breve panoramica sui vari metodi di raffreddamento in uso per moduli fotovoltaici, verrà affrontata sia un'analisi di tipo termodinamico del modulo (fulcro principale di questo lavoro) sia lo studio della rugosità, dell'idrofobia e dell'idrofilia superficiale con possibili applicazioni come sistema galleggiante su bacini id. Infine, data la necessità di utilizzare grandi quantità d'acqua per il raffreddamento, si analizzerà l'attuale stato dell'arte nel campo dei pannelli fotovoltaici galleggianti su bacini idrici. Si noti che questo lavoro di tesi, è per la maggior parte di tipo sperimentale e nel capitolo 4 verranno riportate tutte le prove eseguite, atte a comprendere al meglio le problematiche connesse al sistema di raffreddamento e a fornire piccoli miglioramenti per conseguire buoni risultati sia da un punto di vista termodinamico che da un punto di vista del consumo d'acqua che al giorno d'oggi risulta sempre più un bene prezioso per l'umanità.

Una volta definiti gli obiettivi dell'elaborato si deve osservare che per un generico modulo fotovoltaico, la tensione erogata dalla singola cella dipende dalla sua temperatura: maggiore è la temperatura, minore sarà la tensione erogata e quindi il rendimento del modulo. Infatti, l'efficienza di conversione dipende anche dalla temperatura della cella (T_c): in una cella al silicio monocristallino, all'aumento della temperatura di giunzione corrisponde una diminuzione della tensione a vuoto di circa $2,3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ e congiuntamente un aumento della corrente di cortocircuito pari a circa $0.07 \text{ } \%/^\circ\text{C}$. L'andamento dei due parametri al variare della temperatura è chiaramente riportato in Figura 1¹. Questi due fenomeni, anche se in opposizione, si traducono in una diminuzione dell'area sottostante la curva caratteristica intorno al 6-7 % per ogni aumento di $10 \text{ }^\circ\text{C}$ della temperatura della cella: questo comporta una diminuzione del

¹ A. Cavallini, D. Del Col – La conversione fotovoltaica - Appunti del corso di energie rinnovabili – page 15, 2016

rendimento di conversione dello 0.4% per ogni grado di aumento della temperatura della cella T_c .²

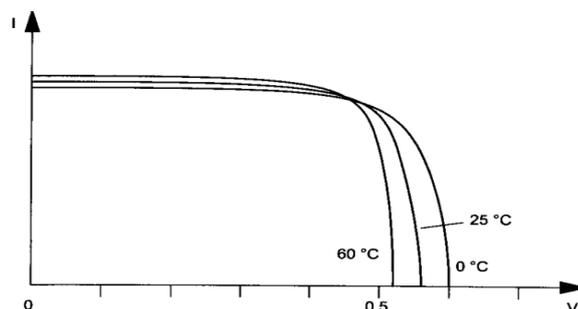


Figura 1 -Curva caratteristica I-V di una cella in silicio monocristallino: variazione in funzione della temperatura.

Quindi lo scopo del sistema di raffreddamento è proprio quello di ridurre la temperatura delle celle e farle lavorare alla temperatura più bassa possibile soprattutto nelle ore più calde della giornata dove si riscontra il picco di irraggiamento solare (le ore più calde sono da considerarsi tra le 10:00 e le 16:00 di una tipica giornata di luglio). In particolare lo studio si è svolto principalmente per analizzare le conseguenze del fatto che il film d'acqua, che si viene a creare sul modulo dopo l'attivazione degli ugelli spruzzatori, non riesce a bagnare uniformemente tutto il pannello per ogni valore della pressione utilizzata (la pressione va da 0.5 bar a 2 bar). Uno degli obiettivi del lavoro è stato quello di cercare di uniformare al meglio il raffreddamento in quanto una maggiore disuniformità porterebbe ad un maggior sbilanciamento della produzione elettrica delle singole celle. Inoltre occorre cercare di avere dei tempi di raffreddamento abbastanza bassi in modo da consentire al modulo di lavorare per gran parte del tempo con un rendimento prossimo al massimo. Non bisogna però dimenticare, come detto prima, che il fluido termovettore è acqua, un bene prezioso che negli ultimi anni sta scarseggiando, quindi c'è da tener presente il suo consumo che non dovrà essere eccessivo per una possibile applicazione reale.

² A. Cavallini, D. Del Col – La conversione fotovoltaica - Appunti del corso di energie rinnovabili – page 16, 2016.

2. SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO PER MODULI FOTOVOLTAICI

Come già accennato in precedenza, la temperatura operativa dei pannelli solari incide fortemente sulla già modesta efficienza dei pannelli stessi, dunque, una corretta tecnica di raffreddamento dei pannelli fotovoltaici (pannelli FV) potrebbe garantire un aumento dell'efficienza energetica dei pannelli. Altro aspetto positivo associato all'implementazione delle tecniche di raffreddamento dei pannelli solari è il degrado prematuro e prolungato dell'efficienza dei pannelli: la vita dei pannelli solari può essere prolungata da 25-30 anni fino a 48 anni utilizzando specifiche tecniche di raffreddamento. La pulizia dei pannelli FV può essere risolta attraverso determinate tecniche di raffreddamento e ottenendo un incremento addizionale del rendimento medio annuale dell'elettricità consegnata. Per queste ragioni negli ultimi decenni, gli sforzi dei ricercatori si sono focalizzati, sullo sviluppo di differenti tecniche di raffreddamento: esse si possono suddividere in attive e passive.

Di fatto il raffreddamento del modulo fotovoltaico può essere reso attivamente o passivamente: i sistemi di raffreddamento attivo sono azionati da ventilatori o pompe che richiedono alimentazione esterna mentre i sistemi passivi non richiedono ulteriore alimentazione. Ad esempio, un pannello fotovoltaico installato sul tetto viene raffreddato passivamente attraverso la convezione naturale dell'aria nella sua parte posteriore, ma è relativamente inefficiente e lento in termini di raggiungimento del raffreddamento desiderato mentre, il sistema attivo è molto efficace soprattutto in determinate situazioni in cui la temperatura ambiente è molto elevata, come negli impianti solari installati nei deserti o nei casi in cui è richiesta un'efficienza maggiore, Il raffreddamento attivo, ad esempio, può servire a uno scopo addizionale come il riscaldamento dell'acqua per usi domestici.

Di seguito si riportano alcuni approcci più recenti e innovativi per ottenere prestazioni migliori con i metodi di raffreddamento attivi e passivi.

2.1 METODI DI RAFFREDDAMENTO ATTIVI

Per quanto riguarda i sistemi di raffreddamento attivi, numerosi sono stati gli approcci da parte sia dei ricercatori universitari che di aziende private ed è possibile suddividerli in tre tipologie principali: sistemi di raffreddamento ad acqua o ad aria (in convezione forzata) e sistemi di raffreddamento con materiali a cambiamento di fase (*PCMs – Phase Change Materials*).

2.1.1 Sistemi di raffreddamento ad acqua

L'utilizzo di acqua per raffreddare un modulo fotovoltaico è da sempre al centro di dibattiti tra i vari esperti del settore in quanto, da un lato essa rappresenta un bene prezioso per l'umanità che ultimamente scarseggia sempre più, dall'altro è economica in quanto diffusa su tutta la terra e ha un impatto ambientale nullo. Diversi sono stati i sistemi di raffreddamento ad acqua analizzati sperimentalmente e di seguito vengono riportati quelli più significativi:

- □ Giama et al. [1] hanno proposto un sistema denominato TEPSI (*Thermal Electric Solar Panel Integration*) e lo hanno testato sperimentalmente: questo sistema consiste in un modulo fotovoltaico convenzionale dotato di una scatola in policarbonato posta sulla parte superiore del modulo (Figura 2). Sotto questa scatola, l'acqua circola formando uno strato di spessore 2.5 cm. (questo spessore è stato selezionato dopo diverse prove, in base ai problemi di peso e di efficienza). Questo pannello TEPSI è stato isolato con uno strato di poliuretano da 40 mm. per riuscire ad ottenere una ragionevole efficienza termica, ovvero ridurre la perdita di calore ed ottenere una temperatura dell'acqua maggiore. Si è constatato che l'applicazione di uno strato d'acqua sulla superficie anteriore del pannello fotovoltaico, porta ad un aumento dell'efficienza elettrica se confrontato con quello di riferimento, cioè un pannello fotovoltaico standard delle stesse



Figura 2 - Sistema TEPSI

dimensioni. L'aumento massimo dell'efficienza elettrica è stato stimato intorno al 2.0% con un'efficienza di conversione fotovoltaica media annua di circa il 13%. Il sistema TESPI è stato anche in grado di produrre acqua calda con una temperatura media di 40 °C, mentre la massima temperatura raggiunta è stata di 63 °C. L'efficienza globale del sistema TESPI è per lo più superiore al 15% durante l'anno, ma in genere varia dal 15% al 20%.

- □ Altra tecnica di raffreddamento attivo, analizzata sempre in [1], è una tecnica adatta per l'applicazione in abitazioni residenziali, con l'utilizzo di acqua piovana. Il sistema utilizzato è mostrato in Figura 3 e consiste in un sistema fotovoltaico (raffreddato con acqua applicata sulla superficie anteriore del pannello fotovoltaico), un serbatoio di stoccaggio dell'acqua e un serbatoio di espansione (contenete gas) sufficiente per consentire la circolazione dell'acqua. La novità del sistema è nell'applicazione dell'acqua piovana e ha permesso la circolazione attraverso il serbatoio di espansione. Il problema che si potrebbe riscontrare con questa soluzione è legato al fatto che l'acqua piovana di per sé è sporca (dipende dalla condizioni di inquinamento atmosferico) e quindi si dovrebbe pensare anche ad un modo semplice ed economico per pulire il modulo.

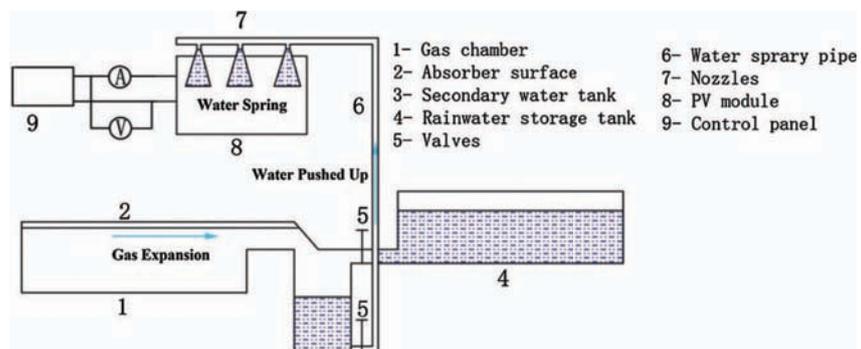


Figura 3 - Schema del raffreddamento attivo con utilizzo di acqua piovana.

- □ Siecker et al. [2] hanno proposto, tra i vari sistemi analizzati, un ottimo metodo di raffreddamento che prende il nome di FTCC (*Floating Tracking Concentrating Cooling*): questo impianto FV galleggiante (le cui applicazioni e tipologie verranno analizzate in dettaglio nel capitolo 6) consiste in una

piattaforma galleggiante con moduli FV, un set di riflettori e un sistema di tracking solare. Il raffreddamento del pannello è ottenuto tramite irrigatori ad acqua (water sprinklers), i riflettori vengono utilizzati per concentrare la radiazione solare ed aumentare la raccolta di energia, mentre la piattaforma galleggiante consente la presenza di un



Figura 4 - Floating tracking concentrating cooling (FTCC)

sistema di tracking per il posizionamento dei riflettori e anche per incrementare la radiazione solare sui moduli FV. Questo sistema FTCC è possibile osservarlo in Figura 4 dove ogni componente è numerato in maniera differente: (1) modulo FV, (2) gli spruzzatori e (3) i riflettori solari. Il sistema FTCC lavora in condizioni altamente efficienti tuttavia, quando l'acqua viene spruzzata, l'area superficiale del modulo è parzialmente raffreddata in quanto gli spruzzatori non riescono a bagnare tutta la superficie, quindi richiederebbe ulteriore sperimentazione per cercare di massimizzare il raffreddamento di tutti il modulo.

- □ Altro sistema analizzato in [2] è il sistema solare ibrido fotovoltaico/termico (FV/T) raffreddato attraverso spruzzi di acqua (Figura 5): in questo sistema viene utilizzata una pompa centrifuga per forzare il flusso di acqua, attraverso ugelli spruzzatori, dal serbatoio tramite un tubo di aspirazione. Questo tubo consiste in una valvola di non ritorno ed un filtro per evitare l'aspirazione di materiali grossolani (ad esempio piccole pietre) e per proteggere la pompa centrifuga. Al di là del filtro, l'acqua viene



Figura 5 - Sistema fotovoltaico ibrido FV/T raffreddato ad acqua.

trasferita ad ugelli spruzzatori con l'intento di raffreddare il modulo PV. L'acqua viene spruzzata sull'area superficiale del pannello e nel momento in cui si spruzza, la temperatura del modulo diminuisce ed il rendimento aumenta (sistema simile a quello utilizzato in questo elaborato, di cui si parlerà nel capitolo 4). I risultati sperimentali mostrano un buon incremento dell'efficienza del modulo con questo sistema, tuttavia l'acqua viene sprecata e il calore che viene da essa assorbito potrebbe essere utilizzato per incrementare la raccolta di energia termica, ovviamente bisogna avere a disposizione un'utenza termica che richieda acqua calda con quel range di temperatura fornito dal raffreddamento del pannello.

2.1.2 Sistemi di raffreddamento ad aria

Per quanto riguarda questi sistemi di raffreddamento bisogna osservare che, rispetto all'acqua, l'aria ha lo stesso impatto ambientale nullo con il vantaggio di essere disponibile in tutto il globo e non ha problemi di scarsità come sta accadendo per l'acqua. Il raffreddamento ad aria offre un raffreddamento meno costoso per gli impianti fotovoltaici nei quali il calore può essere rimosso mediante convezione naturale o forzata. L'aria è il mezzo preferito per un raffreddamento a basso costo, nonostante le sue scarse caratteristiche fisiche (basso coefficiente di scambio termico rispetto a quello dell'acqua ad esempio). Numerosi sono stati gli studi effettuati sperimentalmente e di seguito si riportano i sistemi di raffreddamento ad aria più promettenti:

- Giama et al. [1] hanno esaminato una configurazione FV raffreddata attraverso un flusso d'aria indotto sulla superficie posteriore del pannello fotovoltaico, Figura 6, utilizzando un ventilatore e un condotto appositamente progettato. Le alette aggiunte sui condotti d'aria hanno

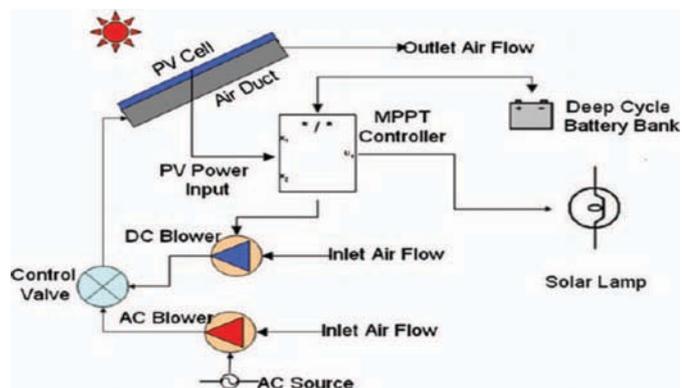


Figura 6 - Schema semplificato del modulo FV raffreddato ad aria

migliorato il trasferimento di calore convettivo ed inoltre il pannello è stato dotato di un sistema di inseguimento del punto di massima potenza, per poter massimizzare la produzione del pannello fotovoltaico.

- □ Una tecnica di raffreddamento attiva per i pannelli fotovoltaici che utilizza il

flusso di aria forzata indotto da una ventola sulla superficie posteriore di un pannello fotovoltaico è stata proposta in [2]. Il sistema è formato da un grande ventilatore collegato al sistema di condotti, appositamente progettato, in cui l'aria raffredda in maniera diretta la superficie posteriore del pannello fotovoltaico al fine di ridurre la sua temperatura operativa (Figura 7). Il ventilatore è alimentato dal modulo FV stesso ed il suo



Figura 7 - Setup sperimentale per la tecnica di raffreddamento ad aria con ventilatore

consumo energetico aumenta all'aumentare della portata di aria introdotta ovvero quando la larghezza del condotto d'aria sottostante (quindi la superficie di scambio termico), aumenta. Sono stati testati diversi pannelli fotovoltaici policristallini, la velocità dell'aria è stata fatta variare da 2 a 4 m/s, mentre la distanza tra il pannello fotovoltaico e il tetto è stata variata ed esaminata rispetto alle prestazioni del pannello fotovoltaico di riferimento (ovvero lo stesso modulo ma senza alcun tipo di raffreddamento). Per il caso della convezione forzata, il minor incremento della temperatura del pannello fotovoltaico è stato raggiunto nel momento in cui è stata applicata la massima velocità dell'aria (4 m/s) insieme alla massima distanza tra il pannello fotovoltaico e il tetto, infatti, si è ottenuto un incremento d'efficienza, per questa configurazione, pari al 6,3%. Inoltre è stata valutata l'importanza della distanza tra il pannello

fotovoltaico e il tetto e si è riscontrato che distanze più ampie sono migliori per aumentare il trasferimento di calore dal pannello fotovoltaico. Questo sistema è un sistema molto efficace soprattutto in condizioni climatiche fredde, però la circolazione forzata di aria non è efficiente come la circolazione forzata di acqua (vista precedentemente) data l'enorme differenza tra i coefficienti di scambio termico tra l'acqua e l'aria.

- Arcuri et al. [3] hanno proposto un sistema di raffreddamento ad aria è costituito da condotti di alluminio sul retro del pannello che coprono l'intera superficie posteriore del modulo (Figura 8). Le bocche di ingresso e uscita sono sui lati opposti del modulo (Figura 9 – indicate con Inlet e Outlet), pertanto il flusso d'aria influisce sulla superficie maggiore del pannello fotovoltaico. Una sezione del condotto di raffreddamento che massimizza il flusso d'aria senza superare il telaio FV è stata scelta in base alla letteratura (Brinkworth, 2006). Sono state create quattro configurazioni di sistema:
 - ✓ Caso A1 – Tre condotti con aria direttamente in contatto con lo strato di Tedlar.
 - ✓ Caso A2 – Tre condotti con una lamiera di alluminio di spessore 1 mm in contatto diretto con il Tedlar
 - ✓ Caso A3 – Tre condotti con una lamiera di alluminio di spessore di 2 mm in contatto con lo strato di Tedlar
 - ✓ Caso A4 – Quattro condotti con una lamiera di alluminio di spessore 1 mm in contatto con lo strato di Tedlar.

È stato creato un modello del canale di raffreddamento, realizzato in legno in base alle dimensioni del caso A4 (Figura 9). La superficie interna del condotto è laccata per ottenere la stessa superficie liscia dell'alluminio. Sono stati realizzati una serie di fori circolari, con 11 mm di diametro, sulla sezione trasversale longitudinale del condotto e la loro posizione, lungo le tre sezioni, è asimmetrica. Le prestazioni termiche del sistema di raffreddamento sono estremamente influenzate dal materiale del tubo, inoltre la condizione di flusso turbolento rispetto alla condizione di flusso laminare apporta notevoli effetti benefici soprattutto per i casi con condotti metallici. Inoltre, l'effetto di reiezione del calore del telaio del pannello fotovoltaico è migliorato dalla

presenza della lamiera, che trasferisce il calore verso il telaio in alluminio sfruttando la sua alta diffusività termica.

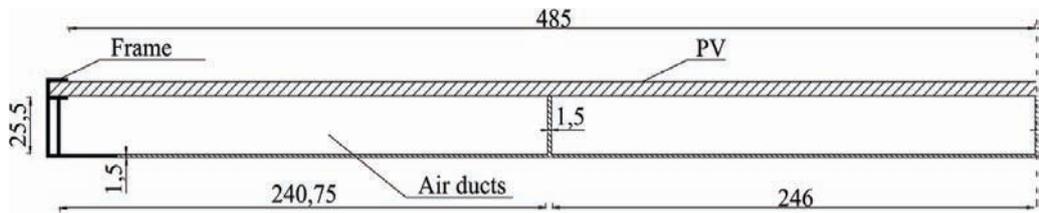


Figura 8 - Sezione trasversale di una metà del sistema di raffreddamento ad aria per moduli FV (vista laterale)

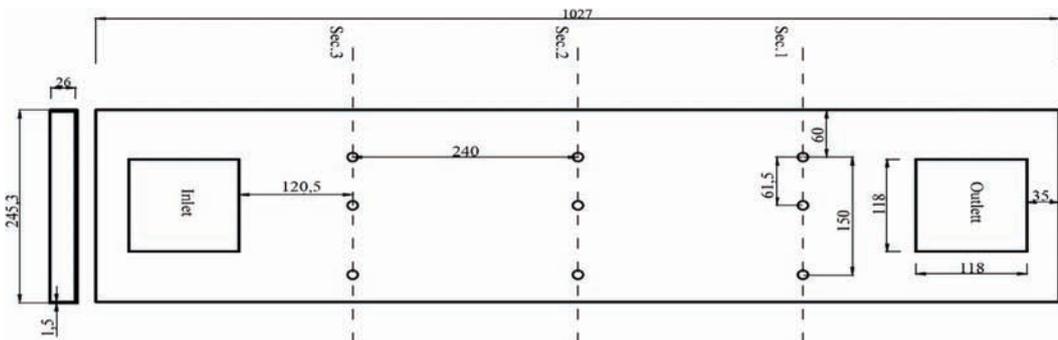


Figura 9 - Schema semplificato di un condotto di raffreddamento del modello sperimentale ad aria comprendente punti di misura in mm. (vista dall'alto)

2.1.3 Sistemi di raffreddamento con materiali PCM

I materiali a cambiamento di fase (PCM) sono sostanze che hanno un elevato calore di fusione, gli stati di liquido e solido si trovano in un intervallo di temperatura ristretto e sono in grado di immagazzinare e rilasciare enormi quantità di calore. Di solito questi materiali si usano per sistemi di raffreddamento passivi, ma ci sono alcune applicazioni anche per quelli attivi come mostrato di seguito:

- In [1] è stato riportato un nuovo sistema di ventilazione a soffitto in cui i pannelli ibridi FV/T (fotovoltaico/termico) sono stati integrati con materiali

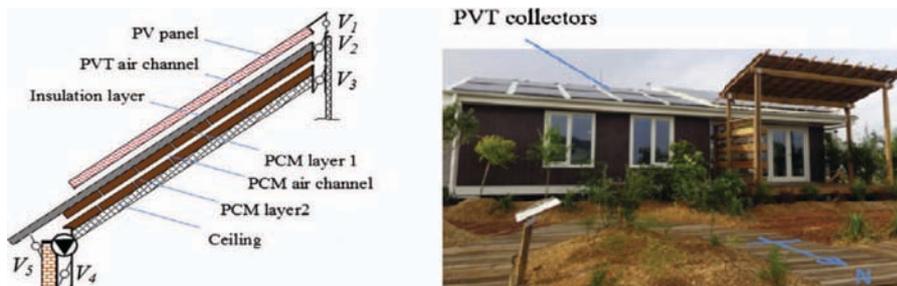


Figura 10 - Schema semplificato di un nuovo sistema di ventilazione a soffitto per collettori solati FV/T.

PCM. Un concetto semplificato di questo sistema di ventilazione a soffitto perfezionato è mostrato in Figura 10 e consiste in un pannello fotovoltaico il quale viene raffreddato, sul retro, da un flusso d'aria attraverso un condotto di ventilazione (da notare che l'intero sistema è isolato termicamente) e sono stati aggiunti due strati contenenti materiale PCM prima del soffitto, con un canale d'aria tra i due strati PCM. L'efficienza elettrica media è stata valutata dell'8,3% circa, sia per i periodi estivi che invernali. Pertanto, si può concludere che la riduzione media della temperatura operativa del pannello fotovoltaico varia tra 10 °C e 20 °C, a seconda del periodo dell'anno (con una portata media dell'aria di circa 500 kg / h per il sistema di ventilazione a soffitto).

2.1.4 Conclusioni

In tabella 1 [1], si riassumono i parametri generali di prestazione per le opzioni di raffreddamento attivo sopra analizzate, esse vengono classificate in base ai refrigeranti utilizzati: acqua o aria, nanofluidi e PCM.

Tabella 1 - Riassunto dei parametri principali analizzati per le tecniche di raffreddamento attive.

Refrigerante	Temperatura operativa del pannello (°C)	Efficienza elettrica (%)	Riduzione di temperatura (°C)
Acqua	18,56	10,78	5,7
Aria	20,08	8,1	7,1
Nanofluido	18,78	8,5	7,2
PCM	18,56	10,78	5,7

Analizzando i dati riassunti in Tabella 1, è ragionevole prevedere una riduzione media della temperatura operativa del pannello in un intervallo 0.7 °C - 32 °C, per un raffreddamento attivo a base di acqua con un aumento medio dell'efficienza che va dal 2.1% al 37 %. Inoltre, per le configurazioni FV/T, l'aumento medio dell'efficienza si quantifica tra il 2% e il 22% mentre la riduzione di temperatura del pannello si attesta tra 10 °C e 30 °C. Nel caso del raffreddamento ad aria, è ragionevole aspettarsi un aumento medio di efficienza dal 2% al 19% e una riduzione media della temperatura di funzionamento compresa tra 5° C e 30 °C, infine, nel caso dei nanofluidi, risulta

difficoltoso individuare un intervallo di miglioramento dell'efficienza previsto e una riduzione della temperatura operativa del modulo. Tuttavia, i dati riportati in Tabella 1 mostrano il potenziale di questa tecnologia; essa infatti risulta competitiva con le opzioni di raffreddamento attivo a base di acqua per i moduli FV.

Pertanto, secondo l'analisi delle prestazioni ottenute, si può concludere che la strategia di raffreddamento attivo basata sull'acqua è la più praticabile quando si considera il miglioramento dell'efficienza. Anche la tecnica di raffreddamento ad aria mostra potenziale, tuttavia, tutto dipende dalla specifica configurazione di raffreddamento, ovvero dalla sua fattibilità economica. Per un impianto fotovoltaico da 30 kW, si è dimostrato che solo il raffreddamento a base d'acqua è ragionevole dal punto di vista tecnico, nelle due varianti analizzate (strato d'acqua sulla superficie anteriore del modulo o applicazione di getto d'acqua). Tuttavia, dal punto di vista economico, è stato riscontrato che le tecniche di raffreddamento attivo esaminate in precedenza sono discutibili e in effetti non sono economicamente valide, allo stato attuale delle cose. Infatti, durante la valutazione iniziale non si è considerata l'energia consumata per il funzionamento del sistema di raffreddamento. Consumi che riducono in maniera significativa, il beneficio introdotto dal sistema raffreddamento: aumento dell'LCOE (*Levelized cost of energy*). Tuttavia, tale approccio è ragionevole e sufficiente in quanto fornisce una visione generale della fattibilità economica di base delle tecniche di raffreddamento qui elencate. D'altra parte, le configurazioni FV/T possono portare ulteriori vantaggi economici grazie all'utilizzo del calore di scarto (ulteriore diminuzione di LCOE), ma sono stati esaminati i miglioramenti dell'elettricità erogata in modo da non includere l'aspetto termico.

Per quanto riguarda gli aspetti ambientali, le tecniche di raffreddamento che utilizzano aria o acqua sono state confrontate tra loro mediante un'analisi LCA: i risultati ottenuti mostrano che la tecnica di raffreddamento più dannosa è quella utilizzante in quanto ha il più alto impatto ambientale rispetto ad altre tecniche di raffreddamento esaminate, infatti basti pensare ai materiali costruttivi utilizzati per realizzare un sistema di raffreddamento ad aria (gli impatti ambientali più enfatizzati sono il riscaldamento globale e l'effetto di acidificazione).

Si può concludere che il raffreddamento a base d'acqua dovrebbe essere considerato come la prima tecnica di raffreddamento praticabile e di fatto, nel capitolo

4, verrà studiato ed analizzato proprio un sistema di raffreddamento ad acqua. Tuttavia, al fine di garantire un LCOE più ragionevole, è necessario ottenere un'ulteriore ottimizzazione dei metodi di raffreddamento esistenti o persino lo sviluppo delle nuove tecniche di raffreddamento per garantire ulteriori aumenti delle prestazioni e migliorare i benefici del raffreddamento.

2.2 METODI DI RAFFREDDAMENTO PASSIVI.

Per quanto riguarda i sistemi di raffreddamento passivi, non è possibile suddividerli in solo tre categorie in quanto, oltre al raffreddamento ad aria (in convezione naturale) e ad acqua ce ne sono altre tipologie che utilizzano ad esempio PCM e tubi di calore, altre ancora fanno uso di stoppini di cotone ecc. Di seguito si riportano una serie di tecniche di raffreddamento passivo che potrebbero essere molto promettenti in vista di un'applicazione reale:

- Il metodo di raffreddamento passivo più semplice è quello che utilizza l'aria in convezione naturale, sfruttando l'effetto camino. Esso rappresenta un metodo non costoso e molto semplice. Nel raffreddamento ad aria in convezione naturale, non è necessario alcun dispositivo aggiuntivo per eseguire il raffreddamento dei pannelli fotovoltaici. Tuttavia, i sistemi di estrazione del calore con circolazione naturale dell'aria, sono limitati nelle loro prestazioni termiche a causa della bassa densità, della minore capacità termica volumetrica e della conduttività termica dell'aria. Quindi sono necessari ulteriori accorgimenti per l'aumento del trasferimento di calore (ad esempio l'introduzione di alette per incrementare la superficie di scambio termico).
- Un'altra tecnica che può essere utilizzata per ridurre la temperatura di un pannello fotovoltaico [2] prevede l'implementazione della tecnica di raffreddamento ad immersione in acqua come mostrato in Figura 11. Con la tecnica di raffreddamento ad immersione in acqua un modulo fotovoltaico viene collocato in grandi corpi idrici come fiumi, oceani, laghi, canali, ecc. L'acqua viene utilizzata come fluido di immersione, la quale assorbe il calore dal modulo e mantiene costante la temperatura superficiale delle celle

fotovoltaiche. Pertanto, quando l'acqua assorbe il calore dal modulo fotovoltaico, l'efficienza elettrica aumenta, tuttavia, bisogna tener presente che l'efficienza è bassa durante i giorni nuvolosi ed inoltre, l'acqua all'interno del contenitore di plastica risulta ionizzata e l'esposizione a quest'acqua influenza l'efficienza elettrica nel tempo.

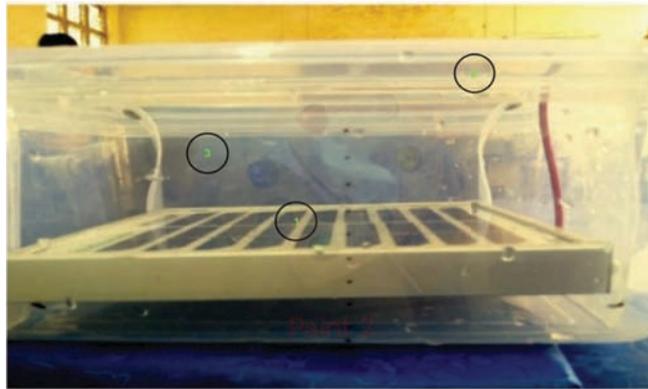


Figura 11 – Raffreddamento del modulo tramite immersione in acqua: (1) modulo FV, (2) contenitore di plastica, (3) acqua.

- □ In [2] è possibile osservare una tecnica di raffreddamento che consiste nell'utilizzare i materiali a cambiamento di fase (PCM), come i cristalli fotonici al tungsteno. Il PCM è un materiale di accumulo di calore latente, che si trova nella parte posteriore del pannello fotovoltaico (Figura 12): quando la temperatura del modulo aumenta, i legami chimici all'interno del PCM si separano e si verifica un cambiamento di fase da solido a liquido e il PCM assorbe il calore, a causa del fatto che il cambio di fase è un processo endotermico. In pratica, quando il calore immagazzinato nel materiale PCM raggiunge la temperatura di fusione, il materiale inizia a fondere. La temperatura si stabilizza quindi fino al completamento del processo di fusione. Da notare che il materiale PCM viene chiamato materiale di accumulo di calore



Figura 12 - Pannello fotovoltaico con materiali a cambiamento di fase: (1) modulo FV, (2) modulo contenente il materiale PCM.

latente perché il calore viene immagazzinato durante il processo di fusione (processo di cambiamento di fase). Dai risultati sperimentali è possibile notare che il sistema di raffreddamento con PCM funziona in modo efficace. Infatti, il sistema conserva il calore proveniente dal modulo FV durante il processo di fusione del PCM, tuttavia le capacità assorbenti del materiale PCM si degradano nel tempo. Inoltre come si evince dallo studio di Kant et al. [5], la maggior parte dei materiali PCM ha una bassa conducibilità termica che quindi limita la loro applicazione: sono stati condotti diversi studi per aumentare il trasferimento di calore da parte dei materiali PCM presenti all'interno di tubi con diverse configurazioni, anche con inserimento di una matrice metallica all'interno oppure usando PCM disperso con particelle ad alta conducibilità termica. Si noti infine che, prestazioni superiori, le si ottengono durante condizioni climatiche calde, che sono però sfavorevoli per il rendimento del modulo.

- □ Malek et al. [6] hanno evidenziato una tecnica molto creativa per il raffreddamento della cella fotovoltaica: il vapore, in convezione naturale, utilizzato come fluido termovettore. La configurazione sperimentale è presentata in Figura 13. Lo schema ideato dai ricercatori, comprende un simulatore di vapore naturale, un simulatore solare e una cella fotovoltaica insieme agli strumenti di misura della temperatura e della tensione/corrente.

Questa modalità di raffreddamento non richiede energia extra ed un aumento della portata di vapore aumenta la velocità di trasferimento del calore dal modulo fotovoltaico. Gli autori suggeriscono che l'effettiva installazione di questi pannelli potrebbe essere collocata sui fiumi e canali dove avviene l'evaporazione naturale.

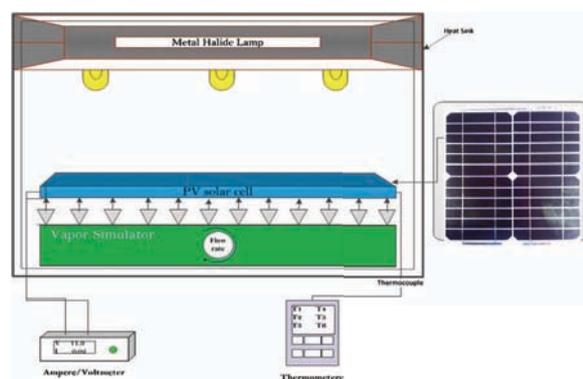


Figura 13 - Schema di un pannello solare raffreddato naturalmente da vapore

- In [2] è possibile osservare un tipico sistema di raffreddamento termoelettrico: i dispositivi termoelettrici sono costituiti da un semiconduttore drogato di tipo n e uno di tipo p, collegati tra loro elettricamente in serie e termicamente in parallelo (insieme formano quello che viene chiamato modulo TEG - modulo di generazione di energia termoelettrica). Sotto un gradiente di temperatura, la maggior parte dei portatori di carica si diffondono dal lato caldo (elettrodo con carica positiva) al lato freddo (elettrodo con carica negativa) a causa dell'effetto Peltier³, che genera una tensione e quindi determina il flusso di corrente (in presenza di un carico, ad esempio una resistenza). Quando una tensione viene applicata attraverso il materiale, forza una corrente a fluire attraverso di esso, il che fa sì che il modulo TEG si raffreddi da un lato e si riscaldi dall'altro, quindi il lato caldo deve essere collegato a un dissipatore di calore per dissipare il calore in eccesso. Lo schema del sistema di raffreddamento viene riprodotto in Figura 14. Bisogna però notare che il dissipatore di calore alettato ha bisogno di una particolare attenzione in quanto un flusso d'aria turbolento lo rende altamente instabile, la superficie alettata subirebbe forti sollecitazioni da parte delle particelle d'aria, quindi bisogna evitare che scambi calore con aria ad alta velocità.

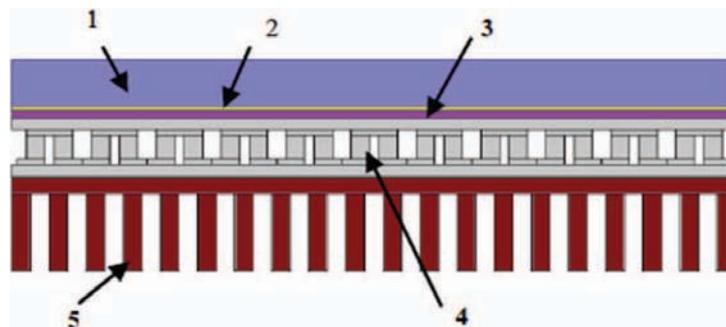


Figura 14 – Sistema di raffreddamento termoelettrico: (1) Copertura in vetro; (2) celle FV, (3) isolante, (4) modulo TEG, (5) Dissipatore di calore (alettato).

- Sargunanathan et al. [7] hanno studiato un sistema di raffreddamento per moduli fotovoltaici in cui nella parte posteriore del pannello vengono installati

³ L'effetto Peltier è il fenomeno termoelettrico per cui una corrente elettrica che scorre tra due metalli o semiconduttori differenti posti in contatto (giunzione Peltier) produce un trasferimento di calore. [www.fisica.unige.it].

tubi di calore contenenti fluido refrigerante: il tubo di calore è un dispositivo che viene utilizzato per il trasporto del calore da un'estremità all'altra, il condotto termico è costituito da una sezione evaporativa, una sezione adiabatica e una sezione condensativa. L'assorbimento di calore avviene nella sezione dell'evaporatore, la cessione del calore nella sezione del condensatore e la sezione adiabatica è completamente isolata. Quindi, il calore assorbito, vaporizza il fluido termovettore (interno al tubo), poi il vapore che trasporta il calore latente di vaporizzazione, fluisce verso la sezione del condensatore e cede il suo calore latente all'ambiente circostante per convezione naturale. Il sistema proposto, per il raffreddamento delle celle solari, contiene due tubi di calore collegati insieme, inizialmente evacuati e riempiti con refrigerante R-11. Poiché il coefficiente di trasferimento termico (dell'aria esterna) per convezione è basso, la superficie esterna del tubo nella sezione di condensazione è alettata. In generale è possibile osservare che il fluido di lavoro utilizzato nei tubi di calore potrebbe essere anche acqua o acetone.

- In [2] è stata analizzata una tecnica di raffreddamento passiva che prevede l'utilizzo di un rivestimento trasparente (raffreddamento a cristallo fotonico): è una tecnica che può essere utilizzata per ridurre la temperatura superficiale di un pannello. Questo rivestimento si basa su cristalli fotonici di silice, si installa sulla superficie superiore delle celle fotovoltaiche e ha la capacità di riflettere il calore generato dalle celle fotovoltaiche, sotto forma di luce infrarossa (nell'intervallo di lunghezze d'onda da 8-30 μm) nello spazio. Allo stesso tempo, grazie a questo rivestimento si è riscontrato un miglioramento delle proprietà anti-riflesso e di intrappolamento della luce da parte del vetro e pertanto, le celle, subiscono un raffreddamento (come detto) ed assorbono più fotoni grazie alle migliorie apportate. Un modulo fotovoltaico raffreddato mediante rivestimento trasparente (raffreddamento a cristallo fotonico) viene raffigurato in Figura 15.

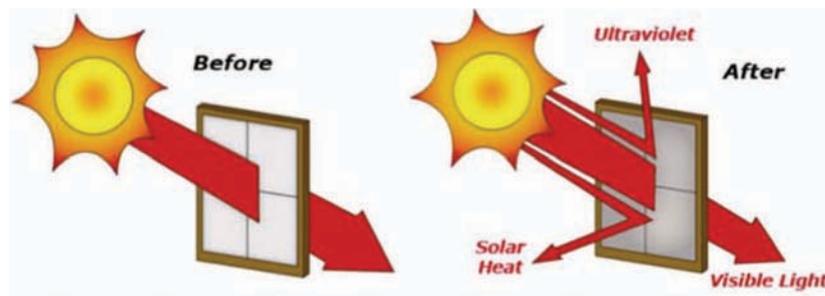


Figura 15 – Modulo FV raffreddato mediante rivestimento trasparente.

2.2.1 Conclusioni

Nella Tabella 2, si riassumono i parametri prestazionali dei vari sistemi di raffreddamento passivi analizzati: è evidente che il raffreddamento con materiali PCM e le tecniche di raffreddamento a base di liquido e aria possono raggiungere un aumento massimo di efficienza elettrica di circa il 20%, mentre il più alto incremento registrato del 22% lo si ottiene per il metodo di immersione in acqua, consentendo una riduzione della temperatura operativa del pannello fino a 50 °C.

Il più basso incremento di efficienza lo si ottiene per la tecnica di raffreddamento basata su rivestimento trasparente (radiative), un po' meno del 3%. Per la tecnica di raffreddamento a base d'acqua si riscontra un miglioramento minimo dell'efficienza e una riduzione della temperatura operativa del fotovoltaico. Pertanto, le tecniche di raffreddamento che impiegano liquidi, aria e PCM hanno un certo potenziale per il miglioramento dell'efficienza dal punto di vista delle prestazioni, sebbene siano necessari dei miglioramenti per poter essere realizzati in maniera economicamente sostenibile.

Tabella 2 - Parametri di prestazione dei sistemi di raffreddamento passivi analizzati.

$\eta_{PV} / \eta_{PV,ref}$ $\eta_{PV} / \eta_{PV,ref}$	$T_{PV} / T_{PV,ref}$ $T_{PV} / T_{PV,ref}$	$\Delta T_{PV} / \Delta T_{PV,ref}$ $\Delta T_{PV} / \Delta T_{PV,ref}$	$\Delta T_{PV} / \Delta T_{PV,ref}$ $\Delta T_{PV} / \Delta T_{PV,ref}$
100%	55/80	10/8	10/7
100%	55/80	10/8	10/7
100%	55/80	10/8	10/7
100%	55/80	10/8	10/7

Inoltre si è riscontrato che la tecnica di raffreddamento PCM è quella con l'impatto ambientale più significativo, specialmente quando si considera il riscaldamento globale. Ciò è dovuto al fatto che con i materiali PCM bisogna utilizzare alluminio/vetro e materiali a base di paraffina. Di conseguenza, la tecnica di raffreddamento ad aria è la più favorevole da un punto di vista ambientale rispetto alle altre tecniche di raffreddamento passivo analizzate qui (che è anche un ulteriore vantaggio per LCOE rispetto ad altre tecniche di raffreddamento passivo analizzate). Però la tecnica di raffreddamento passivo basata sull'aria include anche l'alluminio (meno in quantità rispetto alla tecnica di raffreddamento basata su PCM) e gli additivi epossidici. Questo sistema ha un impatto ambientale leggermente maggiore rispetto al sistema di riferimento, ovvero senza alcun tipo di raffreddamento. Dopo le tecniche di raffreddamento passivo basate su aria, le tecniche di raffreddamento basate sul liquido sono quelle più studiate e sono solitamente correlate al metodo di immersione liquida (acqua, nanofluidi, ecc.).

- □ **UGELLI SPRUZZATORI:** gli ugelli utilizzati hanno un angolo di getto pari a 90° e sono tre, posti nella parte alta del modulo. L'angolo di inclinazione rispetto al piano orizzontale viene fatto variare da 33° (come in Figura 17) a 53° come verrà spiegato nel capitolo successivo.



Figura 17 – Ugelli spruzzatori utilizzati.

- □ **BAROMETRO:** nel circuito di misura sono installati due barometri, uno viene posizionato a monte degli ugelli mentre l'altro a valle degli stessi (Figura 18): così facendo si riesce a quantificare le perdite di carico presenti tra il 1° ed il 3° ugello.



Figura 18 – Barometro montato a monte degli ugelli (a sinistra) e barometro montato a valle degli ugelli (a destra).

- □ **GRONDAIA E BACINELLA PER RACCOLTA DELL'ACQUA:** nella parte bassa del modulo si è installata una grondaia il cui compito è quello di raccogliere l'acqua a valle e convogliarla in una bacinella di raccolta (figura 19).



Figura 19 – Grondaia e bacinella per raccolta acqua.

Questo sistema permette di effettuare misure di portata media a valle del modulo ed ottenere così le perdite di acqua che si hanno rispetto alla portata a monte del modulo.

- □ **LAMPADE:** le lampade montate sono due e vengono utilizzate per simulare la luce solare (Figura 20). Entrambe sono poste a 100 cm di distanza dal pannello e con un angolo di incidenza del fascio prodotto pari a 90° . In Figura 21 e 22 è possibile confrontare lo spettro di luce della lampada con quello solare: come si nota mentre lo spettro per la componente diretta del sole (AM1.5 – f) varia in un range di lunghezze d'onda da $0.3\mu\text{m}$ a $4\mu\text{m}$, quello della lampada varia tra $0.25\mu\text{m}$ e $2.5\mu\text{m}$, ovvero risulta leggermente spostato verso gli UV e non presenta tutta la parte di infrarosso dello spettro solare, ma entrambi presentano un punto di massimo nella zona del visibile.



Figura 20 – Lampade in uso: a sinistra la lampada centrata nella parte bassa del modulo; a destra la lampada centrata nella parte alta del modulo

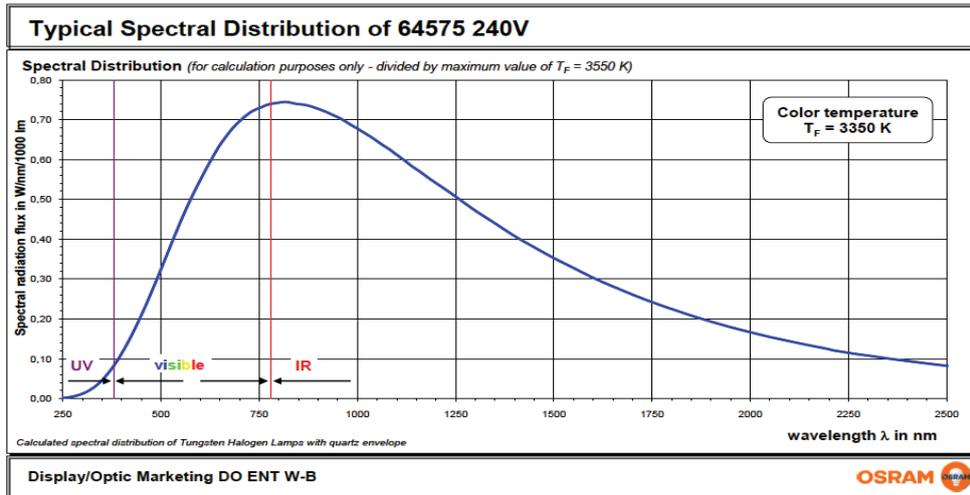


Figura 21 – Spettro lampada OSRAM 64575 – 240V

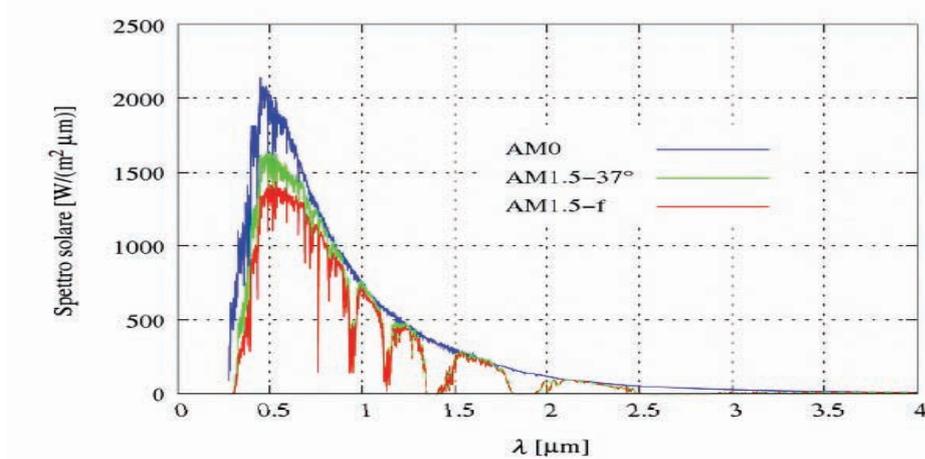


Figura 22 – Spettro solare: ai limiti dell'atmosfera su superficie ortogonale ai raggi (AM0); su una superficie al suolo ortogonale ai raggi (AM1.5 - f); distribuzione spettrale della risultante globale su una superficie rivolta verso il sole ed inclinata di 37° (AM1.5 - 37°).

• **SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI E SOFTWARE LABVIEW:**

Per poter misurare la temperatura delle varie celle si sono incollate delle termocoppie al retro del pannello. Il segnale delle termocoppie viene acquisito mediante un sistema di acquisizione dati (SAD - figura 23) della National Instruments. Le varie misure eseguite

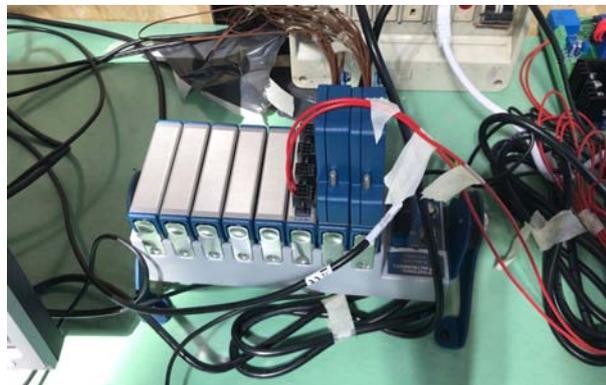


Figura 23 - Sistema di acquisizione dati "National instruments"

vengono gestite tramite il software LabView il quale permette di campionare le misure provenienti dal SAD, elaborarle in diversi modi e salvarle in un file di testo. Il software LabView è stato impostato in modo tale da campionare un punto al secondo, ottenendo così 60 campionamenti al minuto corrispondenti a 60 secondi di tempo. Così facendo si riesce ad essere in linea con il tempo impiegato per eseguire una determinata prova (ad esempio per 300 punti campionati il tempo impiegato è pari a 300 secondi ovvero 5 min.). Il file ottenuto viene poi trasformato in un file excel: quest'ultimo viene richiamato dal programma MATLAB (attraverso il comando XLSREAD) per ottenere così tutti gli andamenti delle varie temperature campionate nel tempo.

Per misurare ed analizzare le temperature sono state collegate sul retro del modulo 32 termocoppie per il cui corretto posizionamento sono state eseguite delle prove preliminari:

a. Per diverse pressioni da 0.5 bar a 2 bar si è valutato l'andamento del film di acqua sul modulo spruzzando costantemente per almeno 30 min. ed eseguendo scatti fotografici analizzati poi al pc. Dalle foto (che non verranno qui riportate per motivi pratici) si nota una certa simmetria nella distribuzione del film di acqua: infatti, considerando la mezzeria del pannello (celle 08 -43, figura 24) il film di liquido, per ogni pressione, bagna le stesse zone sia a destra che a sinistra e lo stesso vale per le zone non bagnate che sono presenti negli stessi punti sia a destra che sinistra. Quindi la scelta più ovvia è stata quella di posizionare le termocoppie solo in una delle due zone (a sinistra, osservando la parte frontale del modulo) in modo da campionare solo metà pannello e semplificare il sistema di misura.

b. Una volta individuata la zona su cui installare le termocoppie bisogna capire in che punti posizionarle se al centro delle varie celle oppure nei punti di intersezione tra esse: si è scelta una delle celle centrali posizionando sul retro 4 termocoppie nei quattro angoli della cella ed una al centro. Utilizzando una

lampada, posta a 50 cm dal modulo, con angolo di incidenza pari a 90° e centrata sulla cella in analisi, si è fatta scaldare la cella fino ad un valore costante di temperatura per poi spruzzare acqua a pressione costante di 1.5 bar e raffreddarla. Si è visto che tra il centro della cella e la periferia gli andamenti dei profili di temperatura sono molto simili tra loro sia in riscaldamento che in raffreddamento quindi tutte le termocoppie sono state posizionate sui punti di intersezione tra le varie celle.

Tutti i punti di intersezione tra le varie celle sono stati numerati; di seguito si riporta uno schema esemplificativo del pannello (figura 24): i punti campionati sono quelli sulle tre colonne di sinistra ovvero 8-43, 4-44 e 5-45 e quelli indicati con la lettera M (quest'ultimi vengono campionati in quanto si trovano in una zona del modulo che risulta sempre poco bagnata) mentre i due punti rossi si riferiscono ai punti dove sono state centrate le due lampade.

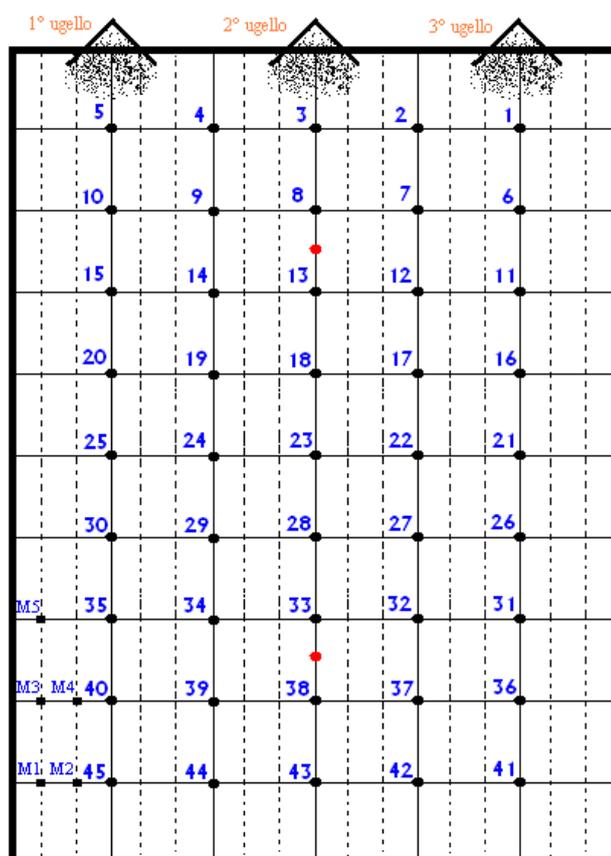


Figura 24 – Schema del modulo fotovoltaico in esame: i cerchi in nero tutti i punti di intersezione tra le celle; i quadratini neri sono i punti dove le celle risultano sempre poco bagnate; in rosso i punti in cui sono state centrate le due lampade utilizzate.

Prima di eseguire le prove di riscaldamento e raffreddamento, per conoscere effettivamente quale sia il consumo di acqua, sono state eseguite delle misure di peso e tempo, per ottenere le portate in uscita dagli ugelli: con l'ausilio di un secchio, si è raccolta l'acqua proveniente da un solo ugello per 1, 2, 5, 10 e 60 min. Quindi si è misurato, con una bilancia, il peso del secchio. Il rapporto tra il peso in kg e il tempo in s, ha consentito di determinare le portate per ogni pressione (ovviamente moltiplicato per un fattore 3, in quanto il valore calcolato è relativo al singolo ugello). I valori delle portate misurate sono riportati in tabella 4.

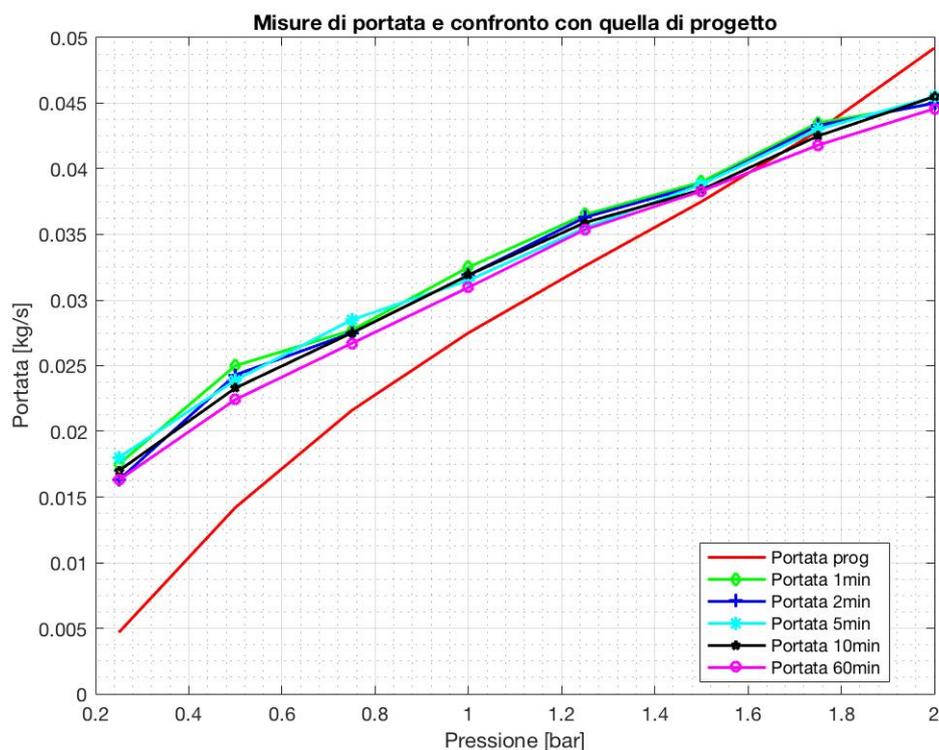


Figura 25 - Andamenti delle portate misurate in funzione della pressione e confronto con la portata di progetto fornita dal costruttore.

Come si può notare dalla Figura 25, il sistema di alimentazione dell'acqua risulta pressoché stabile in quanto tra 1 min. e 60 min. la portata varia ma non di tanto, di fatto si riscontra un calo di portata dell'ordine dei 0.01 kg/s. Una cosa interessante da osservare è che, rispetto alla portata di progetto, la portata misurata nei vari tempi indicati risulta più elevata per le pressioni di 0.25 bar e 0.5 bar ma nel momento in cui la pressione sale, la loro differenza diminuisce sempre più fino a pressione di 1.75 bar, dove la differenza è nulla, mentre a pressione di 2 bar la portata di progetto risulta

maggiore di quella misurata e ciò potrebbe essere causato dalle maggiori perdite di carico che si verificano nel sistema in esame a questa pressione.

Altra cosa importante da osservare è che sono state montate tre termocoppie per la misura della temperatura ambiente: una prima termocoppia è stata posta sotto al modulo in modo tale da fornire il valore di temperatura dell'ambiente sottostante il modulo, una seconda posta al centro (tra la lampada e il pannello) che misura la temperatura effettiva dell'ambiente in cui si trova la superficie del modulo e una terza posta in alto per poter ottenere la misura dell'ambiente sovrastante il modulo. La misura di queste tre temperature consente di capire quale sia la stratificazione dell'aria e sotto quale differenza di temperatura lavora, in ogni istante, il pannello fotovoltaico in esame.

Tabella 4 – Valori di portata di progetto, forniti dal costruttore, e valori di portata misurata dopo 1 minuto, 2 minuti, 5 minuti, 10 minuti e 60 min.

Misure di portata a monte del pannello per tre ugelli						
Pressione [bar]	Portate di progetto [kg/s]	Portata 1 min [kg/s]	Portata 2 min [kg/s]	Portata 5 min [kg/s]	Portata 10 min [kg/s]	Portata 60 min [kg/s]
0.25	0.0047	0.0175	0.0163	0.0180	0.0170	0.0163
0.5	0.0142	0.0250	0.0243	0.0239	0.0233	0.0224
0.75	0.0216	0.0277	0.0275	0.0285	0.0275	0.0267
1	0.0275	0.0325	0.0319	0.0315	0.0319	0.0310
1.25	0.0326	0.0365	0.0363	0.0355	0.0359	0.0354
1.5	0.0375	0.0390	0.0388	0.0388	0.0384	0.0383
1.75	0.0429	0.0435	0.0433	0.0430	0.0425	0.0418
2	0.0492	0.0450	0.0450	0.0455	0.0455	0.0446

4. ANALISI DEI PROFILI DI TEMPERATURA PER OGNI CICLO E PRESSIONE.

Le varie prove descritte in questo capitolo fanno riferimento ad una serie di cicli ON-OFF effettuati, durante i quali si alterna una fase di raffreddamento, spruzzando acqua sul modulo per un periodo di 30s ad una pressione costante (che però cambia da prova a prova) e una fase di post-riscaldamento in cui gli ugelli sono spenti per un periodo di tempo che varia di prova in prova (30s, 60s, 120s, 180s e 300s come si vedrà di seguito).

Verranno analizzati i profili di temperatura delle celle campionate attraverso un sistema di acquisizione dati: in primis, verrà analizzato l'andamento dei profili con la 1^a configurazione, ovvero con gli ugelli che toccano il bordo superiore del pannello e aventi un angolo di inclinazione rispetto al piano orizzontale pari a 33° (quindi 63° rispetto al piano parallelo al pannello) e poi l'andamento con la 2^a configurazione di ugelli i quali, rispetto alla 1^a configurazione, subiscono una rotazione in senso antiorario di 20° presentando quindi un angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale di 53° (quindi 83° rispetto al piano parallelo al modulo). Uno schema del modulo viene riportato in Figura 24 (capitolo 3) e servirà da riferimento per le seguenti analisi. Inoltre, per quanto riguarda i consumi di acqua calcolati per i seguenti cicli e pressioni, bisogna fare riferimento alla tabella 4 (capitolo 3) di cui si considererà un valore medio di portata per ogni pressione.

4.1 ANALISI DEI PROFILI DI TEMPERATURA CON LA 1^a CONFIGURAZIONE DI UGELLI

CICLO 30s ON - 30s OFF

PRESSIONE = 0.5 bar

Per la seguente prova si esegue una prima fase di riscaldamento del pannello di 130 minuti, durante la quale il pannello la temperatura media del modulo si innalza da 15 °C (circa pari alla temperatura dell'ambiente sottostante il modulo) alla temperatura massima possibile e compatibile con la radiazione luminosa emessa dalle lampade pari a 52 °C, ovvero 27 °C in più della temperatura dell'ambiente misurata tra la lampada e il modulo, indicata come $T_{AMB.CENTRO}$ (pari a 25 °C). Si nota che il pannello impiega circa 110 min. per raggiungere la massima temperatura media e, nello stesso tempo, l'acqua subisce un

riscaldamento da 15 °C a 21°C, ovviamente questo si verifica per tutta l'acqua presente nella tubazione di alimentazione, in quanto ristagna in tutto il tratto di tubo che va dal punto di prelievo dell'acqua all'ingresso degli ugelli ed incrementa la sua temperatura a causa della radiazione luminosa prodotta dalle lampade (ciò vale per tutte le prove eseguite). Nella realtà questo si verificherebbe sempre perché, i tubi di adduzione dell'acqua risulterebbero esposti alla radiazione solare e, nel momento in cui l'acqua ristagna al suo interno incrementa la sua temperatura: solo dopo che il tratto di tubazione viene svuotato del tutto si può osservare un calo della temperatura dell'acqua fino al valore di temperatura misurato al pozzo.

Alla fine della fase di riscaldamento si inizia a raffreddare il pannello eseguendo un ciclo in cui si alterna una fase di raffreddamento della durata di 30s, attraverso l'uso dei tre ugelli spruzzatori alla pressione di 0.5 bar, e una fase di post-riscaldamento della durata di 30s, in cui gli ugelli vengono spenti e non viene spruzzata acqua sul modulo. Questo ciclo viene ripetuto per 50 volte, in modo tale da raggiungere una condizione⁴.

Con questa pressione si riesce a raffreddare in maniera quasi omogenea circa metà modulo e servono 27 cicli (ovvero 28 min.) per ottenere un valore di temperatura media costante pari a 26.5 °C, con un consumo di acqua pari a 19.8 litri. Inoltre si è potuto osservare che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, diminuisce la sua temperatura da 21°C a 12°C in 30 minuti, il che vuol dire che per gli ultimi 20 cicli (circa 20 min.) il modulo viene raffreddato con acqua a temperatura costante. Da notare che questa diminuzione di temperature dell'acqua è legato al fatto che tutto il tubo di alimentazione si svuota e l'acqua si porta alla sua temperatura di pozzo (come detto prima).

Per quanto riguarda le varie temperature analizzate si evince che la massima temperatura la si misura nel punto 28 (Figura 26), mentre la minima viene riscontrata nel punto M1: per poter confrontare al meglio queste temperature e la temperatura media del modulo con i casi successivi si può introdurre il parametro $X [\frac{^{\circ}C}{min}]$, il quale rappresenta il rapporto tra il ΔT di raffreddamento misurato e il tempo impiegato per raffreddare fino

⁴ Per condizioni stazionarie si intendono quelle condizioni in cui si osserva un andamento del profilo di temperatura di una generica cella variabile in un range di ampiezza massima pari a 2 °C: ad esempio, se la temperatura media è di 28 °C, il suo valore nel tempo dovrà restare all'interno del range che va da 27 °C a 29 °C.

a raggiungere quel valore costante di temperatura. In pratica, X può intendersi come una velocità media di raffreddamento:

- Per la temperatura media esso è pari a $0.75 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$,
- Per la T_{28} che alla fine dei 130 min. di riscaldamento viene misurata pari a 69°C per poi raggiungere un valore di 22.5°C dopo 24 minuti, il fattore X risulta pari a $1.94 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.
- Per la temperatura minima che alla fine della fase di riscaldamento arriva a 28°C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 24 minuti per raggiungere un valore costante pari a 22°C , quindi la cella M1 è anche una delle più lente a raffreddarsi, infatti il fattore X è pari a $0.125 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.

In generale per i vari profili di temperatura è possibile osservare che:

- a. Le celle poste in linea con gli ugelli presentano un buon raffreddamento anche quelle situate a distanza maggiore da essi. Infatti sia la T_{43} che la T_{45} si raffreddano raggiungendo i 25°C circa. Inoltre alla fine dei 50 cicli tra T_{05} e T_{45} (come anche tra T_{08} e T_{43}) si osserva una differenza di temperatura pari a 9°C , quindi tutte le celle alla fine raggiungono un range di temperatura tra i 15°C e 25°C .
- b. Per le celle situate tra due ugelli consecutivi si può osservare un raffreddamento meno efficace rispetto alle celle sotto gli ugelli, infatti da T_{04} a T_{19} si osserva un buon raffreddamento, per la T_{24} le cose peggiorano fino ad ottenere un pessimo raffreddamento per T_{29} e T_{34} mentre la T_{44} viene poco raffreddata.

Ipotizzando un periodo di funzionamento del sistema di raffreddamento operante dalle 10:00 alle 16:00 di una tipica giornata di luglio, settando il sistema a 0.5 bar si ottiene un consumo di acqua di 270 l/giorno (Tabella 5), valore decisamente elevato.

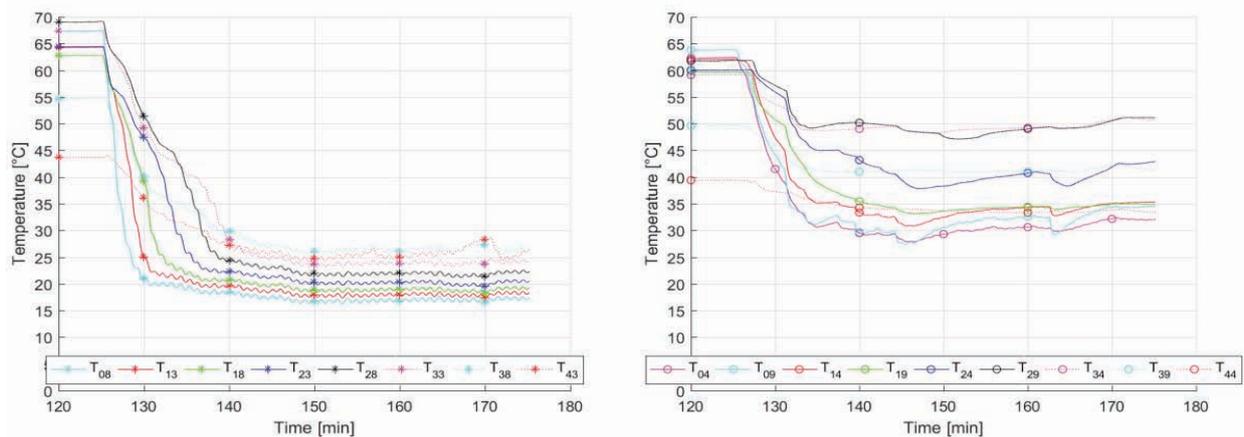


Figura 26 - ciclo 30s ON 30s OFF a pressione di 0.5 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

PRESSIONE = 1 bar

Per questa prova la fase di riscaldamento del pannello ha una durata di 110 minuti, durante la quale la temperatura media del pannello subisce un incremento da 31 °C a 56 °C, ovvero si porta ad una temperatura di 30 °C in più della $T_{AMB.CENTRO}$ (pari a 26 °C costanti per tutta la prova). Si nota che il pannello impiega 80 min. per raggiungere la massima temperatura e, nello stesso tempo, la temperatura dell'acqua subisce un incremento di 7 °C cioè da 15.5 °C a 22.5 °C. Per questa pressione occorrono 24 cicli (ovvero 24 min.) per ottenere un valore di temperatura media costante ad un valore di 24 °C, con un consumo di acqua pari a 22 litri (2.2 litri in più del caso precedente). Inoltre è possibile osservare che nel momento in cui inizia la fase di raffreddamento, l'acqua subisce una diminuzione di temperatura da 22.5°C misurati alla fine del riscaldamento a 13°C costanti in 30 minuti.

Analizzando il fattore X si nota che:

- □ Per la temperatura media risulta pari a $1 \frac{77}{2 \ 22}$,
- □ Per la T_{28} che alla fine dei 110 min. di riscaldamento viene misurata pari a 75.5 °C per poi diminuire ad un valore di 24 °C in 21 min, il fattore X risulta vale $2.45 \frac{77}{2 \ 22}$.
- □ Per la temperatura minima che alla fine della fase di riscaldamento raggiunge i 33 °C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 35 minuti per uniformarsi ad un valore a 22.5 °C, il fattore X è pari a $0.3 \frac{77}{2 \ 22}$.

Per i vari profili termici e possibile osservare che (figura 27):

- a. □ Per le celle in linea con gli ugelli spruzzatori il raffreddamento è molto uniforme, infatti alla fine dei 50 cicli è possibile notare che il ΔT tra T_{08} e T_{43} (come anche tra T_{05} e T_{45}) è di 6 °C, ciò dimostra la maggiore uniformità e incisività del raffreddamento per questa pressione rispetto alla precedente.
- b. □ Per le celle tra due ugelli consecutivi si nota un raffreddamento molto uniforme per tutte le celle, anche la T_{44} subisce un raffreddamento di circa 10 °C. In questo caso, alla fine dei 50 cicli si ha un ΔT tra T_{04} e T_{44} che è di circa 11°C, minore rispetto al caso con pressione di spruzzamento pari a 0.5 bar.

Per questo ciclo a questa pressione, ipotizzando sempre lo stesso periodo di funzionamento di 6 ore (come nel caso precedente), si ottiene un consumo di acqua pari a 351 litri/giorno ovvero 81 litri in più del caso a $p=0.5$ bar. In effetti con il ciclo a $p = 1$ bar si ottiene effettivamente un miglioramento del raffreddamento sia in termini di tempo che di temperatura (basti osservare il fattore X) ma gli 81 litri di acqua in più non ne permetterebbero una reale applicazione.

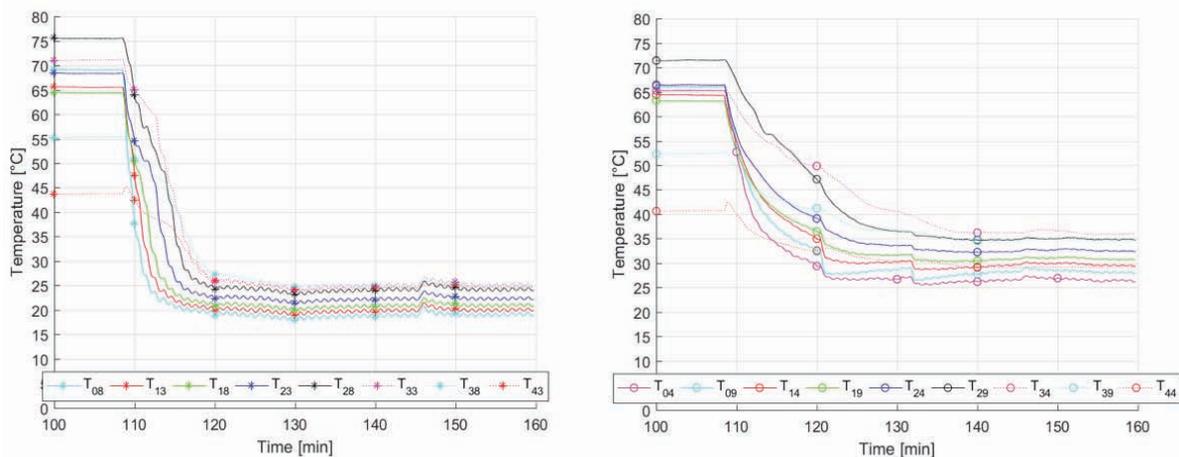


Figura 27 - ciclo 30s ON 30s OFF a pressione di 1 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

PRESSIONE = 1.5 bar

Per questa la fase di riscaldamento del pannello ha una durata di 132 minuti, periodo durante il la temperatura media del modulo aumenta da 36 °C a 58°C, ovvero 31°C in più della $T_{AMB.CENTRO}$ (pari a 27 °C costanti per tutta la prova). Si nota che il pannello impiega 103 min. per raggiungere la massima temperatura e, nello stesso tempo, l'acqua incrementa la sua temperatura da 17 °C a 25°C. Dopo la fase di riscaldamento, inizia quella di raffreddamento: in questo caso la pressione di iniezione dell'acqua viene posta pari a 1.5 bar e, come visto in precedenza, si eseguono 50 cicli. Per questa pressione occorrono 27 cicli (ovvero 27 min.) per ottenere un valore di temperatura media costante di 22.5 °C mentre il consumo di acqua risulta pari 31.4 litri (2.2 litri in più del caso precedente). Inoltre, nel medesimo tempo, si nota che l'acqua subisce un raffreddamento dai 25°C misurati a fine riscaldamento a 14°C costanti.

Per quanto riguarda il fattore X si può evidenziare che:

- Per la temperatura media esso è pari a $1.27 \frac{^{\circ}C}{min}$,
- Per la T_{28} che alla fine dei 130 min. di riscaldamento viene misurata pari a 78 °C per poi diminuire ad un valore di 23 °C in 27 min, il fattore X risulta pari a $2.04 \frac{^{\circ}C}{min}$.
- Per la temperatura minima che alla fine della fase di riscaldamento arriva a 33 °C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 35 minuti per raggiungere un valore costante pari a 23 °C, il fattore X è pari a $0.29 \frac{^{\circ}C}{min}$.

Per i vari profili termici è possibile osservare che:

- a. Per le celle in linea con gli ugelli (figura 28 a sinistra) si ottiene un ΔT tra T_{08} e T_{43} (come anche tra T_{05} e T_{45}) di circa 4 – 5 °C, indice di un'uniformità nel raffreddamento maggiore rispetto ai casi precedenti.
- b. Per le celle tra due ugelli consecutivi (figura 28 a destra) si nota che, per i primi 27 cicli, le temperature da T_{04} a T_{19} si raffreddano in maniera più rapida del caso a $p=1$ bar (ad esempio la T_{04} impiega 2 min. in meno rispetto alla T_{04} misurata a $p=1$ bar, per raggiungere una temperatura di 25

°C), la T_{24} ha un andamento simile alla precedente mentre, da T_{29} a T_{44} , l'andamento è meno costante del caso a $p = 1$ bar. Ciò potrebbe essere dovuto alla presenza di goccioline di acqua che, a causa della loro tensione superficiale, bloccano il film di liquido e non ne permettono la formazione in questa zona. Bisogna attendere il 29° ciclo per poter osservare la formazione del film di acqua anche in questa zona, infatti dalla figura 28 a destra si nota che i profili subiscono un decremento ulteriore della temperatura fino a rimanere costanti.

In questo caso la prima cosa che si nota è che alcune celle si raffreddano in maniera più rapida rispetto al caso $p = 1$ bar, come ad esempio la T_{08} che impiega circa 2 min. in meno per arrivare ai 25 °C, mentre altre in maniera più lenta come la T_{29} che impiega 3 min. in più, ma comunque tutte le celle si portano ad una temperatura più bassa (ciò lo si evince anche dal fattore X). Ipotizzando le 6 ore di funzionamento (10:00 – 16:00) è possibile calcolare un consumo medio giornalieri di acqua pari a 420.66 litri/giorno ovvero 151 litri in più del caso a pressione di 0.5 bar e 70 litri in più del caso a $p=1$ bar.

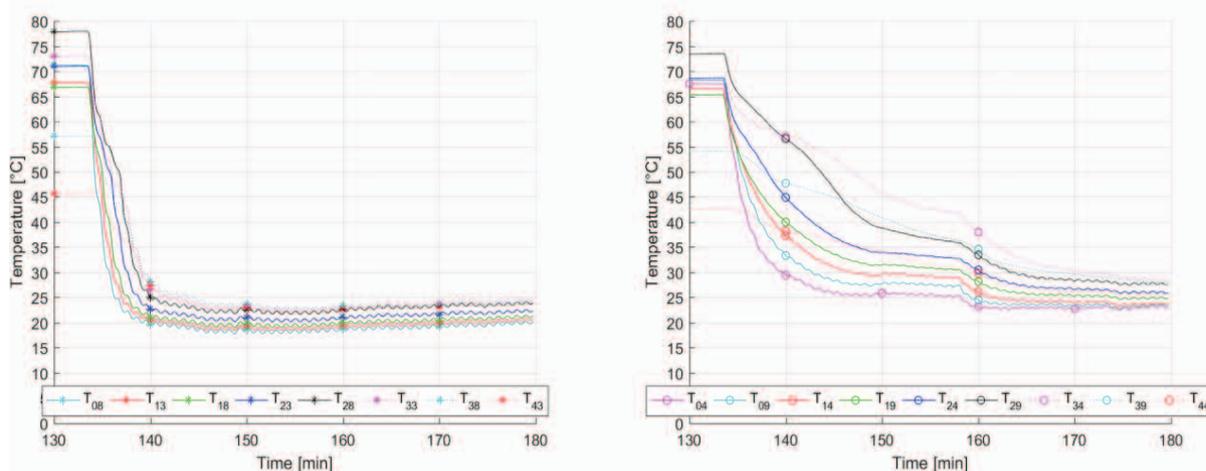


Figura 28 - ciclo 30s ON 30s OFF a pressione di 1.5 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

PRESSIONE = 2 bar

Per questa prova la fase di riscaldamento del pannello ha una durata di 132 minuti, durante la quale il modulo è passato da una temperatura media di 16 °C alla temperatura massima possibile di 55°C, ovvero 29.5 °C in più della $T_{AMB.CENTRO}$, la quale si mantiene

ad un valore costante di 25.5 °C per tutta la fase di riscaldamento. Si nota che il pannello impiega 100 min. per raggiungere la massima temperatura e, nello stesso tempo, l'acqua subisce un riscaldamento da 17 °C a 21°C. Dopo la fase di riscaldamento si inizia a raffreddare il pannello eseguendo 50 cicli 30s ON – 30s OFF a pressione di 2 bar: per questa pressione occorrono 23 cicli (ovvero 23 min.) per ottenere un valore di temperatura media praticamente costante e pari a 22.5 °C (4.5 °C in meno della $T_{AMB.CENTRO}$), con un consumo di acqua pari a 29.7 litri, ovvero 1.7 litri in meno del caso precedente, primo indice di una maggiore uniformità del raffreddamento. Inoltre è possibile osservare che la temperatura dell'acqua impiega 29 minuti per raggiungere il valore di 13°C ovvero 8 °C in meno rispetto alla temperatura di inizio ciclo.

Per quanto riguarda il fattore X si può evidenziare che:

- Per la temperatura media esso è pari a $1.41 \frac{°C}{min}$,
- Per la T_{28} che alla fine dei 130 min. di riscaldamento viene misurata pari a 74.5 °C per poi raggiungere un valore di 21 °C dopo 20 minuti, il fattore X risulta pari a $2.73 \frac{°C}{min}$.
- Per la temperatura minima che alla fine della fase di riscaldamento arriva a 30 °C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 35 minuti per raggiungere un valore costante pari a 22 °C, il fattore X è pari a $0.235 \frac{°C}{min}$.

Per i profili di temperatura è possibile osservare che:

- a. Per le celle in linea con gli ugelli spruzzatori (figura 29 a sinistra) si evince che tutte si portano rapidamente ad una temperatura costante nell'intorno dei 20 °C, infatti il ΔT tra T_{08} e T_{43} (come anche tra T_{05} e T_{45}) è di circa 3.5 – 4 °C; valore simile al caso precedente.
- b. Per le celle tra due ugelli consecutivi (figura 29 a destra) si osserva, nella fase iniziale un andamento decrescente e molto rapido dei profili di temperatura, poi per 4/5 cicli rimangono costanti e infine decrescono fino ad un valore di temperatura costante. Inoltre, si nota che alcune celle vengono raffreddate meno rispetto al caso $p = 1.5$ bar, come ad esempio la T_{29} e la T_{39} che impiegano 3 min. in più per raggiungere la temperatura di 25 °C:

quest'ultimo fenomeno potrebbe essere legato al fatto che a 2 bar la gittata è più alta rispetto alla pressione di 1.5 bar quindi il getto riesce a bagnare anche celle più distanti ma su quest'ultime, per i primi cicli, si ha la formazione di goccioline che riducono il raffreddamento e bloccano la formazione del film di liquido (come detto prima). Bisogna attendere il 13° ciclo (ovvero 13 min.) per poter osservare la formazione del film d'acqua anche su queste celle.

Per quanto riguarda il consumo d'acqua giornaliero si ha che, utilizzando la pressione di 2 bar, la quantità spruzzata è circa 486 l/giorno, valore che escluderebbe ogni possibile applicazione reale.

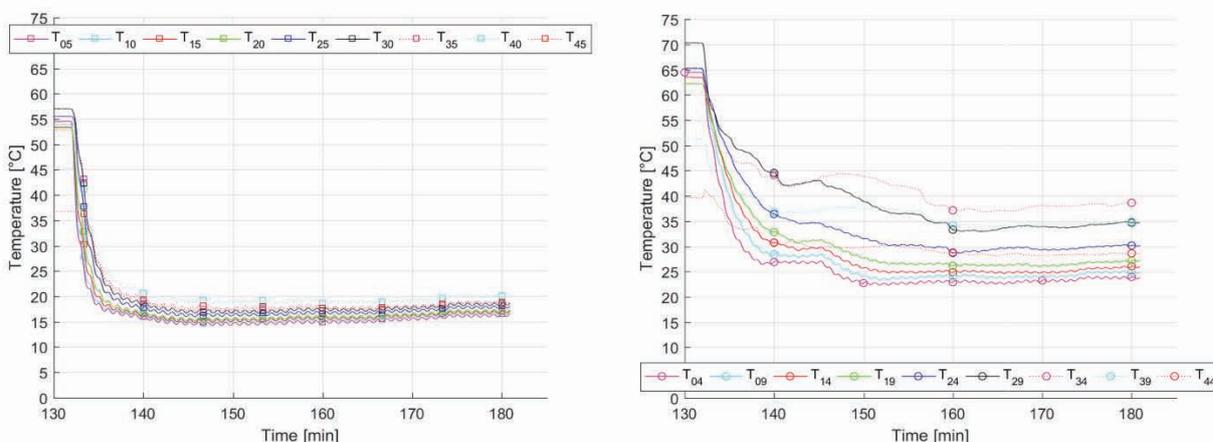


Figura 29 - ciclo 30s ON 30s OFF a pressione di 2 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

CICLO 30s ON - 60s OFF

PRESSIONE = 0.5 bar

In questo test, la fase di riscaldamento ha una durata di 110 minuti, durante la quale la temperatura media del modulo incrementa il suo valore da 22 °C alla temperatura di 54 °C, ovvero 29 °C in più della temperatura $T_{AMB.CENTRO}$ (pari a 25 °C costanti per tutta la durata della prova). Si nota che il pannello impiega 85 min. per raggiungere la massima temperatura media e, nello stesso tempo, l'acqua subisce un riscaldamento da 15.5 °C a 21.5°C. Alla fine della fase di riscaldamento si inizia a raffreddare il pannello eseguendo un ciclo in cui si alterna una fase di raffreddamento della durata di 30s, attraverso l'uso dei tre ugelli spruzzatori alla pressione di 0.5 bar, e una fase di post-

riscaldamento della durata di 60s secondi, in cui gli ugelli vengono spenti e non viene spruzzata acqua sul modulo, infine questo ciclo viene ripetuto per 50 volte.

Per questa pressione occorrono 27 cicli (ovvero 40 min.) per ottenere un valore di temperatura media costante pari a 30 °C, con un consumo di acqua pari 19.8 litri. Inoltre si osserva che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, subisce un raffreddamento da 21.5 °C a 12°C in 34 minuti, il che vuol dire che per gli ultimi 13 cicli (19 min.) il modulo viene raffreddato con acqua a temperatura costante.

Per quanto riguarda le varie temperature analizzate si evince che la massima temperatura viene sempre misurata nel punto 28 (Figura 30) mentre la minima nel punto M1. Per quanto riguarda il fattore X si può evidenziare che:

- Per la temperatura media esso è pari a $0.6 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$,
- Per la T_{28} che alla fine dei 110 min. di riscaldamento viene misurata pari a 71 °C per poi raggiungere un valore di 27 °C dopo 49 minuti, il parametro X risulta pari a $0.9 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.
- Per la temperatura minima che alla fine della fase di riscaldamento arriva a 30 °C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 34 minuti per raggiungere un valore costante pari a 27 °C, il fattore X è pari a $0.09 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.

In generale per i vari profili di temperatura è possibile osservare che (figura 30):

- a. Le celle in corrispondenza degli ugelli spruzzatori (figura 30 a sinistra) si raffreddano in maniera uniforme e raggiungono la medesima temperatura. Infatti tra T_{05} e T_{45} c'è un ΔT pari a 10 °C e lo stesso si verifica tra T_{08} e T_{43} nonostante ci sia una perdita di carico di 0.125 bar tra il primo ugello (che bagna la colonna $T_{05} - T_{45}$) e il secondo ugello (che bagna la colonna $T_{08} - T_{43}$).
- b. Le celle che si trovano tra due ugelli consecutivi (figura 30 a destra) subiscono un raffreddamento poco uniforme; infatti da T_{04} a T_{19} il raffreddamento è minore rispetto a $T_{05} - T_{45}$ ma costante mentre da T_{24} a T_{39} si nota un pessimo raffreddamento e le cose peggiorano sempre più fino a

T_{44} sulla quale si riesce ad ottenere un ΔT di raffreddamento di circa 5°C , trascurabile rispetto agli altri.

Per questa pressione quindi c'è un forte sbilanciamento delle temperature delle celle, metà pannello viene raffreddato quasi uniformemente, mentre l'altra metà subisce un minore raffreddamento. Inoltre, considerando un periodo di funzionamento di 6 ore (10:00 – 16:00), si può calcolare un consumo di acqua pari a 180 l/giorno, ancora troppi per un'applicazione reale.

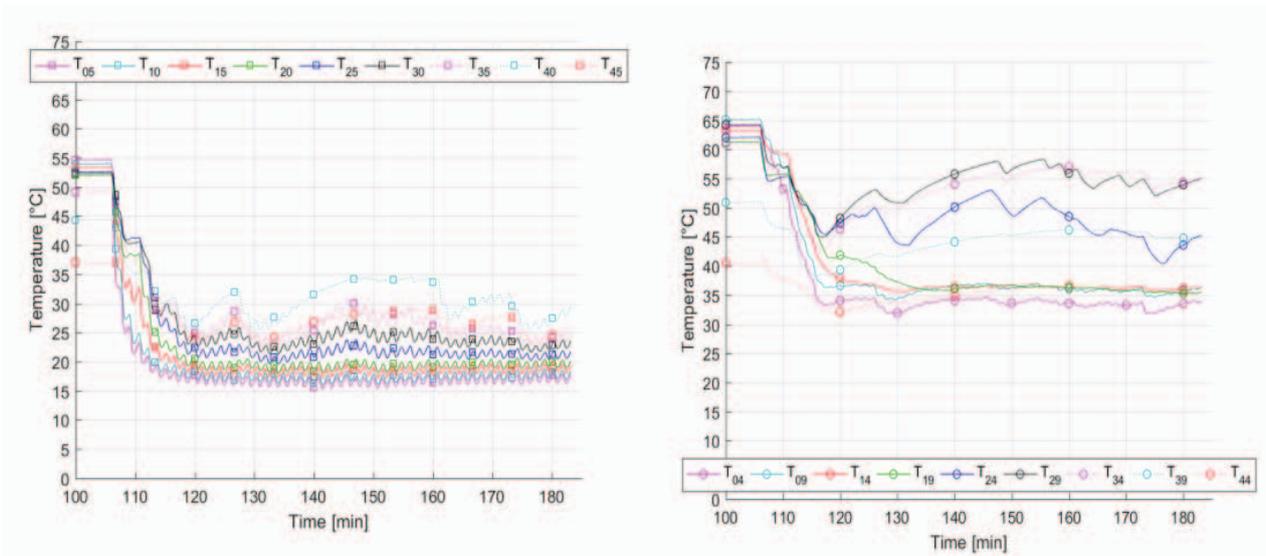


Figura 30 - ciclo 30s ON 60s OFF a pressione di 0.5 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

PRESSIONE = 1 bar

In questa prova la fase di riscaldamento ha una durata di 180 minuti, durante la quale la temperatura media subisce un riscaldamento da 32.5°C alla temperatura massima possibile di circa 57.5°C , ovvero 30°C in più della $T_{\text{AMB.CENTRO}}$ (pari a 27.5°C costanti per tutta la fase di riscaldamento). Si nota che il pannello impiega 120 min. per raggiungere la massima temperatura e, nello stesso tempo, l'acqua subisce un riscaldamento da 15°C a 25°C . Dopo la fase di riscaldamento si inizia a raffreddare il pannello eseguendo gli stessi 50 cicli della prova precedente ma a pressione di 1 bar: per questa pressione occorrono 24 cicli (ovvero 36 min.) per ottenere un valore di temperatura media costante e pari a 30°C , con un consumo di acqua pari a 25.8 litri (circa 6 litri in più del caso precedente). Inoltre è possibile osservare che nel momento in cui inizia la fase di

raffreddamento, l'acqua subisce un raffreddamento di 9 °C, da 25°C a 14°C in 40 minuti. Per quanto riguarda il fattore X si può evidenziare che:

- Per la temperatura media esso è pari a $0.77 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$,
- Per la T_{28} (massima temperatura) che alla fine dei 180 min. di riscaldamento viene misurata pari a 77 °C per poi raggiungere un valore di 27 °C dopo 45 minuti, il parametro X risulta pari a $1.11 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.
- Per la temperatura minima (punto M1) che alla fine della fase di riscaldamento arriva a 30 °C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 50 minuti per raggiungere un valore costante pari a 25.5 °C, il fattore X è pari a $0.15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.

Per i vari profili termici è possibile dire che:

- a. Per le celle in linea con gli ugelli spruzzatori (figura 31 a sinistra) valgono le stesse considerazioni fatte per la pressione di 0.5 bar.
- b. Per le celle situate tra due ugelli consecutivi (figura 31 a destra) si nota che, fino alla T_{19} , il raffreddamento è abbastanza uniforme mentre per quelle sottostanti il punto 19 si osserva che: per i primi 40 cicli (ovvero 60 min.) i punti T_{24} a T_{39} subiscono un pessimo raffreddamento però dal 40esimo ciclo in poi il loro raffreddamento è molto rapido, infatti in 10 cicli (gli ultimi 15 min.) subiscono tutto un raffreddamento di circa 15 °C. Tutto ciò è sempre legato alla presenza di goccioline che bloccano il film, come già osservano nei casi precedenti. La T_{44} , invece, non viene praticamente raffreddata

In questo caso, rispetto al precedente, lo sbilanciamento termico del pannello risulta molto meno evidente soprattutto negli ultimi 10 cicli: bisogna osservare che il fattore X, calcolato per la temperatura media, la massima e la minima del modulo, è inferiore a quello calcolato nel caso a pressione di 0.5 bar però questo è legato al fatto che l'acqua, per questa prova a $p = 1$ bar, risulta essere ad una temperatura più alta per tutta la fase di raffreddamento. Considerando le 6 ore di funzionamento come nei casi precedenti, è possibile stimare un consumo d'acqua giornaliero pari a 234 l/giorno.

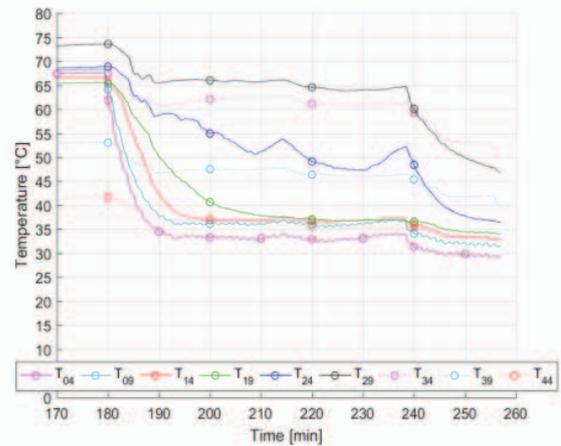
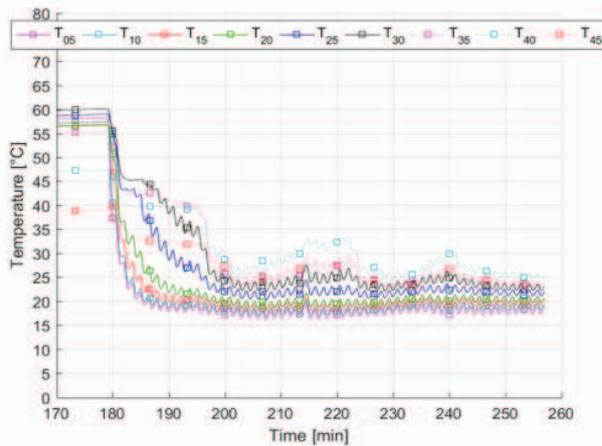


Figura 31 - ciclo 30s ON 60s OFF a pressione di 1 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

PRESSIONE = 1.5 bar

Per questa prova si esegue una fase di riscaldamento della durata di 134 minuti. Durante questa fase la temperatura media del pannello cresce dai 17 °C iniziali ai 55 °C, ovvero 30 °C in più della $T_{AMB.CENTRO}$ (pari a 25 °C costanti per tutta la fase di riscaldamento). Si nota che il pannello impiega 120 min. per raggiungere la massima temperatura e, nello stesso tempo, l'acqua incrementa la sua temperatura da 16 °C a 22 °C. Dopo la fase di riscaldamento si inizia a raffreddare il pannello eseguendo gli stessi 50 cicli della prova precedente ma a pressione di 1.5 bar: per questa pressione servono 23 cicli (ovvero 34 min.) per ottenere un valore di temperatura media costante ad un valore di 25°C, con un consumo di acqua pari a 26.7 litri (0.9 litri in più del caso precedente). Inoltre è possibile osservare che nel momento in cui inizia la fase di raffreddamento, l'acqua subisce un raffreddamento di 8°C, passando da 22 °C a 14°C costanti in 34 minuti.

Per quanto riguarda il fattore X si può evidenziare che:

- □ Per la temperatura media esso è pari a $1.13 \frac{22}{25}$,
- □ Per la T_{28} (temperatura massima) che alla fine dei 134 min. di riscaldamento viene misurata pari a 75.5 °C per poi raggiungere un valore di 25 °C dopo 34 minuti, il parametro X risulta pari a $1.46 \frac{22}{25}$.
- □ Per la temperatura minima (punto M1) che alla fine della fase di riscaldamento arriva a 30 °C e impiega, nella successiva fase di

raffreddamento, 34 minuti per raggiungere un valore costante pari a 25 °C, il fattore X è pari a $0.147 \frac{27}{22}$.

Per i vari profili termici è possibile dire che (figura 32):

- a. □ Le celle in corrispondenza degli ugelli spruzzatori subiscono un buon raffreddamento, migliore sia del caso a p=0.5 bar che di quello a p=1 bar non tanto in termini di temperatura (le celle raggiungono più o meno la stessa temperatura) ma di tempo: le celle raggiungono una temperatura più bassa in meno tempo, infatti ci vogliono 10 cicli (ovvero 15 min.) per ottenere un ΔT di raffreddamento pari a 30-35°C, mentre nei casi precedenti ne servono 15 (ovvero 23 min.) per ottenere un buon ΔT di raffreddamento (tra i 25 °C e i 35°C)

- b. □ Per quanto riguarda le celle tra due ugelli consecutivi da T₀₄ a T₃₉, rispetto ai casi precedenti, il raffreddamento migliora moltissimo, non si osserva alcun andamento altalenante di temperatura come nei casi precedenti: per tutte queste celle si riesce ad ottenere un ΔT di raffreddamento pari a 30 °C. Inoltre, anche la T₄₄ si raffredda molto di più rispetto alla pressione di 0.5 bar e 1 bar (ΔT di raffreddamento pari a 15 °C)

Per questa pressione, in generale, già dopo 17-18 cicli (ovvero 27 min.) è possibile ottenere un buon raffreddamento del modulo, anche se i consumi d'acqua sono ancora una volta importati: considerando le 6 ore di funzionamento giornaliero, il consumo d'acqua si attesta a 280.44 litri/giorno.

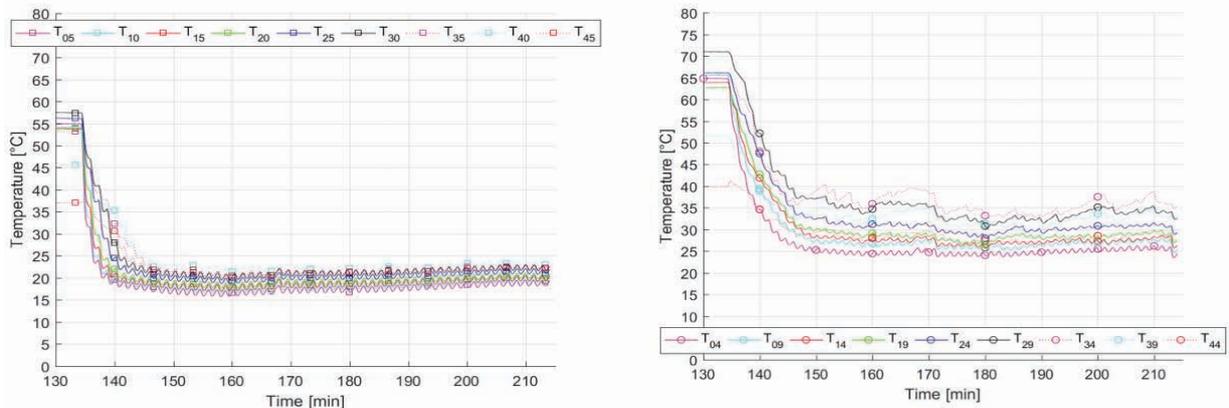


Figura 32 - ciclo 30s ON 60s OFF a pressione di 1.5 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

PRESSIONE = 2 bar

Per questa prova la fase di riscaldamento del pannello ha una durata di 131 minuti, durante la quale la temperatura media del pannello subisce un incremento da 27 °C alla temperatura massima possibile di 55.5 °C, ovvero 30 °C in più della $T_{AMB.CENTRO}$ (pari a 25.5 °C costanti per tutta la fase di riscaldamento). Si nota che il pannello impiega 120 min. per raggiungere la massima temperatura e, nello stesso tempo, l'acqua subisce un riscaldamento da 15 °C a 21.5 °C. Dopo la fase di riscaldamento si eseguono gli stessi 50 cicli ON- OFF della prova precedente, ma a pressione di 2 bar: per questa pressione servono 21 cicli (ovvero 32 min.) per ottenere un valore di temperatura mediocostante ad un valore di 23.5 °C, con un consumo di acqua stimato di 28.35 litri (1.65 litri in più del caso precedente). Si osservi inoltre che nel momento in cui inizia la fase di raffreddamento, l'acqua si raffredda da 21.5 °C a 13.5 °C costanti in 32 minuti.

Per quanto riguarda il fattore X si può evidenziare che:

- Per la temperatura media esso è pari a $1 \frac{^{\circ}C}{min}$,
- Per la T_{28} (massima temperatura) che alla fine dei 131 min. di riscaldamento viene misurata pari a 75 °C per poi raggiungere un valore di 24.5 °C dopo 37 minuti, il parametro X risulta di $1.36 \frac{^{\circ}C}{min}$.
- Per la temperatura minima (punto M1) che alla fine della fase di riscaldamento arriva a 30 °C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 40 minuti per raggiungere un valore costante pari a 23 °C, il fattore X è pari a $0.175 \frac{^{\circ}C}{min}$.

Per i vari profili termici è possibile osservare che (figura 33):

- a. Per le celle in corrispondenza degli ugelli spruzzatori è possibile osservare che già dopo 7 cicli (10 min.) il ΔT di raffreddamento risulta pari a 40 °C.
- b. Per le celle tra due ugelli consecutivi bisogna mettere in evidenza una cosa: confrontando questo ciclo con quello a pressione di 0.5 bar e 1 bar si nota un'uniformità maggiore del raffreddamento e le tempistiche sono inferiori mentre, confrontandolo con quello a pressione di 1.5 bar, si evince di sicuro una maggiore costanza ed uniformità nel raffreddamento ma le temperature

si attestano nel range 25-40 °C dopo 16 cicli (24 min.) mentre a 1.5 bar ne bastano 7 (10 min.). Tutto ciò potrebbe essere legato alla presenza di goccioline e alla maggior gittata del getto come già detto osservato in precedenza per le celle tra due ugelli consecutivi. Dopo 20 cicli (30 min.) la quantità di acqua presente sul pannello è tale da vincere le forze di tensione superficiale provocate dalle goccioline e porta alla formazione del film anche in questa zona (figura 33).

Considerando un periodo di funzionamento pari a 6 ore giornaliere (come in tutti i casi analizzati) si ottiene un consumo di acqua giornaliero pari a 324 l/giorno, valore molto alto e del tutto inutilizzabile per applicazioni reali.

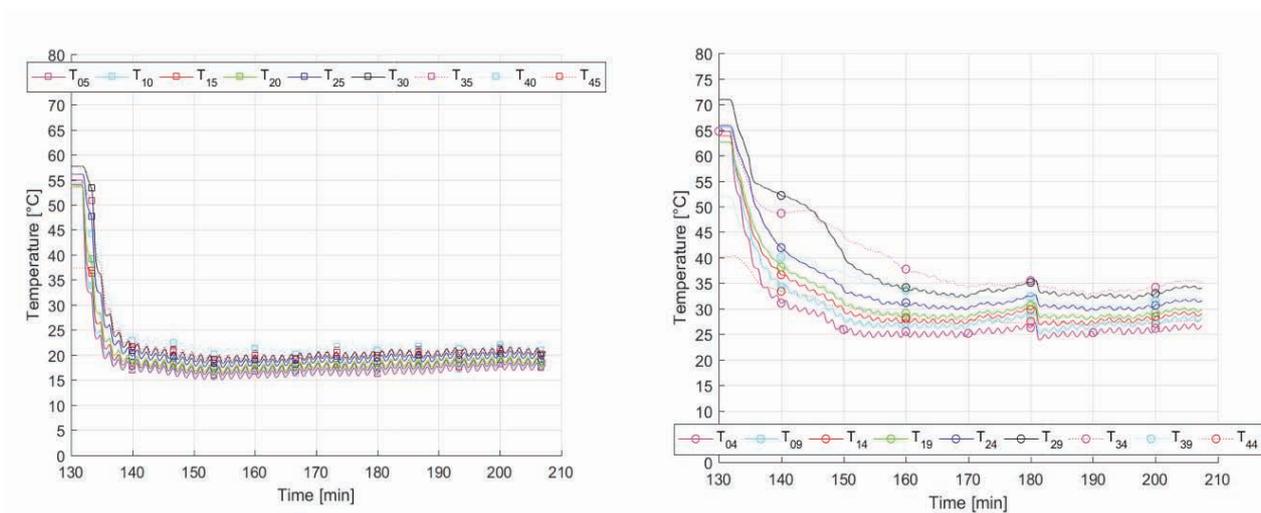


Figura 33 - ciclo 30s ON 60s OFF a pressione di 2 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

CICLO 30s ON - 120s OFF

PRESSIONE = 0,5 bar

Per la seguente prova si la fase di riscaldamento è durata 110 minuti, periodo durante la quale la temperatura media del pannello subisce un incremento da 27 °C a 55 °C, ovvero 30 °C in più della $T_{AMB.CENTRO}$ (pari a 25 °C costanti per tutta la durata della prova). Si nota che il pannello impiega 90 min. per raggiungere la massima temperatura media e, nello stesso tempo, l'acqua subisce un riscaldamento da 15 °C a 21.5°C. Alla fine della fase di riscaldamento si inizia a raffreddare il pannello eseguendo un ciclo in

cui si alterna una fase di raffreddamento della durata di 30s, attraverso l'uso dei tre ugelli spruzzatori alla pressione di 0.5 bar, e una fase di post-riscaldamento della durata di 120s secondi, in cui gli ugelli vengono spenti e non viene spruzzata acqua sul modulo, infine questo ciclo viene ripetuto per 50 volte.

Per questa pressione servono 29 cicli (ovvero 73 min.) per ottenere un valore di temperatura media ostante pari a 34 °C, con un consumo di acqua di 21.2 litri. Inoltre si osserva che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, si raffredda da 21.5 °C a 14°C in 12 minuti, il che vuol dire che per quasi tutta la fase di raffreddamento il modulo viene raffreddato con acqua a temperatura costante.

Per quanto riguarda le varie temperature analizzate si nota che la massima temperatura la si misura sempre nel punto 28 (figura 34) mentre la minima si misura in corrispondenza del punto M1. Per quanto riguarda il fattore X si può evidenziare che:

- Per la temperatura media esso è pari a $0.29 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$,
- Per la T_{28} (massima temperatura) che alla fine dei 110 min. di riscaldamento viene misurata pari a 75 °C per poi raggiungere un valore di 35 °C dopo 65 minuti, il parametro X risulta pari a $0.615 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.
- Per la temperatura minima (punto M1) che alla fine della fase di riscaldamento raggiunge i 31 °C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 34 minuti per assestarsi ad un valore costante di 27 °C, il fattore X risulta pari a $0.032 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.

In generale per i vari profili di temperatura è possibile osservare che per la maggior parte delle celle il raffreddamento sembrerebbe discreto ma ce ne sono alcune su cui si alternano periodi di riscaldamento e periodi di raffreddamento (figura 34):

- a. Per le celle in linea con ugelli si nota un buon raffreddamento anche se, nella parte finale la T_{28} , T_{33} e T_{38} subiscono prima un lieve riscaldamento per poi raffreddarsi di nuovo. Questo fenomeno non lo si osserva però nel caso delle celle T_{05} - T_{45} anche se i loro profili di temperatura risultano meno uniformi, soprattutto nella parte bassa del modulo (questo fenomeno verrà analizzato in seguito).

b. □ Per le celle tra due ugelli consecutivi si nota che T_{04} e T_{09} hanno andamenti abbastanza accettabili, le T_{14} e T_{19} si stabilizzano ad un valore costante dopo circa 25 cicli ovvero 62.5 min, mentre da T_{24} a T_{44} il raffreddamento è pessimo con andamenti per nulla lineari. Rispetto ai cicli 30s ON – 30s OFF e 30s ON – 60s OFF il raffreddamento è meno lineare con temperature più alte.

Per quanto riguarda il consumo d'acqua considerando le 6 ore di raffreddamento, il sistema richiede 108 litri/giorno, sicuramente meno dei casi precedenti ma ancora difficilmente sostenibile dal punto di vista economico ed ambientale.

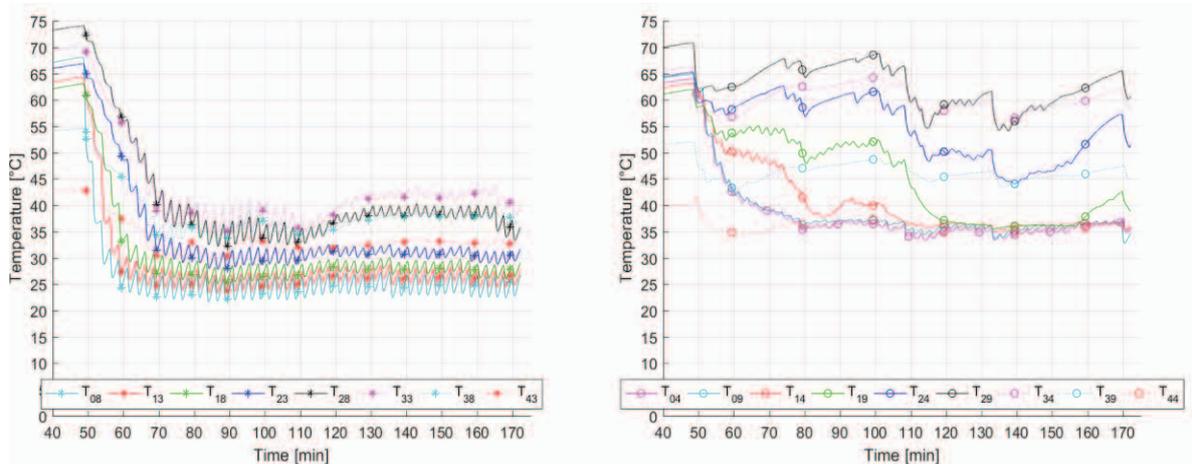


Figura 34 - ciclo 30s ON 120s OFF a pressione di 0.5 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

PRESSIONE = 1 bar

Per la seguente prova la fase di riscaldamento del pannello è durata 140 minuti, periodo durante la quale la temperatura media del pannello subisce un incremento da 16 °C a 55.5 °C, ovvero 30 °C in più della $T_{AMB.CENTRO}$ (pari a 25.5 °C costanti per tutta la durata della prova). Si nota che il pannello impiega 100 min. per raggiungere la massima temperatura media e, nello stesso tempo, l'acqua subisce un incremento di temperatura da 15 °C a 22.5°C. Alla fine della fase di riscaldamento si eseguono 50 cicli cicli 30s ON-120s OFF a pressione di 1 bar: per questa pressione occorrono 26 cicli (ovvero 68 min.) per ottenere un valore di temperatura media costante pari a 32.5 °C, con un consumo d'acqua di 24.9 litri. Inoltre si osserva che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il

sistema di raffreddamento, subisce un raffreddamento di 7.5 °C da 22.5 °C a 15°C in 3 minuti, il che significa che per tutta la fase di raffreddamento il modulo viene raffreddato con acqua a temperatura costante e quindi lavora ad un rendimento alto per tutta la prova.

Per quanto riguarda le varie temperature analizzate si evince che la massima temperatura la si misura sempre nel punto 28 mentre la minima nel punto M1. Dal calcolo del fattore X si può evidenziare che:

- Per la temperatura media esso è pari a $0.272 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$,
- Per la T_{28} che alla fine dei 140 min. di riscaldamento viene misurata pari a 76 °C per poi raggiungere un valore di 34 °C dopo 62 minuti, il parametro X risulta pari a $0.67 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.
- Per la temperatura minima (punto M1) che alla fine della fase di riscaldamento raggiunge i 31 °C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 49 minuti per raggiungere un valore costante pari a 28 °C, il fattore X risulta pari a $0.061 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ (il doppio rispetto al caso con pressione di 0.5 bar).

In questo caso si nota un netto miglioramento negli andamenti di tutte le temperature, non si verificano più periodi alternati di riscaldamento e raffreddamento e si raggiungono temperature pressoché costanti già dopo 40 min. (17 cicli):

- a. Per le celle in corrispondenza degli ugelli spruzzatori (figura 35 a sinistra) si evince un buon raffreddamento con $\Delta T_{\text{raffreddamento}}$ pari a 24°C tranne per la T_{45} che subisce un raffreddamento inferiore. Rispetto al ciclo 30s ON – 30s OFF e al 30s ON – 60s OFF si può affermare quanto osservato nel caso a pressione di 0.5 bar.
- b. Per le celle presenti tra due ugelli consecutivi (figura 35 a destra) si nota un raffreddamento abbastanza uniforme per T_{04} , T_{09} e T_{14} , per T_{19} fino a T_{39} il raffreddamento è meno uniforme mentre la T_{44} subisce un minor raffreddamento. Rispetto al ciclo 30s ON – 30s OFF il raffreddamento è meno uniforme e molto più lento mentre, mentre rispetto al 30s ON – 60s

OFF il raffreddamento è più uniforme, in contrapposizione con quello che ci si aspetta.

Per quanto riguarda il consumo d'acqua giornaliero esso è pari a 140.4 litri/giorno.

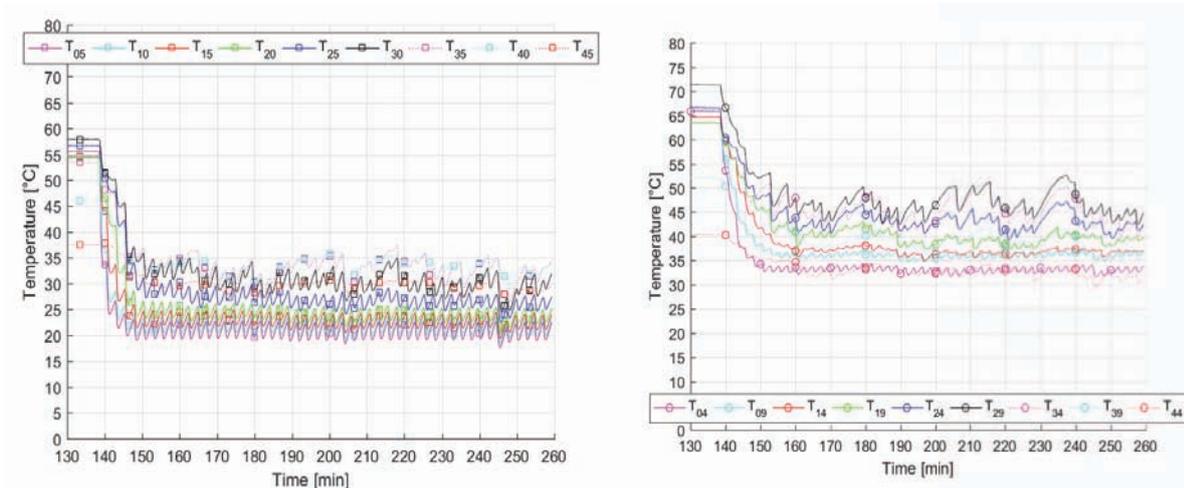


Figura 35 - ciclo 30s ON 120s OFF a pressione di 1 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

PRESSIONE = 1.5 bar

Per il test seguente si la fase di riscaldamento del pannello è durata 131 minuti, durante la quale la temperatura media del pannello subisce un incremento da 31 °C a 57.5 °C, ovvero 30-32 °C in più della $T_{AMB.CENTRO}$ la quale, partendo da 25 °C, si riscalda fino a 27.5 °C costanti alla fine dei 131 minuti. Si nota che il pannello impiega 100 min. per raggiungere la massima temperatura media e, nello stesso tempo, l'acqua si riscalda da 17 °C a 24°C. Alla fine della fase di riscaldamento si eseguono 50 cicli 30s ON- 120s OFF a pressione di 1.5 bar: per questa pressione ci vogliono circa 24 cicli (ovvero 62 min.) per ottenere un valore di temperatura media circa costante pari a 29.5 °C, con un consumo d'acqua di 27.9 litri (ovvero 3 litri in più del caso precedente). È possibile inoltre notare che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, si raffredda da 24 °C a 16.5°C in 4 minuti, il che significa operare con temperatura dell'acqua costante: un vantaggio che garantisce una costante ed elevata produzione elettrica del modulo.

Per quanto riguarda il fattore X si può evidenziare che:

- □ Per la temperatura media esso è pari a $0.6 \frac{77}{77}$,

- Per la T_{28} (massima temperatura) che alla fine dei 131 min. di riscaldamento viene misurata pari a $77.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ per poi raggiungere un valore di $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ costante dopo 50 minuti, il parametro X risulta pari a $0.87\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.
- Per la temperatura minima (punto M1) che alla fine della fase di riscaldamento raggiunge i $32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 68 minuti per raggiungere un valore costante pari a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, il fattore X è pari a $0.11\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.

Come si può ben notare in figura 36, in questo caso i profili di temperatura sono molto omogenei tra loro e tendono a raggiungere un valore di temperatura costante già dopo 17 cicli (ovvero 43 min.):

- a. Per le celle in corrispondenza degli ugelli spruzzatori (figura 36 a sinistra) si osserva un buon raffreddamento con $\Delta T_{\text{raffreddamento}}$ pari a 28°C ($4\text{ }^{\circ}\text{C}$ in più rispetto alla pressione di 1 bar). Le celle situate nella parte più bassa del modulo, rispetto al caso precedente, vengono maggiormente raffreddate. Anche per questo caso rispetto al ciclo 30s ON – 30s OFF e al 30s ON – 60s OFF si può dire lo stesso di $p=0.5$ bar.
- b. Per le celle tra due ugelli consecutivi (figura 36 a destra) si riesce ad ottenere un buon raffreddamento anche se si raggiungono temperature più alte rispetto ai cicli precedenti ($4\text{-}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ di differenza dovuti alla maggiore temperatura dell'acqua utilizzata per lo spruzzamento): rispetto al ciclo 30s ON – 30s OFF, in cui le celle non vengono bagnate allo stesso modo, il raffreddamento è più lento ma molto più uniforme mentre, rispetto al ciclo 30s ON – 60s OFF il raffreddamento è meno uniforme.

Per quanto riguarda il consumo d'acqua nelle 6 ore giornaliere ipotizzate (10:00 – 16:00), esso risulta pari a 168.3 litri/giorno.

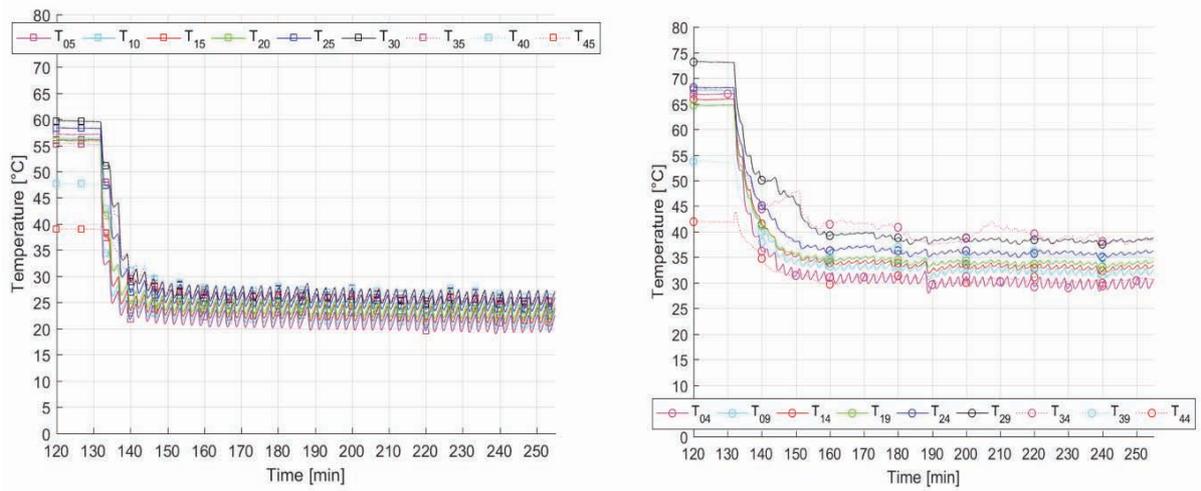


Figura 36 - ciclo 30s ON 120s OFF a pressione di 1.5 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

PRESSIONE = 2 bar

Per il test seguente la fase di riscaldamento del pannello è durata 130 minuti, durante periodo durante il quale la temperatura media del modulo subisce un incremento da 16 °C (pari alla temperatura misurata sotto al pannello) a 55.5 °C, ovvero 30.5 °C in più della $T_{AMB.CENTRO}$ che rimane costante a 25 °C per tutta la prova. Si nota che il pannello impiega 120 min. per raggiungere la massima temperatura media e, nello stesso tempo, l'acqua si riscalda da 14 °C a 22.5°C. Alla fine della fase di riscaldamento si eseguono 50 cicli 30s ON- 120s OFF a pressione di 2 bar: per questa pressione occorrono 22 cicli (ovvero 58 min.) per ottenere un valore di temperatura media costante pari a 27.5 °C, con un consumo d'acqua di 29.7 litri (ovvero 1.8 litri in più del caso precedente). È possibile inoltre notare che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, subisce un raffreddamento da 22.5°C a 14°C in 5 minuti, il che vuol dire lavorare anche in questo caso con acqua a temperatura costante per tutta la fase di raffreddamento.

Per quanto riguarda il fattore X si può evidenziare che:

- □ Per la temperatura media esso è pari a $0.483 \frac{[27]}{[22]}$,
- □ Per la T_{28} (massima temperatura) che alla fine dei 130 min. di riscaldamento viene misurata pari a 75.5 °C per poi raggiungere un valore di 29 °C costante dopo 49 minuti, il parametro X risulta pari a $0.95 \frac{[27]}{[22]}$.

- □ Per la temperatura minima (punto M1) che alla fine della fase di riscaldamento raggiunge i 30 °C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 34 minuti per raggiungere un valore costante pari a 25 °C, il fattore X è pari a $0.147 \frac{[27]}{[27]}$ (poco più alto di 0.11 °C/min calcolati per la temperatura minima nel caso precedente)

Per questa pressione, i profili di temperatura non migliorano molto rispetto a p=1.5 bar anzi, su alcune celle, si verifica un raffreddamento meno uniforme (figura 37):

- Per le celle in corrispondenza degli ugelli vale quanto detto a p=1.5 bar.
- Per le celle tra due ugelli consecutivi si nota un raffreddamento maggiore e più rapido rispetto ai casi con pressioni di 0.5 bar, 1 bar e 1.5 bar. Una cosa importante da evidenziare (che si verifica anche per gli altri cicli a questa pressione) è il fatto che i profili di temperature nei punti 29 e 34 sono meno uniformi rispetto al caso precedente con p=1.5 bar: questo fenomeno potrebbe essere causato dallo stesso fenomeno che si evince a p = 2 bar del ciclo 30s ON – 30s OFF, ovvero che la gittata è più alta rispetto alla pressione di 1.5 bar quindi il getto riesce a bagnare anche celle più distanti ma su quest'ultime, per i primi cicli, si ha la formazione di goccioline che riducono e/o bloccano la formazione del film di liquido, rendendo il raffreddamento poco uniforme.

Per quanto riguarda il consumo d' acqua giornaliero stimato risulta pari a 194.4 litri/giorno.

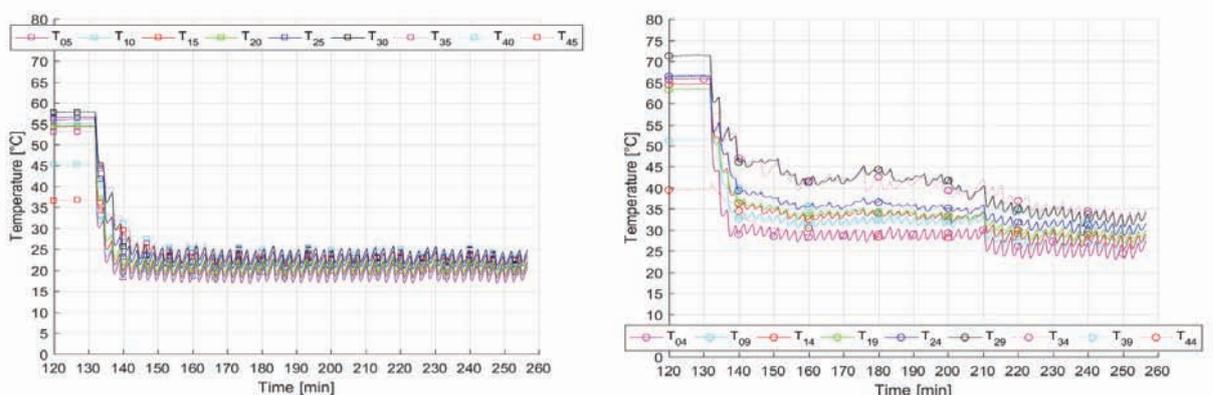


Figura 37 - ciclo 30s ON 120s OFF a pressione di 2 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

CICLO 30s ON - 180s OFF

PRESSIONE = 0,5 bar

Per la seguente prova la fase di riscaldamento del pannello è durata 135 minuti, durante la quale la temperatura media del pannello subisce un incremento da 17.5 °C (pari alla temperatura misurata sotto il modulo) a 57 °C, ovvero 30 °C in più della $T_{AMB.CENTRO}$ la quale, partendo da 25 °C, si riscalda fino a 27 °C costanti dopo 50 min. dall'inizio del test. Si nota che il pannello impiega 100 min. per raggiungere la massima temperatura media e, nello stesso tempo, l'acqua subisce un incremento di temperatura da 17 °C a 24°C. Alla fine della fase di riscaldamento si eseguono 50 cicli cicli 30s ON- 180s OFF a pressione di 0.5 bar: per questa pressione servono 21 cicli (ovvero 75 min.) per ottenere un valore di temperatura media costante pari a 39 °C, con un consumo d'acqua di 15.3 litri. Inoltre si osserva che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, subisce un raffreddamento di 8°C, ovvero da 24 °C a 16°C, 15 minuti, il che significa operare con temperatura dell'acqua costante: un vantaggio che garantisce una costante ed elevata produzione elettrica del modulo.

Per quanto riguarda le varie temperature analizzate si evince che la massima temperatura la si misura sempre nel punto 28 (Figura 38) mentre la minima nel punto M1. Per quanto riguarda il fattore X si può evidenziare che:

- Per la temperatura media esso è pari a $0.29 \frac{^{\circ}C}{min}$,
- Per la T_{28} che alla fine dei 135 min. di riscaldamento viene misurata pari a 77.5 °C per poi raggiungere un valore di 50 °C costante dopo 100 minuti, il parametro X risulta pari a $0.275 \frac{^{\circ}C}{min}$, bisogna però evidenziare che questa temperatura non presenta un profilo costante ed il parametro X è stato calcolato considerando un valore medio raggiunto dalla temperatura T_{28} , infatti, nella fase finale del raffreddamento, questa temperatura raggiunge anche i 43 °C per poi risalire a 50 °C.
- Per la temperatura minima la quale alla fine della fase di riscaldamento raggiunge i 32 °C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 92 minuti per raggiungere un valore costante pari a 30 °C, il fattore X si attesta ad un valore pari a $0.022 \frac{^{\circ}C}{min}$

Analizzando i profili di temperatura si nota la scarsa uniformità nel raffreddamento per circa metà superficie del modulo (figura 39):

- a. □ Le celle in corrispondenza degli ugelli spruzzatori sono tutte abbastanza raffreddate fino a T_{18} mentre, da T_{23} a T_{43} , il raffreddamento è meno uniforme e costante, infatti la T_{43} risulta poco raffreddata (ΔT_{RAFF} pari a 5 °C)
- b. □ Le celle situate tra due ugelli consecutivi sono poco raffreddate: da T_{04} a T_{14} subiscono un buon raffreddamento, ma da T_{19} a T_{39} il raffreddamento è poco incisivo fino ad arrivare al punto 44 dove l'azione del sistema di raffreddamento risulta praticamente inesistente. Inoltre, dall'osservazione di figura 38, si nota che nella parte finale, tutte le celle presenti su questa colonna subiscono un incremento di temperatura e ciò potrebbe essere legato alla formazione di calcare. Nella parte alta del modulo, dove la velocità dell'acqua è maggiore, il film di calcare riduce la trasmittanza ottica del vetro ma non impedisce al film di formarsi mentre nella parte bassa il calcare impedisce la formazione del film d'acqua bloccando e deviandolo (figura 38).



Figura 38 - Formazione di calcare nel ciclo 30s ON - 180s OFF alla pressione di 0.5 bar.

Per quanto riguarda il consumo d'acqua giornalieri, esso si assesta pari a 77.2 litri/giorno.

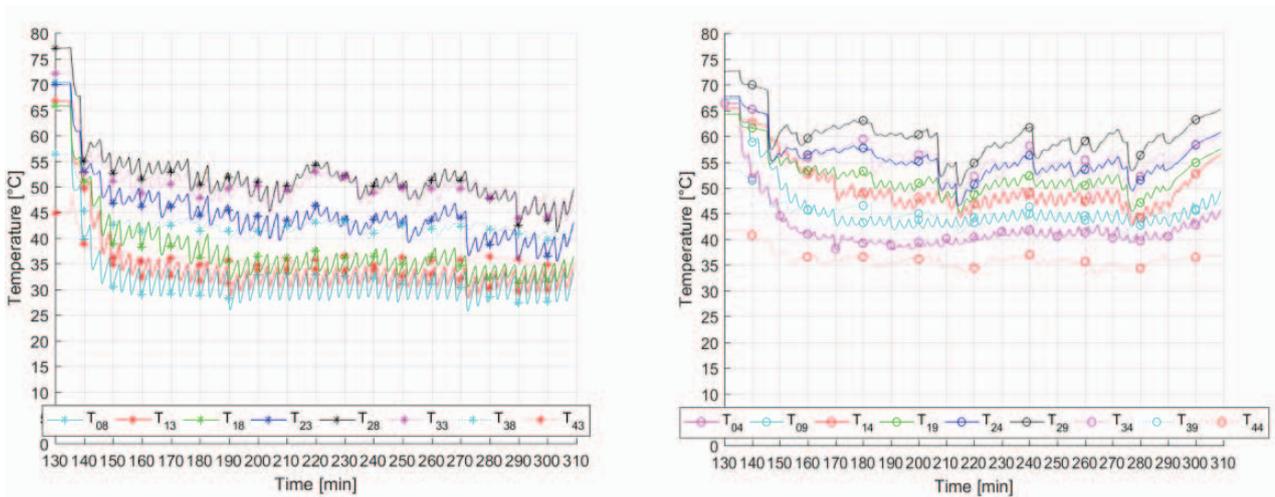


Figura 39 - ciclo 30s ON 180s OFF a pressione di 0.5 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

PRESSIONE = 1 bar

Per la seguente prova la fase di riscaldamento del pannello è durata 135 minuti, periodo durante il quale la temperatura media del modulo si riscalda da 18 °C (pari alla temperatura misurata sotto al pannello) a 56 °C, ovvero 28.5 °C in più della $T_{AMB.CENTRO}$ che rimane costante a 27.5 °C per tutta la prova (solo nella fase iniziale del riscaldamento la temperatura al centro risulta pari a 25 °C ma in 15 min. arriva al valore costante riportato). Si nota che il pannello impiega 100 min. per raggiungere la massima temperatura media e, nello stesso tempo, l'acqua si riscalda dalla temperatura di 15 °C a 24 °C. Alla fine della fase di riscaldamento si eseguono 50 cicli 30s ON- 180s OFF a pressione di 1 bar: per questa pressione servono 14 cicli (ovvero 49 min.) per ottenere un valore di temperatura media costante pari a 36 °C, con un consumo d'acqua di 13.4 litri (ovvero 1.9 litri in meno del caso precedente, fattore importante che mette in evidenza la maggiore incisività del raffreddamento per questa pressione). È possibile inoltre notare che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, subisce un raffreddamento di 10 °C, ovvero da 24 °C a 14°C in 10 minuti, quindi il modulo viene raffreddato a temperatura costante per tutta la fase di raffreddamento.

Per quanto riguarda il fattore X si può evidenziare che:

- □ Per la temperatura media esso è pari a $0.41 \frac{27}{27}$,

- Per la T_{28} (massima temperatura) che alla fine dei 135 min. di riscaldamento viene misurata pari a $77\text{ }^{\circ}\text{C}$ per poi raggiungere un valore di $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ costante dopo 49 minuti, il parametro X risulta si attesta pari a $0.653\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.
- Per la temperatura minima (punto M1) che alla fine della fase di riscaldamento raggiunge i $32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 50 minuti per raggiungere un valore costante pari a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, il fattore X si attesta pari a $0.05\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.

In questo caso si un ottiene un piccolo miglioramento nell'uniformità del raffreddamento ma si possono evidenziare quasi gli stessi problemi riscontrati con $p=0.5$ bar (figura 40):

- a. Per le celle in corrispondenza gli ugelli spruzzatori si nota un buon raffreddamento, anche se la T_{43} subisce un raffreddamento quasi nullo.
- b. Per le celle tra due ugelli consecutivi si riscontra un lieve miglioramento nel raffreddamento rispetto a $p=0.5$ bar ed inoltre, osservando i profili di temperatura (figura 40 a destra) si nota che, considerando il periodo temporale dal minuto 280 alla fine, essi si raffreddano in maniera poco costante ma variano all'interno di un range di temperatura da $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 60°C , mentre nel caso precedente i profili non vengono per nulla raffreddati: questo fenomeno è sempre legato alla presenza di calcare sulla superficie, ma la velocità dell'acqua (a pressione di 1 bar) è tale da indurre comunque la formazione del film anche in presenza di calcare. Ovviamente in questo caso la quantità di calcare che si forma dopo l'evaporazione dell'acqua (tra uno spruzzo ed il successivo) è minore rispetto al caso precedente.

In questo caso il consumo di acqua giornaliero è stimabile in 100.2 litri/giorno.

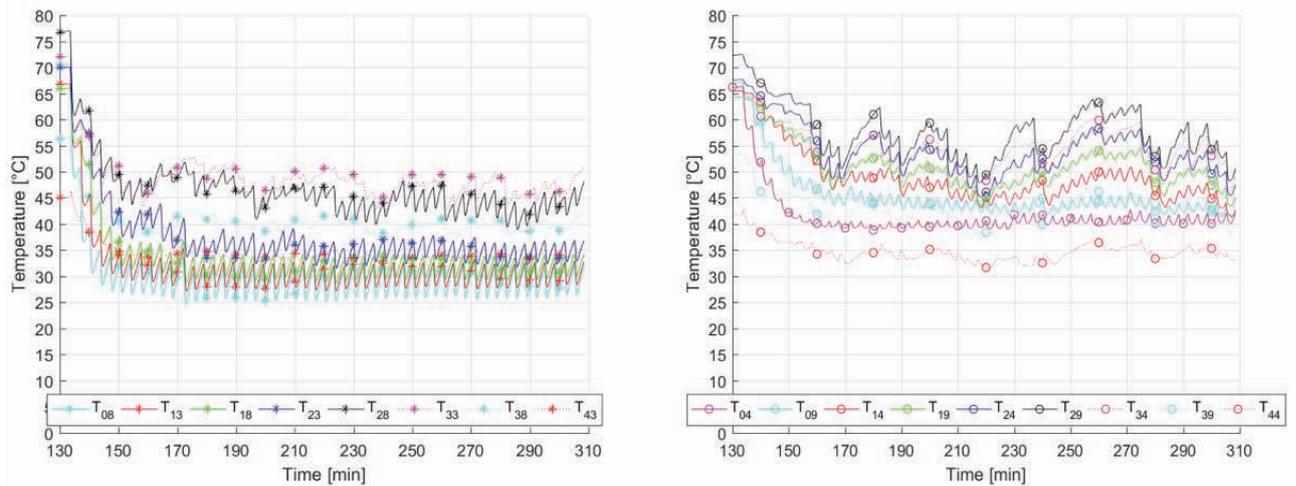


Figura 40 - ciclo 30s ON 180s OFF a pressione di 1 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

PRESSIONE = 1.5 bar

Per la seguente prova la fase di riscaldamento del pannello è durata 125 minuti, durante la quale la temperatura media del pannello si riscalda da 20 °C (pari alla temperatura misurata sotto al pannello) a 57 °C, ovvero circa 30 °C in più della $T_{AMB.CENTRO}$ che rimane costante a 27 °C per tutta la fase di riscaldamento per poi stabilizzarsi a 26 °C nel momento in cui inizia il raffreddamento. Si nota che il pannello impiega 100 min. per raggiungere la massima temperatura media e, nello stesso tempo, l'acqua subisce un riscaldamento da 17 °C a 24 °C. Alla fine della fase di riscaldamento si eseguono 50 cicli cicli 30s ON- 180s OFF a pressione di 1.5 bar: per questa pressione servono 20 cicli (ovvero 73 min.) per ottenere un valore di temperatura media costante pari a 33 °C, con un consumo d'acqua di 23.25 litri. È possibile inoltre notare che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, si raffredda da 24 °C a 20.5°C in 4 minuti, quindi il modulo viene raffreddato a temperatura costante per tutta la fase di raffreddamento.

Per quanto riguarda il fattore X si può evidenziare che:

- □ Per la temperatura media esso è pari a $0.33 \frac{\frac{22}{2}}{\frac{22}{2}}$,

- Per la T_{28} (massima temperatura) che alla fine dei 125 min. di riscaldamento viene misurata pari a $67\text{ }^{\circ}\text{C}$ per poi raggiungere un valore di $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ costante dopo 40 minuti, il parametro X risulta si attesta pari a $0.78\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.
- Per la temperatura minima (punto M1) che alla fine della fase di riscaldamento raggiunge i $37.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 45 minuti per raggiungere un valore costante pari a $28\text{ }^{\circ}\text{C}$, il fattore X si attesta pari a $0.21\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.

Per questo test si ha un netto miglioramento nel raffreddamento delle celle (Figura 41) le quali, nel caso precedente (a $p=1$ bar), presentano andamenti dei profili di temperatura poco costanti ed omogenei tra loro:

- a. Le celle in linea con gli ugelli spruzzatori subiscono un raffreddamento molto omogeneo, migliore dei casi precedenti. Anche in questo caso, come in tutti, c'è un piccolo sbilanciamento nel raffreddamento tra il primo ugello (colonna $T_{05} - T_{45}$) e il secondo (colonna $T_{08} - T_{43}$) legato sempre alle perdite di carico tra i due ugelli.
- b. Per le celle tra due ugelli consecutivi il raffreddamento migliora moltissimo rispetto a $p=1$ bar sia in termini di tempo, infatti se nel caso precedente si osserva un andamento costante di tutti i profili dopo 40 min. in questo caso già dopo 25 min. è possibile osservare un tale andamento, sia in termini di uniformità, infatti non si hanno più gli andamenti altalenanti dei profili di temperatura.

In generale per questa pressione è possibile osservare che, rispetto a tutte le prove precedenti, l'acqua presenta una temperatura maggiore e questo spiega anche il maggior numero di cicli ON-OFF richiesti a $p = 1.5$ bar rispetto a quelli necessari alla pressione di 1 bar. Questo incide anche sul fattore X: come riportato in precedenza, esso è pari al rapporto di due grandezze ($\Delta T_{\text{RAFFREDDAMENTO}}$, tempo), il fatto di avere acqua a temperatura maggiore non incide sulla prima delle due grandezze, ovvero il

$\Delta T_{\text{RAFFREDDAMENTO}}$, che risulta maggiore rispetto al caso precedente ($p = 1 \text{ bar}$), ma sul tempo impiegato per raggiungere quella temperatura media costante, che risulta maggiore del caso precedente; questo fa sì che il fattore X (per la temperatura media) cali da $p = 1 \text{ bar}$ a $p = 1.5 \text{ bar}$.

Per quanto riguarda i consumi di acqua giornalieri, essi si attestano pari a 120.2 litri/giorno

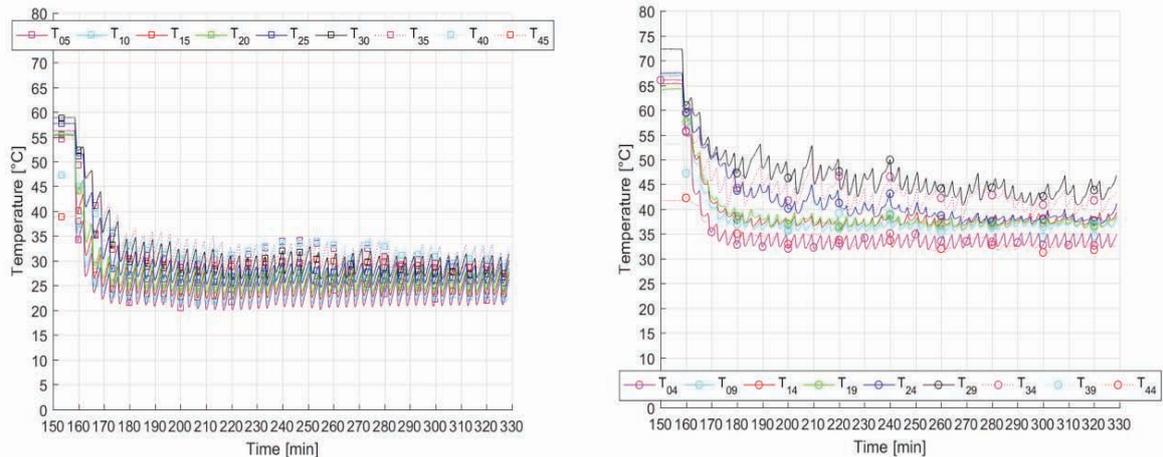


Figura 41 - ciclo 30s ON 180s OFF a pressione di 1.5 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

PRESSIONE = 2 bar

Per la seguente prova la fase di riscaldamento del pannello è durata 135 minuti, durante la quale la temperatura media del pannello subisce un riscaldamento da 16.5 °C (pari alla temperatura misurata sotto al pannello) alla temperatura massima possibile di 56 °C, ovvero circa 30 °C in più della $T_{\text{AMB.CENTRO}}$ che inizialmente si attesta a 25 °C ma, dopo 50 min., si porta ad un valore costante di 26 °C per poi ristabilizzarsi a 25 °C dopo 10 min. dall'inizio del raffreddamento. Si nota che il pannello impiega 120 min. per raggiungere la massima temperatura media e, nello stesso tempo, l'acqua si riscalda da 15.5 °C a 24 °C. Alla fine della fase di riscaldamento si eseguono 50 cicli cicli 30s ON-180s OFF a pressione di 2 bar: per questa pressione servono 18 cicli (ovvero 63 min.) per ottenere un valore di temperatura media costante pari a 30 °C, con un consumo d'acqua di 24.3 litri (1.05 litri in più del caso a pressione di 1.5 bar). È possibile inoltre notare che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, subisce un raffreddamento di 8 °C, da 24 °C a 16 °C, in 35 minuti (ovvero nei primi 10 cicli), quindi

il modulo viene raffreddato con acqua a temperatura costante per quasi tutta la fase di raffreddamento (per 40 cicli, ovvero 140 min.).

Per quanto riguarda il fattore X si può evidenziare che:

- Per la temperatura media esso è pari a $0.412 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$,
- Per la T_{28} (massima temperatura) che alla fine dei 135 min. di riscaldamento viene misurata pari a 77°C per poi raggiungere un valore di 35°C costante dopo 47 minuti, il parametro X risulta si attesta pari a $0.894 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.
- Per la temperatura minima (punto M1) che alla fine della fase di riscaldamento raggiunge i 31°C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 30 minuti per raggiungere un valore costante pari a 25°C , il fattore X si attesta pari a $0.2 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$, ovvero uguale al caso precedente.

Per i vari profili di temperatura analizzati, è possibile osservare che (figura 42):

- a. Per le celle in linea con gli ugelli si nota un raffreddamento molto più incisivo dei casi precedenti, infatti già dopo 6 cicli (ovvero 21 min.) si può notare che tutte le celle raggiungono una temperatura costante (figura 42 a sinistra).
- b. Per le celle tra due ugelli consecutivi le cose sono molto simili al caso $p=1.5$ bar, la T_{44} subisce un lieve raffreddamento anche se più alto dei casi a pressione 0.5 bar, 1 bar e 1.5 bar. Rispetto al ciclo 30s ON - 30s OFF e 30s ON - 60s OFF il raffreddamento è sicuramente meno costante ed uniforme mentre, rispetto al ciclo 30s ON - 120s OFF sembrerebbe più uniforme in quanto per alcune temperature, come la T_{29} , il tempo di raffreddamento inferiore (14 min. in meno per raggiungere un valore costante) però, nel ciclo 30s ON - 120s OFF il ΔT tra la temperatura minima e la massima è minore di 4°C .

Per quanto riguarda il consumo d'acqua giornalieri si attesta ad un valore di 138.85 litri/giorno.

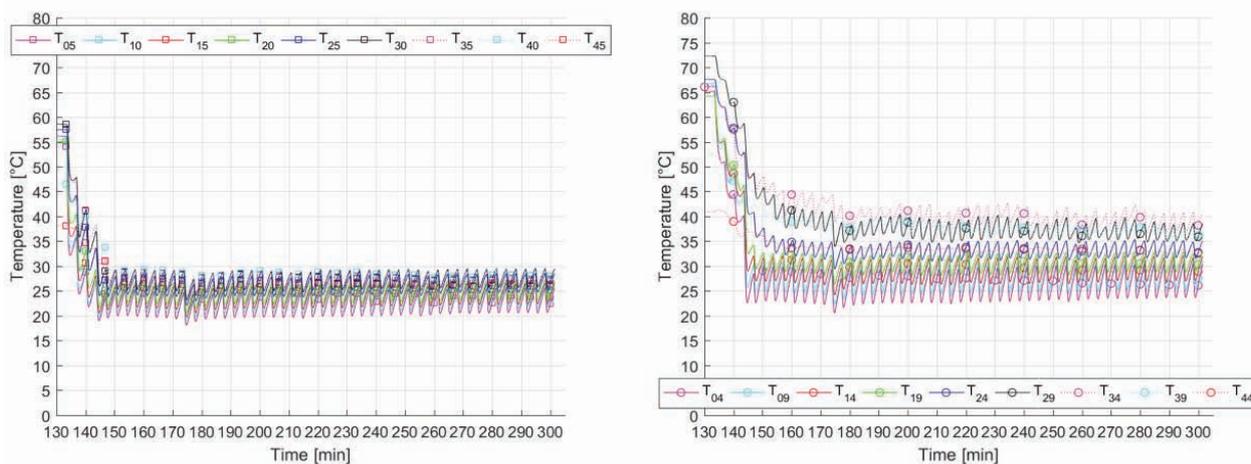


Figura 42 - ciclo 30s ON 180s OFF a pressione di 2 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

CICLO 30s ON - 300s OFF

PRESSIONE = 0.5 bar

Per la seguente prova la fase di riscaldamento del pannello è durata 130 minuti, durante la temperatura media del pannello subisce un riscaldamento da 14 °C (pari alla temperatura misurata sotto il modulo) a 52 °C, ovvero 29.5 °C in più della $T_{AMB.CENTRO}$ (pari a 22.5 °C costanti per tutta la durata della prova). Si nota che il pannello impiega 100 min. per raggiungere la massima temperatura media e, nello stesso tempo, l'acqua si riscalda da 15 °C a 19°C. Alla fine della fase di riscaldamento si eseguono 50 cicli 30s ON – 300s OFF alla pressione di 0.5 bar: per questa pressione occorrono 25 cicli (ovvero 138 min.) per ottenere un valore di temperatura media nell'intorno dei 40 °C, con un consumo di acqua pari a 18.2 litri. Inoltre si osserva che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, subisce un raffreddamento di 4 °C da 19 °C a 15 °C (costanti) in 35 minuti, ovvero dopo 7 cicli ON-OFF.

Per quanto riguarda le varie temperature analizzate si evince che la massima temperatura la si misura sempre nel punto 28 (figura 44) mentre la minima è nel punto M1. Andando a calcolare il fattore X si mette in evidenza che:

- □ Per la temperatura media esso è pari a $0.087 \frac{28}{2 \cdot 22}$, valore molto piccolo dovuto sia a tempi molto alti tra uno spruzzo e il successivo (rispetto ai cicli precedenti), sia alla bassa pressione utilizzata che comporta un piccolo $\Delta T_{RAFFREDDAMENTO}$.

- Per la T_{28} che alla fine dei 130 min. di riscaldamento viene misurata pari a $73\text{ }^{\circ}\text{C}$ per poi raggiungere un valore di $56\text{ }^{\circ}\text{C}$ costante dopo 85 minuti, il parametro X si attesta pari a $0.2\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$, però bisogna notare che l'andamento del profilo di temperatura T_{28} risulta poco costante quindi il parametro X calcolato è relativo ad un valore medio di questa temperatura.
- Per la temperatura minima (punto M1) che alla fine della fase di riscaldamento raggiunge i $26\text{ }^{\circ}\text{C}$, non viene per nulla raffreddata, infatti dopo 30 min. dall'inizio del raffreddamento la sua temperatura si raffredda di $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ assestandosi a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$: per tale ragione il parametro X risulta pari a $0.033\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.

Per quanto riguarda i profili di temperatura è possibile notare che (figura 44):

- a. Per le celle in corrispondenza degli ugelli spruzzatori si evince che, man mano che ci si allontana dallo spruzzo, esse vengono raffreddate sempre meno, infatti T_{33} e T_{38} subiscono un ΔT di raffreddamento di circa $6 - 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ mentre la T_{43} viene raffreddata di circa $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (raffreddamento quasi nullo).
- b. Per le celle tra due ugelli consecutivi il raffreddamento è pessimo molto più degli altri cicli a $p=0.5\text{ bar}$: la T_{04} e T_{09} subiscono un ΔT di raffreddamento pari a $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ mentre tutte le altre celle sottostanti subiscono un raffreddamento mediocre fino a T_{44} che, come la T_{43} , si raffredda di soli $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

In questo caso la formazione di calcare è maggiore rispetto al ciclo 30s ON – 180s OFF a pressione di 0.5 bar, poiché il tempo tra uno spruzzo e il successivo è più alto e ciò comporta un'ulteriore riduzione della trasmittanza ottica del vetro, ovvero una minore produzione da parte delle celle (figura 43). Per quanto riguarda il consumo d'acqua giornaliero risulta pari a 49.1 litri/giorno.

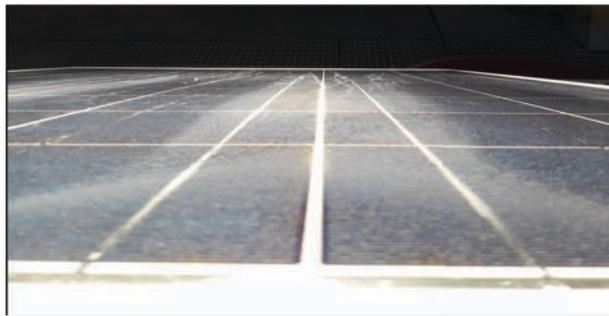


Figura 43 – Formazione di calcare per il ciclo 30s ON – 300s OFF alla pressione di 0.5 bar

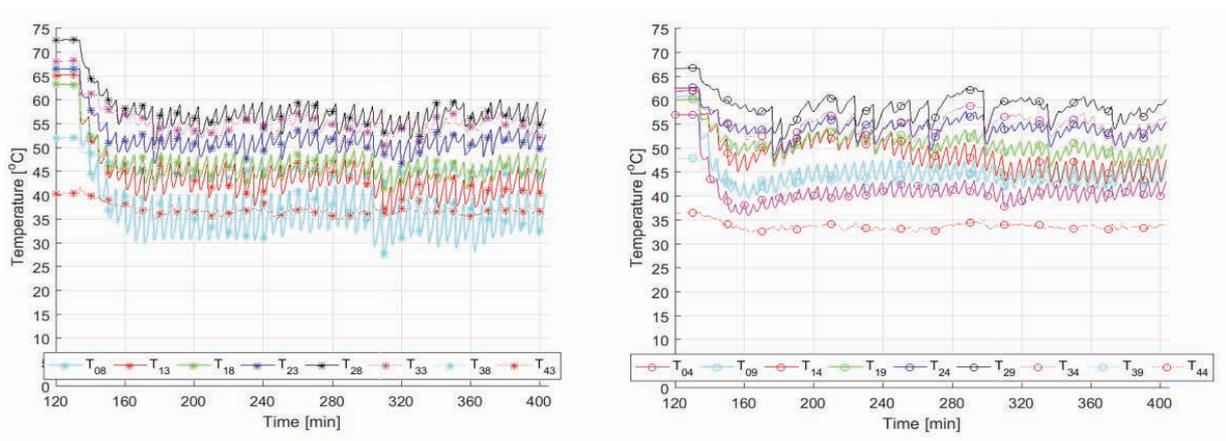


Figura 44 - ciclo 30s ON 300s OFF a pressione di 0.5 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

PRESSIONE = 1 bar

Per il test seguente la fase di riscaldamento del pannello è durata 135 minuti, durante la quale la temperatura media del modulo incrementa il suo valore da 15 °C (pari alla temperatura misurata sotto il modulo) a 54 °C, ovvero 30 °C in più della $T_{AMB,CENTRO}$ la quale, partendo da 16 °C, si riscalda fino a 24 °C dopo circa 30 min. dall'inizio del riscaldamento. Si nota che il pannello impiega 110 min. per raggiungere la massima temperatura media e, nello stesso tempo, l'acqua subisce un riscaldamento da 15.5 °C a 21.5 °C. Alla fine della fase di riscaldamento si eseguono 50 cicli 30s ON – 300s OFF alla pressione di 1 bar: per questa pressione servono 20 cicli (ovvero 110 min.) per ottenere un valore di temperatura media nell'intorno dei 40 °C, con un consumo d'acqua pari a 19.4 litri. Inoltre si osserva che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, subisce un raffreddamento di 6.5 °C ,da 21.5 °C a 15 °C in 20 minuti, ovvero dopo 4 cicli ON-OFF.

Per quanto riguarda il fattore X si può evidenziare che:

- Per la temperatura media esso è pari a $0.127 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$, valore maggiore del caso precedente, legato al fatto di spruzzare con una pressione doppia.
- Per la T_{28} (massima temperatura) che alla fine dei 135 min. di riscaldamento viene misurata pari a 76°C per poi raggiungere un valore di 53°C costante dopo 80 minuti, il parametro X si attesta pari a $0.29 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$, però bisogna notare che l'andamento del profilo di temperatura nel punto 28 risulta ancora poco costante (anche se migliore del caso $p = 0.5$ bar) quindi il parametro X calcolato è sempre relativo ad un valore medio di temperatura.
- Per la temperatura minima (punto M1) che alla fine della fase di riscaldamento raggiunge i 28°C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 30 minuti per raggiungere un valore nell'intorno dei 24°C , il fattore X si attesta pari a $0.133 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.

Anche per questo valore di pressione il raffreddamento è pessimo. Dai vari profili di temperatura si può osservare che (figura 45):

- a. Per le celle in corrispondenza degli ugelli spruzzatori, vale quanto detto per $p=0.5$ bar tranne per la T_{43} che subisce un raffreddamento maggiore di circa 10°C in più. Rispetto a tutti gli altri cicli il raffreddamento è molto meno incisivo ed uniforme, un'unica cosa che si può notare è che, rispetto al ciclo 30s ON – 180s OFF, la T_{08} e la T_{13} (ovvero quelle più vicine all'ugello) raggiungono valori simili mentre, per le altre celle sottostanti, i valori di queste temperature sono più elevati (a causa del tempo maggiore tra uno spruzzo e il successivo).
- b. Per le celle tra due ugelli consecutivi, vale quanto detto a $p=0.5$ bar. Inoltre bisogna notare che in questo caso la T_{44} , a differenza della T_{43} , subisce un raffreddamento quasi nullo (circa 5°C).

Per quanto riguarda il consumo d'acqua giornaliero si attesta pari a 63.81 litri/giorno, ovvero 13 litri/giorno in più rispetto a $p = 0.5$ bar.

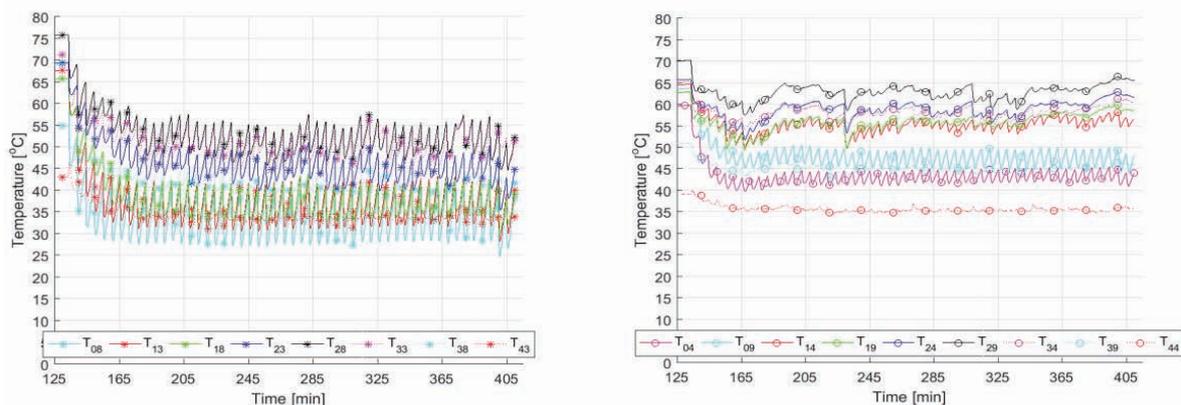


Figura 45 - ciclo 30s ON 300s OFF a pressione di 1 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

PRESSIONE = 1.5 bar

Per la seguente prova la fase di riscaldamento del pannello è durata 135 minuti, durante la quale la temperatura media del modulo si riscalda da 14.5 °C (più bassa della temperatura misurata sotto il modulo pari a 16.5 °C) a 55.5 °C, ovvero circa 30 °C in più della $T_{AMB.CENTRO}$ la quale, partendo da 18 °C, si riscalda fino a 25 °C costanti dopo 20 min. dall'inizio del riscaldamento. Si nota che il pannello impiega 120 min. per raggiungere la massima temperatura media e, nello stesso tempo, l'acqua si riscalda da 13.5 °C a 22 °C. Alla fine della fase di riscaldamento si eseguono 50 cicli 30s ON – 300s OFF alla pressione di 1.5 bar: per questa pressione servono 17 cicli (ovvero 96 min.) per ottenere un valore di temperatura media nell'intorno dei 35 °C, con un consumo d'acqua pari a 19.76 litri (0.37 litri in più rispetto al caso a $p = 1$ bar). Inoltre si osserva che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, subisce un raffreddamento di 7 °C, da 22 °C a 15 °C in 6 minuti, ovvero già dopo il primo ciclo ON-OFF, riuscendo a raffreddare il pannello con acqua a temperatura costante per tutta la fase di raffreddamento. Andando a calcolare il fattore X si mette in evidenza che:

- □ Per la temperatura media esso è pari a $0.214 \frac{[27]}{[2][27]}$, valore maggiore del caso precedente, indice di una maggiore uniformità nel raffreddamento.
- □ Per la T_{28} (massima temperatura) che alla fine dei 135 min. di riscaldamento viene misurata pari a 74.5 °C per poi raggiungere un valore di 43 °C costante dopo 110 minuti, il parametro X si attesta a $0.283 \frac{[27]}{[2][27]}$, anche qui bisogna

notare che l'andamento del profilo di temperatura T_{28} risulta poco costante (anche se migliore rispetto al caso a $p = 1$ bar) quindi il parametro X calcolato è relativo ad un valore medio di questa temperatura.

- □ Per la temperatura minima (punto M1) che alla fine della fase di riscaldamento raggiunge i 30 °C, subisce un raffreddamento mediocre, infatti, dopo 95 min. dall'inizio del raffreddamento, la sua temperatura si assesta a 26 °C: per tale ragione il parametro X risulta pari a $0.052 \frac{27}{26}$.

Per i vari profili di temperatura (figura 46) è possibile osservare che:

- a. □ Le celle in corrispondenza degli ugelli vengono quasi tutte raffreddate con un ΔT di raffreddamento che su alcune celle raggiunge anche i 40°C. Rispetto al caso a pressione di 1 bar, qui la T_{43} subisce un ΔT di raffreddamento di circa 10 °C.
- b. □ Le celle tra due ugelli consecutivi anche se vengono poco raffreddate, hanno profili di temperatura più omogenei e senza forti irregolarità. Per la T_{44} è possibile osservare che si raffredda meno della T_{43} (2 °C in meno) come già osservato nel caso precedente.

Per quanto riguarda il consumo d'acqua giornaliero esso è pari a 76.5 litri/giorno, valore sicuramente più basso di tutti gli altri casi che potrebbe portare ad una futura applicazione reale.

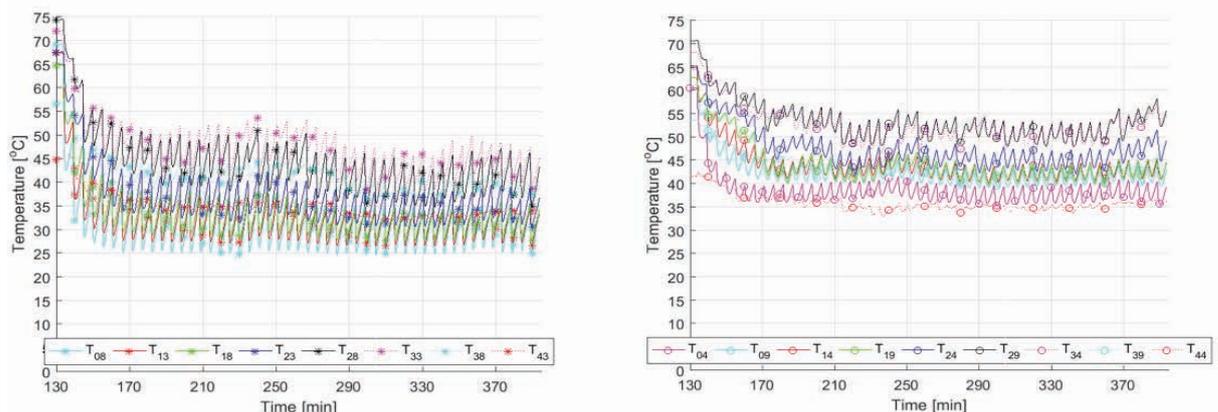


Figura 46 - ciclo 30s ON 300s OFF a pressione di 1.5 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

PRESSIONE = 2 bar

Per la seguente prova la fase di riscaldamento del pannello è durata 150 minuti, durante la quale la temperatura media del modulo si riscalda da 14.5 °C (un po' più bassa della temperatura misurata sotto il modulo pari a 16.5 °C) alla temperatura di 55.5 °C, ovvero 30.5 °C in più della $T_{AMB.CENTRO}$ la quale, partendo da 18 °C, si riscalda fino a 25 °C costanti dopo 20 min. dall'inizio del riscaldamento. Si nota che il pannello impiega 120 min. per raggiungere la massima temperatura media e, nello stesso tempo, l'acqua si raffredda da 14 °C a 22.5 °C. Alla fine della fase di riscaldamento si eseguono 50 cicli 30s ON – 300s OFF alla pressione di 2 bar: per questa pressione occorrono 20 cicli (ovvero 110 min.) per ottenere un valore di temperatura media nell'intorno dei 33 °C, con un consumo d'acqua pari a 27 litri. Inoltre si osserva che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, subisce un raffreddamento di 7.5 °C, da 22.5 °C a 15 °C (costanti) in 13 minuti, ovvero già dopo il secondo ciclo ON-OFF, riuscendo a raffreddare il pannello con acqua a temperatura costante. Per quanto riguarda il fattore X, è possibile osservare che:

- Per la temperatura media esso è pari a $0.205 \frac{°C}{min}$, valore minore del caso precedente, a causa della maggior quantità di acqua persa dai due lati lunghi del pannello, che non partecipa al raffreddamento del modulo.
- Per la T_{28} (massima temperatura) che alla fine dei 150 min. di riscaldamento viene misurata pari a 75.5 °C per poi raggiungere un valore di 36 °C costante dopo 130 minuti, il parametro X si attesta a $0.304 \frac{°C}{min}$, però bisogna notare che l'andamento del profilo di temperatura T_{28} risulta poco costante (anche se migliore rispetto al caso a $p = 1.5$ bar) quindi il parametro X calcolato è relativo ad un valore medio di questa temperatura.
- Per la temperatura minima (punto M1) che alla fine della fase di riscaldamento raggiunge i 30 °C, subisce un raffreddamento mediocre, infatti, dopo 30 min. dall'inizio del raffreddamento, la sua temperatura si assesta a 25 °C: per tale ragione il parametro X risulta pari a $0.205 \frac{°C}{min}$.

In generale, con questa pressione si riesce ad ottenere un buon raffreddamento di quasi tutte le celle, infatti i profili di temperatura sono un po' più costanti rispetto al caso precedente di $p = 1.5$ bar (figura 47):

- a. Per le celle in linea con gli ugelli spruzzatori si possono osservare andamenti molto simili al caso precedente con $p = 1.5$ bar, con ΔT di raffreddamento pari anche a 40 °C (per alcune celle), l'unica cosa che cambia è il tempo impiegato per raffreddarsi ad una temperatura costante che in questo caso è minore: ad esempio la T_{08} in questo caso si raffredda fino a 25 °C dopo circa 6 min. mentre per la $p = 1.5$ bar impiega circa 11 min. Anche qui la T_{43} subisce un ΔT di raffreddamento di 10 °C mentre la T_{45} di 7 °C.
- b. Per le celle tra due ugelli consecutivi si nota un raffreddamento abbastanza uniforme e più incisivo rispetto ai casi precedenti. Infatti queste celle subiscono un ΔT di raffreddamento da 20 °C (per le celle più in basso) a 25 °C (per le celle vicino agli ugelli), tranne la T_{44} che invece viene raffreddata di soli 6 °C. Rispetto a tutti gli altri cicli ON-OFF a $p = 2$ bar, l'uniformità del raffreddamento è peggiore escluso per il ciclo 30s ON - 180s OFF nel quale si nota un andamento dei profili di temperatura più o meno simile al ciclo 30s ON – 300s OFF, l'unica differenza sta nel ΔT di raffreddamento che, in questo caso specifico, è più basso di quello ottenuto nel ciclo 30s ON – 180s OFF.

Per quanto riguarda il consumo d'acqua giornaliero si attesta a 88.4 litri/giorno.

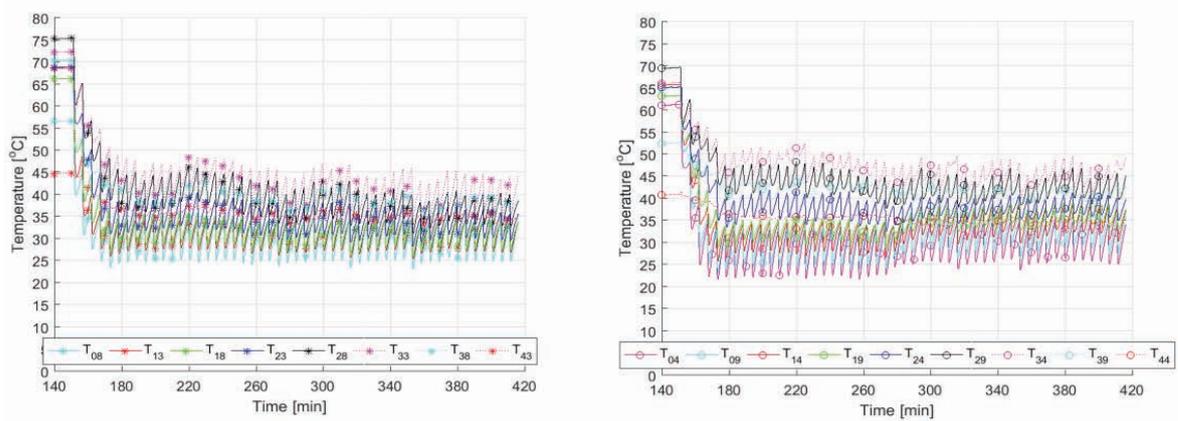


Figura 47 - ciclo 30s ON 300s OFF a pressione di 2 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

4.1.1 ANALISI GENERALE DELLE PROVE EFFETTUATE CON LA 1^a CONFIGURAZIONE.

Come si nota dalle figure riportate nelle pagine precedenti, per ogni ciclo si può osservare che all'aumentare della pressione:

- a. □ Il tempo impiegato dalla temperatura media del pannello per raggiungere un valore circa costante diminuisce e ciò rappresenta un vantaggio da un punto di vista del rendimento, in quanto tutte le celle lavorerebbero per più tempo a bassa temperatura cosa che implica rendimento elevato, quindi maggiore energia prodotta. Lo svantaggio sta nel fatto che all'aumentare della pressione la portata d'acqua aumenta: questo comporta consumi di acqua sempre più elevati che rendono quindi inutilizzabile il sistema di raffreddamento in esame.

- b. □ Si riesce a raffreddare sempre meglio la parte bassa del modulo, distante dagli ugelli e quindi migliora l'uniformità del raffreddamento di tutto il modulo. Infatti, le temperature T_{43} , T_{44} e T_{45} per tutti i cicli a pressione 0.5 bar ed 1 bar vengono raffreddate in maniera marginale (ΔT di raffreddamento che va dai 5 °C ai 10 °C), lo stesso vale per le temperature T_{M5} , T_{M3} e T_{M1} come si nota in figura 48. Bisogna portare la pressione a 1.5 bar e/o a 2 bar per ottenere un ΔT di raffreddamento di circa 15 °C, valore comunque basso

rispetto ai ΔT di raffreddamento che si riescono ad ottenere sulle celle più vicine agli ugelli.

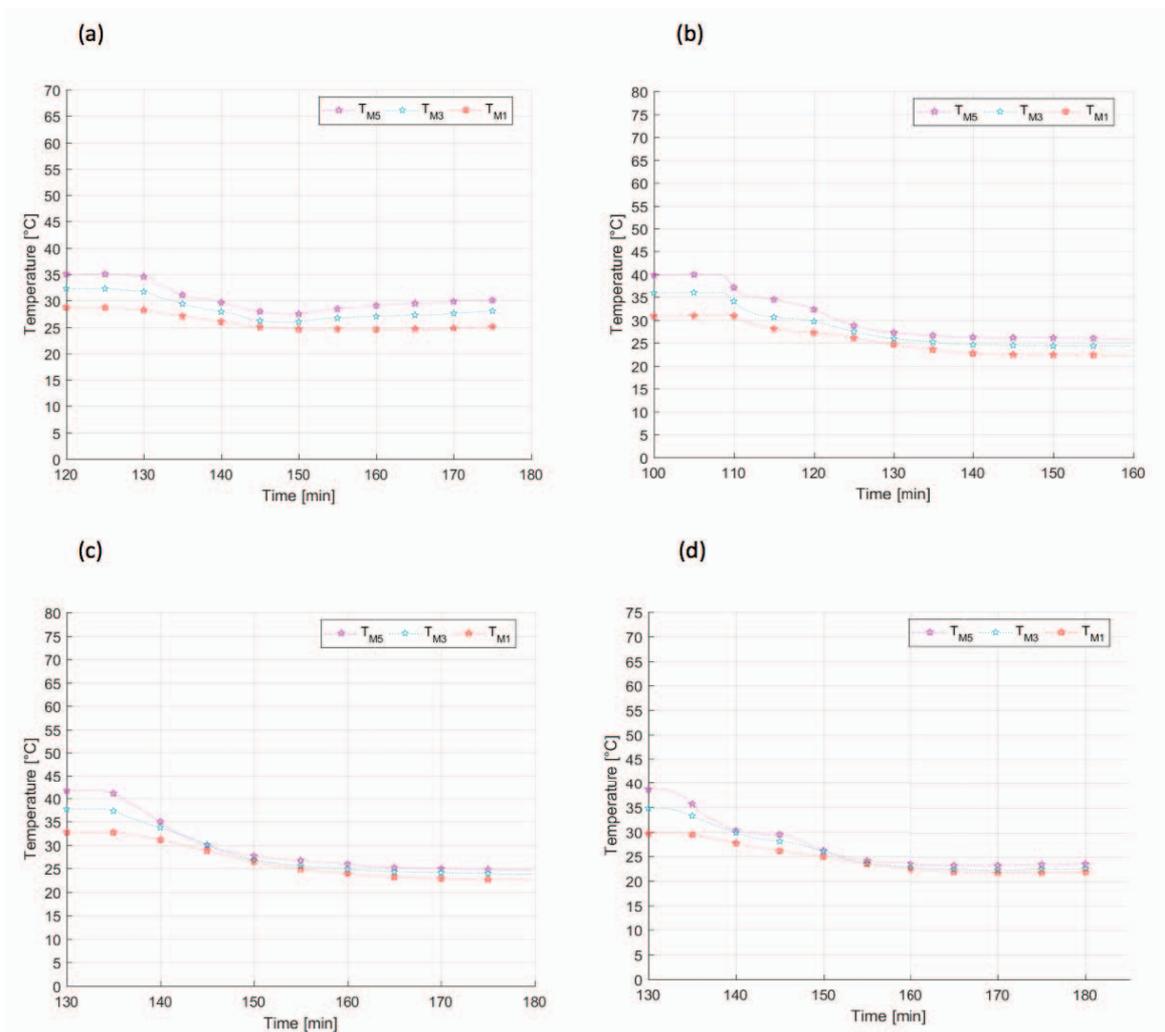


Figura 48 - Andamenti di T_{M5} , T_{M3} e T_{M1} per il ciclo 30s ON 30s OFF alle varie pressioni: (a) pressione di 0.5 bar; (b) pressione di 1 bar; (c) pressione di 1.5 bar; (d) pressione di 2 bar.

Per quanto riguarda il rendimento del modulo, la prima cosa interessante da notare per tutti i cicli effettuati è che partendo dalla pressione di 0.5 bar fino alla pressione di 2 bar, non si riscontra un notevole incremento del rendimento: osservando la tabella 5 (pag. 76) nel ciclo 30s ON – 30s OFF si nota che a $p=0.5$ bar il rendimento nella fase di riscaldamento scende dal 14.8 % al 12.7 % mentre durante i 50 cicli ON-OFF effettuati, sale dal 12.7 % al 14% quindi si riesce ad ottenere un incremento di 1.3 punti percentuali; per le pressioni 1 e 2 bar l'incremento è di 1.9 punti percentuali quindi pur raddoppiando la pressione, l'incremento di rendimento ottenuto è lo stesso; invece considerando la

pressione di 1.5 bar l'incremento è di 2.1 punti percentuali (massimo incremento per questo ciclo) il che porterebbe a pensare che per questo ciclo è meglio lavorare a questa pressione piuttosto che a 2 bar, oppure si potrebbe utilizzare una pressione di 1 bar con la quale si ottiene un $\Delta T_{\text{raffreddamento}}$ di 32 °C (1 °C in meno). Quanto detto vale anche per il ciclo 30s ON – 60s OFF in cui a $p = 0.5$ bar si ha un incremento di 1.4 punti percentuali mentre a pressione di 1, 1.5 e 2 bar l'incremento è sempre pari a 1.7 punti percentuali; per il ciclo 30s ON – 120s OFF si nota che a pressione di 0.5 bar il rendimento aumenta di 1.2 punti percentuali, a $p = 1$ bar l'incremento è di 1.5 punti percentuali mentre a p di 1.5 e 2 bar l'incremento è pari a 1.8 punti percentuali, quindi, in questo caso, la pressione migliore con cui lavorare in questo ciclo è di 1.5 bar.

Spostando l'attenzione sui cicli 30s ON – 180s OFF e 30s ON – 300s OFF si nota che il massimo incremento di rendimento lo si ottiene pari a 1.4 punti percentuali per la pressione di 2 bar, inferiore ai casi precedenti, quindi all'aumentare del tempo tra uno spruzzo ed il successivo l'incremento massimo del rendimento diminuisce come è normale aspettarsi, visto che la temperatura media del pannello è via via sempre maggiore (a $p = 2$ bar alla fine del ciclo 30s ON – 30s OFF arriva a 22 °C mentre alla fine del ciclo 30s ON – 300 s OFF arriva a 33 °C ovvero 11 °C in più).

In tabella 5 viene inoltre riportato il $\Delta T_{\text{raffreddamento}}$ che si riesce ad ottenere per ogni ciclo e pressione: si va da un massimo di 34 °C per il ciclo 30s ON – 30s OFF alla pressione di 2 bar ad un minimo di 12 °C per il ciclo 30s ON – 300s OFF a pressione di 0.5 bar. Quindi il ciclo più performante da un punto di vista del raffreddamento è il primo in tabella 1 ma anche il 30s ON – 60s OFF riesce a ridurre la temperatura media del pannello di circa 30 °C. Ovviamente il tutto fa riferimento alla temperatura media massima del modulo che, in quasi tutte le prove, è di circa 55 - 56 °C, però, considerando il fatto che la NOCT (*Normal cell operating temperature*) è di 45 °C e che di solito le celle oltre questo valore di temperatura degradano di molto la loro produzione elettrica, potrebbe bastare anche un ciclo 30s ON – 300s OFF alla pressione di 2 bar per ottenere un netto miglioramento della produzione elettrica delle celle anche se poi nascerebbe il problema dell'uniformità del raffreddamento che comunque sbilancerebbe la produzione delle singole celle (come visto prima).

Altro parametro importante è la quantità di acqua utilizzata (tabella 5): ci sono due valori uno esprime i kg di acqua utilizzata per eseguire i 50 cicli ON – OFF mentre l'altro

esprime i *litri/giorno* che si consumerebbero se il ciclo venisse eseguito non 50 volte ma bensì in un periodo di tempo di 6 ore (dalle 10:00 alle 16:00 in una tipica giornata di luglio). Il consumo d'acqua giornaliero maggiore è relativo al ciclo 30s ON – 30s OFF (soprattutto per le pressioni di 1.5 bar e 2 bar) il che si traduce nella non fattibilità di questo ciclo soprattutto se il sistema di raffreddamento in esame venisse installato ad un campo fotovoltaico, i consumi di acqua sarebbero assolutamente eccessivi. L'unico ciclo che potrebbe trovare un'applicazione reale, per le 6 ore prima citate, è il ciclo 30s ON – 300s OFF ad una pressione di 1.5 bar (è la pressione che per questo ciclo ci dà una buona omogeneità nel raffreddamento) per la quale il consumo giornaliero è di circa 76.5 *l/giorno*, ma in presenza di un campo fotovoltaico anche questo ciclo troverebbe forti difficoltà d'impiego.

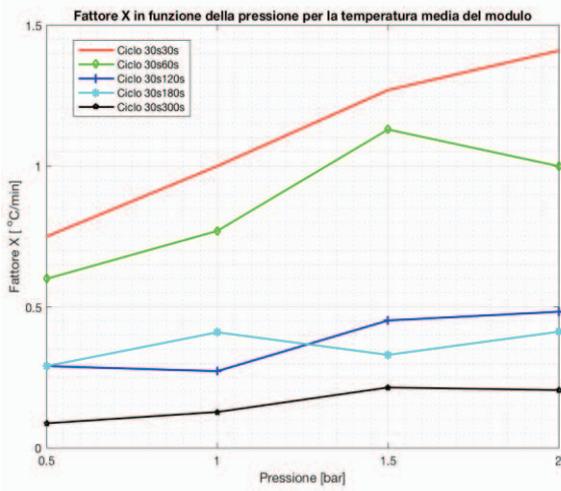
Altra cosa interessante, analizzata nei vari cicli ON-OFF, è il fattore $X \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}} \right]$ di cui si riportano i valori in tabella 6: questo fattore è stato calcolato per tre temperature, ritenute fondamentali per la comprensione degli andamenti dei profili analizzati, che sono la temperatura media del modulo, la temperatura massima (T_{28}) e la temperatura minima (T_{M1}). Generalmente, per tutte queste temperature si nota che all'aumentare del tempo tra uno spruzzo e il successivo, il fattore X cala, ovvero il pannello si raffredda sempre meno nel tempo (come era lecito aspettarsi), però ci sono alcune differenze da evidenziare nei vari andamenti (figura 49):

- Per la temperatura media (figura 49 – (1)) si nota che con il ciclo 30s ON – 30s OFF e con il 30s ON – 60s OFF, il fattore X all'aumentare della pressione si trova in un range compreso tra $0.6 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ e $1.4 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$, range abbastanza ampio mentre per i restanti tre cicli, il range entro cui si trova X è più contenuto, infatti è compreso nell'intervallo $0.087 - 0.45 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$, a conferma del fatto che i cicli più performanti sono i primi due ma sono anche quelli per cui si ottiene un consumo di acqua elevato. Per quasi tutti i cicli, il miglior raffreddamento lo si ottiene a $p = 1.5$ bar tranne per il ciclo 30s ON-30s OFF ed il ciclo 30s ON-180 s OFF per i quali, il maggior valore di X lo si ottiene per la pressione di 2 bar (pressione che per il 30sON-30sOFF comporterebbe il massimo consumo di acqua

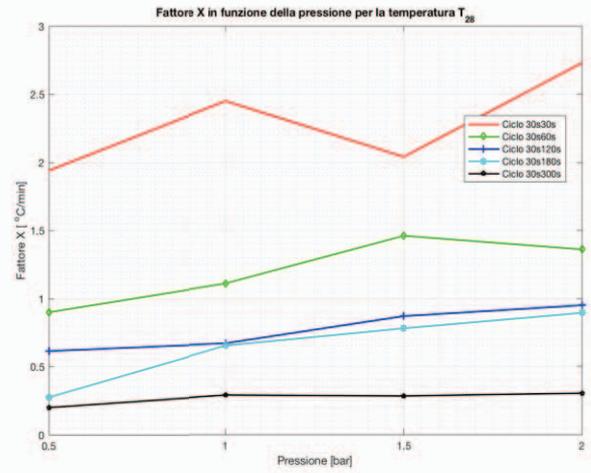
ottenibile per i cicli studiati). Infine si nota che per il 30s – 300s tra $p = 1.5$ bar e $p = 2$ bar il fattore X non cambia, rimane costante a $0.2 \frac{^{\circ}C}{min}$.

- Nel caso della massima temperatura, punto 28, (figura 49 – (2)) si nota che per il ciclo 30s ON – 30s OFF (curva rossa) il fattore X tra $p = 1$ bar e $p = 1.5$ bar subisce una diminuzione per poi raggiungere il suo valore massimo in corrispondenza di $p = 2$ bar e questo potrebbe essere legato al fatto che a $p = 1$ bar la T_{28} vede subito la formazione del film mentre a $p = 1.5$ bar avendo una gittata maggiore del getto, si ha formazione di goccioline che inizialmente impediscono il passaggio del film di acqua. Per tutti gli altri cicli si ha un andamento del fattore X crescente linearmente con la pressione: solo nel ciclo 30s ON- 60 s OFF esso subisce una diminuzione tra $p = 1.5$ bar e 2 bar, mentre nel ciclo 30s ON – 300 s OFF il fattore X , tra $p = 0.5$ bar e $p = 2$ bar, rimane pressoché costante.
- Per la T_{M1} (figura 49 – (3)) gli andamenti del fattore X con la pressione sono abbastanza differenti tra loro: a $p = 0.5$ bar il ciclo più performante è il 30s ON – 30s OFF (curva rossa), ma a $p = 2$ bar il ciclo più performante sembrerebbe il ciclo 30 s ON – 180 s e questo potrebbe essere legato al fatto che mentre, ad esempio, per il 30s ON – 300s OFF, nei 300 secondi (5 min.) che dividono uno spruzzo dal successivo l'acqua evapora tutta in un tempo inferiore e il pannello subisce un lieve riscaldamento prima dello spruzzo successivo, nel ciclo 30s ON- 180s OFF, l'acqua evapora tutta nei 3 min. che intercorrono tra uno spruzzo ed il successivo senza però lasciare tempo al modulo di riscaldarsi ulteriormente prima del successivo spruzzo.

(1)



(2)



(3)

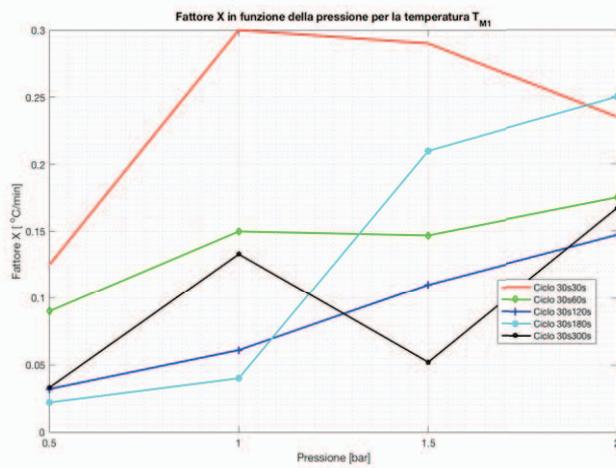


Figura 49 - andamenti del fattore X [$^{\circ}\text{C}/\text{min}$.] in funzione della pressione: (1) fattore X relativo alla temperatura media; (2) fattore X relativo alla T_{28} ; (3) fattore X) relativo alla T_{M1} .

Tabella 5 – Valori di T_{media} , T_{acqua} , rendimento, ΔT di raffreddamento e della quantità di acqua utilizzata, per tutti i cicli e pressioni: analisi dei valori in fase di riscaldamento e in fase di raffreddamento (ovvero durante i 50 cicli ON-OFF)

			0.5 [bar]	1 [bar]	1.5 [bar]	2 [bar]
Ciclo 30s ON - 30s OFF	T_{media} [°C]	RISCALDAMENTO	15 - 52	31 - 56	35 - 57.5	16 - 55
		RAFFREDDAMENTO	52 - 27	56 - 24	57.5 - 22.5	55 - 22
	η [%]	RISCALDAMENTO	14.8 - 12.7	13.9 - 12.3	13.7 - 12.2	14.8 - 12.4
		RAFFREDDAMENTO	12.7 - 14	12.3 - 14.2	12.2 - 14.3	12.4 - 14.3
	T_{acqua} [°C]	RISCALDAMENTO	15 - 21.5	15 - 22.5	15 - 25	16 - 22
		RAFFREDDAMENTO	21.5 - 12	22.5 - 13	25 - 14	22 - 12
$\Delta T_{raffreddamento}$ [°C]		25	32	33	34	
Tot. acqua usata	[kg]	36	46	57	64	
	[litro/giorno]	270	351	420	486	
			0.5 [bar]	1 [bar]	1.5 [bar]	2 [bar]
Ciclo 30s ON - 60s OFF	T_{media} [°C]	RISCALDAMENTO	22 - 54	32 - 57.5	16 - 55	26.5 - 55.5
		RAFFREDDAMENTO	54 - 30	57.5 - 27.5	55 - 26	55.5 - 24.5
	η [%]	RISCALDAMENTO	14.3 - 12.5	13.8 - 12.3	14.7 - 12.4	14 - 12.4
		RAFFREDDAMENTO	12.5 - 13.9	12.3 - 14	12.4 - 14.1	12.4 - 14.1
	T_{acqua} [°C]	RISCALDAMENTO	15 - 21.5	15 - 25	16 - 22	15 - 22
		RAFFREDDAMENTO	21.5 - 13	25 - 14	22 - 15	22 - 14
$\Delta T_{raffreddamento}$ [°C]		24	30	29	31	
Tot. acqua usata	[kg]	35.9	47	58	63.2	
	[litro/giorno]	180	234	280	324	
			0.5 [bar]	1 [bar]	1.5 [bar]	2 [bar]
Ciclo 30s ON - 120s OFF	T_{media} [°C]	RISCALDAMENTO	27 - 57	15 - 56	30 - 57	15 - 56
		RAFFREDDAMENTO	57 - 34	56 - 32	57 - 29	56 - 25
	η [%]	RISCALDAMENTO	14 - 12.4	14.7 - 12.4	13.9 - 12.2	14.7 - 12.2
		RAFFREDDAMENTO	12.4 - 13.6	12.4 - 13.9	12.2 - 14	12.2 - 14
	T_{acqua} [°C]	RISCALDAMENTO	15 - 22	14 - 23	16 - 24	14 - 21
		RAFFREDDAMENTO	22 - 13	23 - 15	24 - 15	21 - 14
$\Delta T_{raffreddamento}$ [°C]		23	24	28	31	
Tot. acqua usata	[kg]	35	46.7	57.3	64	
	[litro/giorno]	108	140	168	194	
			0.5 [bar]	1 [bar]	1.5 [bar]	2 [bar]
Ciclo 30s ON - 180s OFF	T_{media} [°C]	RISCALDAMENTO	18 - 57.5	18 - 57	17 - 57	16 - 56
		RAFFREDDAMENTO	57.5 - 39	57 - 36	57 - 32	56 - 30
	η [%]	RISCALDAMENTO	14.3 - 12.2	14.5 - 12.4	14.6 - 12.4	14.7 - 12.4
		RAFFREDDAMENTO	12.2 - 13.3	12.4 - 13.8	12.4 - 13.8	12.4 - 13.9
	T_{acqua} [°C]	RISCALDAMENTO	17 - 24	15 - 24	15 - 24	15 - 24
		RAFFREDDAMENTO	24 - 16	24 - 16	24 - 16	24 - 16
$\Delta T_{raffreddamento}$ [°C]		18.5	21	25	26	
Tot. acqua usata	[kg]	34	46.9	56	65	
	[litro/giorno]	77	100	120	139	
			0.5 [bar]	1 [bar]	1.5 [bar]	2 [bar]
Ciclo 30s ON - 300s OFF	T_{media} [°C]	RISCALDAMENTO	14 - 52	15 - 54	14.5 - 56	14.7 - 55
		RAFFREDDAMENTO	52 - 40	54 - 40	56 - 34	55 - 33
	η [%]	RISCALDAMENTO	14.8 - 12.8	14.6 - 12.5	14.7 - 12.4	14.7 - 12.4
		RAFFREDDAMENTO	12.8 - 13.2	12.5 - 13.2	12.4 - 13.5	12.4 - 13.8
	T_{acqua} [°C]	RISCALDAMENTO	14.5 - 18.5	16 - 21.5	14 - 21.5	14.7 - 22.5
		RAFFREDDAMENTO	18.5 - 14	21.5 - 15	21 - 15	22.5 - 15
$\Delta T_{raffreddamento}$ [°C]		12	14	22	23	
Tot. acqua usata	[kg]	35.5	46.5	55.6	64.3	
	[litro/giorno]	49	64	76	88	

Tabella 6 - Valori del fattore X [$^{\circ}\text{C}/\text{min}$.] calcolati per ogni ciclo e pressione e relativi alla temperatura media del modulo, alla temperatura massima del modulo (T_{28}) e alla minima (T_{M1}).

FATTORE X [$^{\circ}\text{C}/\text{min}$] CALCOLATO PER LE VARIE PRESSIONI E TEMPERATURE					
		0.5 bar	1 bar	1.5 bar	2 bar
CICLO 30 s ON - 30 s OFF	T_28	1.9375	2.45	2.04	2.73
	T_M1	0.125	0.3	0.29	0.235
	T_media	0.75	1	1.27	1.41
CICLO 30 s ON - 60 s OFF	T_28	0.9	1.11	1.46	1.36
	T_M1	0.09	0.15	0.147	0.175
	T_media	0.6	0.77	1.13	1
CICLO 30 s ON - 120 s OFF	T_28	0.615	0.67	0.87	0.95
	T_M1	0.032	0.061	0.11	0.147
	T_media	0.29	0.272	0.452	0.483
CICLO 30 s ON - 180 s OFF	T_28	0.275	0.653	0.78	0.894
	T_M1	0.022	0.04	0.21	0.2
	T_media	0.29	0.41	0.33	0.412
CICLO 30 s ON - 300 s OFF	T_28	0.2	0.29	0.283	0.304
	T_M1	0.033	0.133	0.052	0.167
	T_media	0.087	0.127	0.214	0.205

Altro fenomeno da evidenziare è relativo alle perdite di carico tra un ugello ed il successivo: mediante l'inserimento di due manometri, posti alle estremità opposte del tubo su cui sono montati i tre ugelli spruzzatori, si sono misurate le perdite di carico: esse sono pari a 0.2 bar. Questa perdita di carico fa sì che quando, ad esempio, il primo ugello è soggetto ad una pressione di 1.5 bar, il terzo ugello lavora ad una pressione di 1.3 bar. Ovviamente, dall'analisi dei profili termici, non si nota un'eccessiva differenza tra gli andamenti di temperatura delle celle sottostanti gli ugelli spruzzatori, quindi ciò non comporterebbe un grosso problema dal punto di vista dell'uniformità del raffreddamento soprattutto a pressioni più elevate ed è anche questo uno dei motivi per cui non si sceglierà mai una pressione di 0.5 bar.

Come già accennato nelle pagine precedenti, bisogna fare un'osservazione sulla formazione di calcare: si è detto che il calcare riduce la trasmittanza ottica del vetro e, quando la pressione è troppo bassa, impedisce la formazione del film di acqua però non si è detto che il calcare riduce lo scambio termico tra l'acqua e il vetro sottostante, anche se di poco, in quanto oppone una resistenza termica in più e non permette il contatto diretto tra le particelle di acqua e vetro.

Inoltre come si può ben notare si è messo in evidenza il problema del calcare solo nel ciclo 30s ON – 180s OFF e nel 30s ON – 300 s OFF alla pressione di 0.5 bar mentre

per gli altri cicli e pressioni è molto meno evidente o, addirittura, non si riscontra alcuna formazione di calcare. Ci sono due motivi per cui si è deciso di non riportare la formazione di calcare per tutti i cicli:

- a. Nei cicli 30s ON – 30s OFF e nel 30s ON – 60s OFF, il tempo tra uno spruzzo ed il successivo è esiguo quindi non si permette all'acqua residua di evaporare e quindi di formare calcare; per quanto riguarda il ciclo 30s ON – 120s OFF si ha sempre la formazione di calcare ma non è così evidente come nei due cicli prima citati, infatti come si nota dai profili di temperatura (figura 34 a destra), c'è un'influenza del calcare solo sulle celle più distanti dagli ugelli, ma è comunque meno incisiva ad esempio del ciclo 30s ON – 180s OFF.
- b. Generalmente si è riscontrata un'elevata quantità di calcare solo per la pressione di 0.5 bar, man mano che la pressione aumenta la quantità di calcare che riesce a formarsi sul pannello è sempre minore.

In generale, si può affermare che nel momento in cui il sistema di raffreddamento viene munito di un addolcitore d'acqua, si risolve il problema del calcare e quindi tutti i problemi dovuti alla sua formazione vengono completamente risolti (per le prossime analisi non verrà messo in evidenza il problema del calcare).

4.1.2 Conclusioni

Per concludere si può affermare che per tutti i cicli effettuati la miglior pressione da utilizzare è pari a 1.5 bar, questo per tre motivi fondamentali:

- a. A questa pressione si ha un'ottima uniformità del raffreddamento soprattutto per i cicli 30s ON – 30s OFF e 30s ON – 60s OFF; infatti a pressioni di 0.5 bar e 1 bar gli andamenti dei profili di temperatura sono molto discontinui e, per alcune celle, lontani tra loro, mentre a pressione di 2 bar si hanno degli andamenti un po' più omogenei

del caso a pressione di 1.5 bar ma non così tanto da poter spostare la scelta su questa pressione.

- b. Dal calcolo del fattore X si è messo in evidenza, soprattutto per la temperatura media del modulo (figura 49 – (1)), che il maggior raffreddamento nel tempo lo si ottiene per la pressione di 1.5 bar. Infatti per quasi tutti i cicli il fattore X tra 1.5 bar e 2 bar non subisce un grosso incremento, come ad esempio nel ciclo 30s ON – 300s OFF in cui rimane costante oppure nel 30s ON – 60s OFF in cui il fattore X subisce un decremento.
- c. I consumi di acqua per questa pressione sono abbastanza elevati, maggiori di quelli a pressione di 0.5 bar e 1 bar ma sicuramente inferiori dei consumi riscontrati a pressione di 2 bar e quindi rappresenterebbero un buon compromesso per ottenere un ottimo raffreddamento di tutte le celle del modulo.

4.1.3 CALCOLO DELLE PERDITE D'ACQUA TRA MONTE E VALLE DEL PANNELLO CON LA 1^a CONFIGURAZIONE.

Per quanto riguarda le perdite di acqua che si hanno tra la zona alta del modulo, in cui sono posizionati gli ugelli, e la parte bassa del modulo in cui è presente la grondaia di raccolta dell'acqua, si è calcolata la differenza di portata tra quella misurata a monte del modulo (all'uscita degli ugelli – tabella 4, capitolo 3) e a valle del modulo (tabella 5, capitolo 4 – riportata in kg) e i valori vengono riportati in tabella 7 a pagina successiva: bisogna però evidenziare che, per le portate a valle, siccome non si ha un unico valore, si è preso come riferimento un valore medio di consumo di acqua, come ad esempio nel caso a 0.5 bar si è considerato un valore pari a 35 kg di acqua (per 50 cicli effettuati).

Come si può notare a 0.5 bar si registra il valore più basso in quanto, essendo bassa la pressione, il getto ricade all'interno del modulo senza fuoriuscire dai lati, mentre a pressione di 1 bar si hanno perdite più elevate in quanto il getto, avendo velocità maggiore e quindi gittata maggiore, tende a fuoriuscire dai lati e questa quantità di acqua persa non viene misurata a valle.

Tabella 7 – Valori di portata misurati a monte del pannello e valori di portata misurati a valle del pannello: calcolo delle perdite di acqua per ogni pressione e del loro valore percentuale rispetto alle portate a monte.

MISURE DI PORTATA A MONTE E A VALLE DEL PANNELLO - VALUTAZIONE DELLE PERDITE											
PRESSIONE	Tempo di misura	Portata a monte			Portata a valle			Perdite di acqua			
[bar]	Min.	kg/s	l/h	Valore medio [l/h]	kg/s	l/h	Valore medio [l/h]	kg/s	l/h	Valore medio [l/h]	Valore %
0.5	1	0.025	90	86.805	0.0217	78.12	78.993	0.0033	11.88	7.812	9%
	2	0.0243	87.48		0.0224	80.64		0.0019	6.84		
	5	0.0239	86.04		0.022	79.2		0.0019	6.84		
	10	0.02325	83.7		0.02167	78.012		0.00158	5.688		
1	1	0.0325	117	114.975	0.0308	110.88	108.711	0.0017	6.12	6.264	5%
	2	0.0319	114.84		0.03083	110.988		0.00107	3.852		
	5	0.0315	113.4		0.02933	105.588		0.00217	7.812		
	10	0.03185	114.66		0.02983	107.388		0.00202	7.272		
1.5	1	0.03895	140.22	139.347	0.0383	137.88	136.44	0.00065	2.34	2.907	2%
	2	0.03875	139.5		0.0383	137.88		0.00045	1.62		
	5	0.03878	139.608		0.03767	135.612		0.00111	3.996		
	10	0.03835	138.06		0.03733	134.388		0.00102	3.672		
2	1	0.045	162	162.9	0.0445	160.2	158.193	0.0005	1.8	4.707	3%
	2	0.045	162		0.0441	158.76		0.0009	3.24		
	5	0.0455	163.8		0.0435	156.6		0.002	7.2		
	10	0.0455	163.8		0.04367	157.212		0.00183	6.588		

4.2 ANALISI DEI PROFILI DI TEMPERATURA CON LA 2^a CONFIGURAZIONE DI UGELLI.

Per quanto riguarda la seconda configurazione di ugelli, rispetto alla prima l'unica cosa che cambia è l'inclinazione degli spruzzatori rispetto al piano orizzontale (quindi rispetto al modulo): per ottenere una maggiore gittata, gli ugelli sono stati ruotati in senso antiorario di circa 20° rispetto alla prima configurazione, andando a formare un angolo di 83° rispetto al piano parallelo al modulo, infatti come si nota dalla figura 50, gli ugelli non toccano più il bordo superiore del pannello come accadeva nella precedente configurazione. I cicli effettuati sono gli stessi eseguiti per la configurazione precedente, con tempi



Figura 50 – 2^a configurazione di ugelli: angolo di inclinazione rispetto al piano orizzontale pari a 53°.

di attesa tra uno spruzzo ed il successivo che variano di ciclo in ciclo. In tutte le prove analizzate, è sempre presente una fase iniziale di riscaldamento del pannello della durata media di 120-130 min. ed una successiva fase di raffreddamento, la cui durata invece dipende dal ciclo ON-OFF utilizzato: di fatto non si riporterà tutta l'analisi della fase di riscaldamento di tutti i cicli, in quanto analoga a quella presentata in precedenza per la 1^a configurazione. L'unica cosa che cambia rispetto alla 1^a configurazione è la posizione in cui viene rilevata la massima temperatura: in questo caso, il massimo valore si riscontra in corrispondenza della termocoppia n° 33 (T_{33}). Come per la prima configurazione, la temperatura minima si misura in corrispondenza della termocoppia M1 (T_{M1}). Inoltre tutti i cicli ON-OFF effettuati per ogni singola prova, sono ripetuti per 50 volte in modo tale da raggiungere delle condizioni di temperatura stazionarie, come visto nel capitolo precedente.

In tutte le prove eseguite si nota che la $T_{AMB.CENTRO}$ (misurata tra la lampada e il pannello) rimane costante e con un valore variabile da 25 °C a 27.5 °C, mentre la temperatura misurata sotto al pannello, $T_{AMB.SOTTO}$, rimane costante e compreso tra 19 °C e 22 °C. Inoltre è stato osservato che la temperatura media del modulo, per tutte le prove,

subisce, nella fase di riscaldamento, un $\Delta T_{\text{RISCALDAMENTO}}$, valutato rispetto alla $T_{\text{AMB.SOTTO}}$, di circa $38\text{ }^{\circ}\text{C} - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Da un'analisi dettagliata dei profili di temperatura ottenuti con la 2^a configurazione, si nota che in tutti i cicli ON-OFF le pressioni che forniscono il miglior raffreddamento sia in termini di omogeneità/uniformità che di tempo, sono 1 bar e 1.5 bar, quindi, di seguito si focalizzerà l'attenzione solo su questi due valori di pressione escludendo a priori la $p = 0.5$ bar in quanto esigua, nonostante la maggior gittata dello spruzzo, e la $p = 2$ bar in quanto induce un raffreddamento molto simile a $p = 1.5$ bar ma con un consumo d'acqua assai più elevato e con perdite ai lati del modulo maggiori del caso rispetto alla prima configurazione.

CICLO 30s ON - 30s OFF

PRESSIONE = 1 bar

Per questa prova è si nota che, alla fine della fase di riscaldamento, durata 125 min. e durante la quale la $T_{\text{AMB.CENTRO}}$ rimane costante a $27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ mentre l'acqua si riscalda da $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, il pannello si trova ad una temperatura media di circa $59\text{ }^{\circ}\text{C}$ e si inizia a raffreddarlo eseguendo un ciclo 30s ON – 30s OFF alla pressione di 1 bar. Con questa pressione si riesce a raffreddare in maniera quasi omogenea circa metà modulo e occorrono 15 cicli (ovvero 15 min.) per ottenere un valore di temperatura media costante pari a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ con un consumo d'acqua di 14.4 litri. Inoltre si è potuto osservare che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, si raffredda da $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ in 5 minuti (5 cicli ON-OFF), il che significa avere acqua a temperatura costante per tutta la fase di raffreddamento (ovviamente questo avviene indipendentemente dalla prova eseguita, come si vedrà in seguito).

Per quanto riguarda il fattore X analizzato si osserva che:

- Per la T_{33} , ovvero la massima temperatura misurata, alla fine dei 125 min. di riscaldamento risulta pari a $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ circa, per poi raggiungere un valore di $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ costante dopo 17 minuti (17 cicli ON-OFF), quindi un valore di X pari a $2.59\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.

- □ Per la T_{M1} (temperatura minima) alla fine della fase di riscaldamento raggiunge i 39 °C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 22 minuti per portarsi a 24.5 °C, mostrando quindi un fattore X pari a $0.66 \frac{22}{20}$.
- □ Per quanto riguarda la temperatura media del modulo, il parametro X pari calcolato risulta pari a $2.27 \frac{22}{20}$.

Gli andamenti di queste tre temperature nel tempo è possibile osservarli in figura 51.

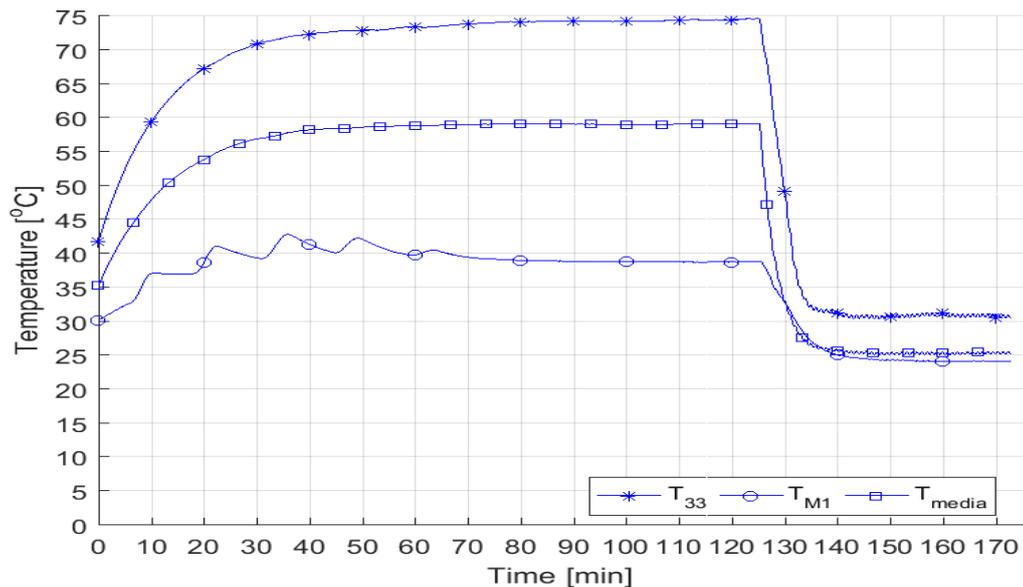


Figura 51 – Andamenti della temperatura massima (T_{33}), della temperatura media e della temperatura minima (T_{M1}) del modulo nel ciclo 30s ON – 30s OFF a $p = 1$ bar, con la 2^a configurazione di ugelli, in funzione del tempo di durata della prova.

In generale per i vari profili di temperatura, è possibile osservare che:

- a. □ Le celle in linea con gli ugelli (figura 53 a sinistra) vengono tutte ben raffreddate con $\Delta T_{RAFFREDDAMENTO}$ pari anche a 45 °C. Per le celle T_{43} e T_{45} si nota che per i primi 5 cicli (ovvero 5 min.) esse presentano un andamento meno lineare legato al fatto che c'è bisogno di eseguire qualche ciclo in più per osservare la completa formazione del film di acqua su queste celle.
- b. □ Le celle tra due ugelli consecutivi (figura 53 a destra) subiscono un raffreddamento molto omogeneo e, per alcune, anche maggiore di quelle in linea con gli ugelli: ad esempio la T_{34} impiega 3 min. per raggiungere la

temperatura di 45 °C mentre la T₃₅ impiega 5 min. per raggiungere lo stesso valore, nonostante sia a temperatura più bassa alla fine della fase di riscaldamento. Questo fenomeno è principalmente legato al fatto che nel momento in cui si spruzza acqua si verifica l'incrocio dei due getti, provenienti dal 1° e dal 2° ugello, proprio sulla colonna delle celle 04-44 il che comporta una quantità di acqua leggermente maggiore rispetto alle altre celle in linea con gli ugelli (figura 52)



Figura 52 - Incrocio dei due getti provenienti dal 1° e 2° ugello sulla colonna di celle da 04 a 44.

In questo caso tutte le temperature indicate con T_M subiscono un buon raffreddamento, con $\Delta T_{\text{RAFFREDDAMENTO}}$ pari anche a 23 °C, a conferma del fatto che con questa pressione si riesce a raffreddare bene tutto il modulo. Per quanto riguarda il consumo d'acqua giornaliero, ipotizzando un periodo di funzionamento di 6 ore, esso è pari a 351 litri/giorno.

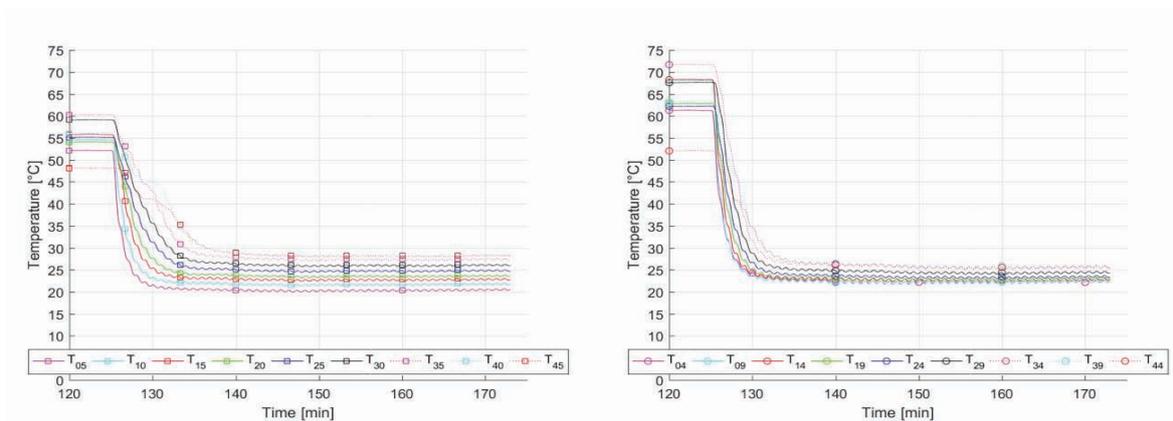


Figura 53 - ciclo 30s ON 30s OFF a pressione di 1 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

Confronto con la 1^a configurazione

Come si può ben notare dai valori analizzati e dalla figura 53, con la 2^a configurazione di ugelli gli andamenti dei profili di temperatura sono assai più uniformi rispetto alla 1^a configurazione, infatti tutte le temperature, alla fine dei 50 cicli ON-OFF si trovano in un range di temperatura fra 20 °C e 32 °C mentre, nella 1^a configurazione, il range di temperatura è più ampio (16 - 36 °C), indice di una peggiore distribuzione dell'acqua spruzzata. Inoltre, si nota che per la 2^a configurazione la temperatura media del modulo raggiunge un valore costante in un tempo minore, 11 min. in meno rispetto alla 1^a configurazione (11 cicli in meno). Inoltre osservando il fattore X, calcolato per la temperatura media e per la T_{M1} , si nota che assume un valore molto maggiore (più del doppio) di quello calcolato per lo stesso ciclo e temperature con la 1^a configurazione di ugelli.

PRESSIONE = 1.5 bar

Per questa prova è possibile osservare che al termine della fase di riscaldamento, durata 125 min. e durante la quale la $T_{AMB.CENTRO}$ rimane costante e pari a 28 °C mentre l'acqua si riscalda da 21 °C a 26 °C, il pannello raggiunge una temperatura media di 59 °C mentre il raffreddamento viene eseguito 50 cicli 30s ON – 30s OFF alla pressione di 1.5 bar. Con questa pressione si riesce a raffreddare in maniera quasi omogenea circa metà modulo e occorrono 13 cicli (ovvero 13 min.) per ottenere un valore di temperatura media costante pari a 25 °C con un consumo d'acqua di 15.1 litri (ovvero 0.7 litri in più rispetto al ciclo precedente a $p = 1$ bar). Inoltre si è potuto osservare che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, subisce un raffreddamento di 6°C, da 26°C a 20°C, in 4 minuti (4 cicli ON-OFF), il che significa avere, anche in questo caso, acqua a temperatura costante per tutta la fase di raffreddamento.

Per quanto riguarda il fattore X calcolato è possibile osservare che:

- La T_{33} (temperatura massima), alla fine dei 125 min. di riscaldamento risulta pari a 75 °C, per poi raggiungere un valore di 27.5 °C costante dopo 17 minuti (17 cicli ON-OFF), quindi il parametro X assume un valore pari a $2.79 \frac{°C}{min}$ (ovvero $0.2 \frac{°C}{min}$ in più del caso a $p = 1$ bar);
- La T_{M1} (temperatura minima), alla fine della fase di riscaldamento arriva a 39 °C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 15 minuti per

stabilizzarsi a 24 °C, mostrando quindi un fattore X pari a $1 \frac{77}{77}$ (più alto del caso a p = 1 bar di circa $0.4 \frac{77}{77}$).

- □ La temperatura media del modulo mostra un parametro X pari a $2.62 \frac{77}{77}$.

Gli andamenti di queste tre temperature nel tempo vengono riportati in figura 54.

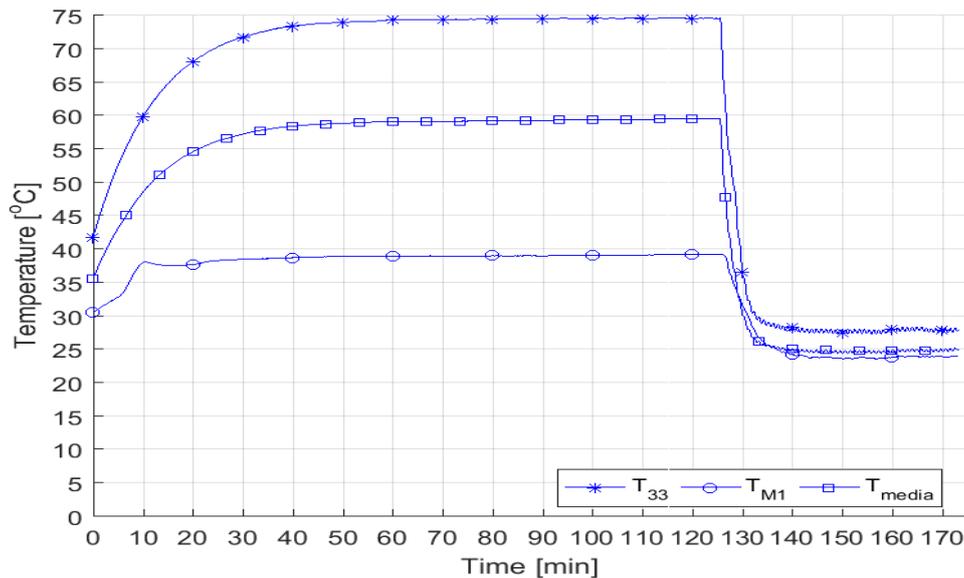


Figura 54 – Andamenti della temperatura massima (T_{33}), della temperatura media e della temperatura minima (T_{M1}) del modulo nel ciclo 30s ON – 30s OFF a p = 1.5 bar, con la 2^a configurazione di ugelli, in funzione del tempo di durata della prova.

In generale per i vari profili di temperatura è possibile osservare che:

- Le celle in corrispondenza degli ugelli (figura 55 a sinistra) vengono tutte ben raffreddate, anche le celle in basso T_{43} e T_{45} subiscono un $\Delta T_{\text{RAFFREDDAMENTO}}$ pari a 25 °C e non presentano più quell'andamento poco costante nella fase iniziale di raffreddamento, come visto nel caso p = 1 bar.
- Le celle tra due ugelli consecutivi (figura 55 a destra) subiscono un raffreddamento molto omogeneo e vale quanto detto nel caso precedente a p = 1 bar: anche per la pressione di 1.5 bar ovviamente si verifica l'incrocio dei due getti (del 1° e 2° ugello).

Anche in questo caso tutte le temperature indicate con T_M subiscono un ottimo raffreddamento, $\Delta T_{\text{RAFFREDDAMENTO}}$ pari anche a $28\text{ }^\circ\text{C}$ (maggiore del caso precedente). Il consumo d'acqua giornaliero si attesta sui 421 litri/giorno.

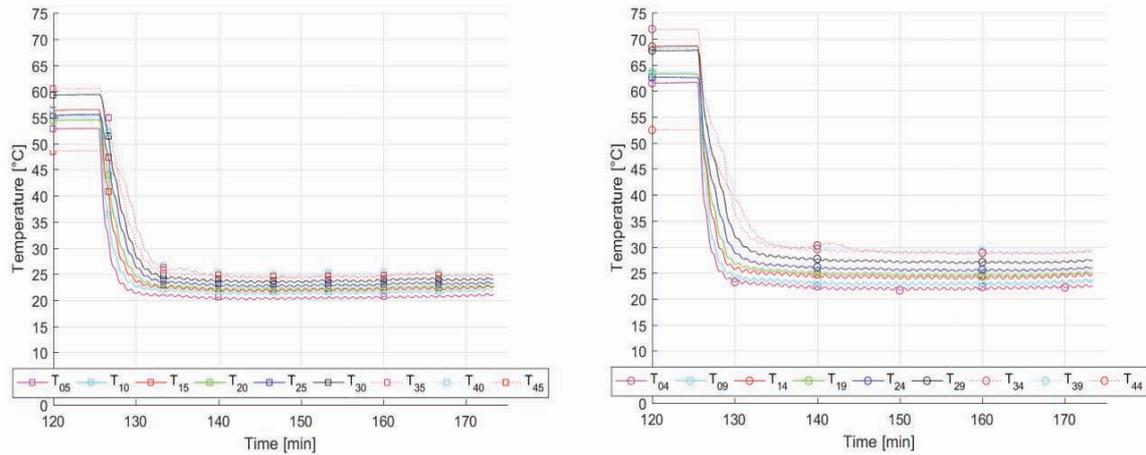


Figura 55 - ciclo 30s ON 30s OFF a pressione di 1.5 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

Confronto con la 1^a configurazione

Come si può ben notare dai valori analizzati e dalla figura 56, con la 2^a configurazione di ugelli gli andamenti dei profili di temperatura presentano andamenti più costanti nel tempo rispetto alla 1^a configurazione, infatti tutte le celle si trovano ad una temperatura costante già dopo 13 cicli (13 min.) mentre con la 1^o configurazione ne servono almeno il doppio. Inoltre, alla fine dei 50 cicli ON-OFF, con la 2^a configurazione le temperature si assestano in un range $21\text{--}29\text{ }^\circ\text{C}$ mentre, nella 1^a configurazione, la temperatura si assesta in un range $17\text{ }^\circ\text{C} - 29\text{ }^\circ\text{C}$: range più ampio, indice di una peggior distribuzione del film d'acqua sulla superficie.

CICLO 30s ON - 60s OFF

PRESSIONE = 1 bar

Per questa prova è possibile osservare che alla fine della fase di riscaldamento, durata 180 min. e durante la quale la $T_{\text{AMB.CENTRO}}$ rimane circa costante a $28\text{ }^\circ\text{C}$ mentre l'acqua si riscalda da $16\text{ }^\circ\text{C}$ a $21.5\text{ }^\circ\text{C}$, il pannello raggiunge una temperatura media di $55.5\text{ }^\circ\text{C}$. La fase di raffreddamento viene operata con 50 cicli 30s ON – 60s OFF alla pressione di 1 bar. Con questa pressione si riesce a raffreddare in maniera quasi omogenea più di metà

modulo ed occorrono 15 cicli (ovvero 23 min.) per ottenere un valore di temperatura media costante pari a 26 °C con un consumo d'acqua di 14.4 litri. Inoltre, si osserva che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, si raffredda da 21.5 °C a 17.5 °C costanti in 2 minuti (2 cicli ON-OFF).

Per quanto riguarda il fattore X calcolato si osserva che:

- □ la T_{33} , ovvero la massima temperatura misurata, alla fine dei 180 min. di riscaldamento risulta pari a 72.5 °C circa, per poi raggiungere un valore di 32.5 °C costanti dopo 23 minuti (16 cicli ON-OFF), mostrando un valore di X pari a $1.74 \frac{[27]}{[2][22]}$;
- □ la T_{M1} (temperatura minima) invece, alla fine della fase di riscaldamento arriva a 33 °C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 33 minuti per raggiungere i 24 °C, mostrando quindi un fattore X pari a $0.27 \frac{[27]}{[2][22]}$.
- □ Per quanto riguarda la temperatura media del modulo, il parametro X risulta pari a $1.28 \frac{[27]}{[2][22]}$.

Gli andamenti di queste tre temperature nel tempo vengono riportati in figura 56.

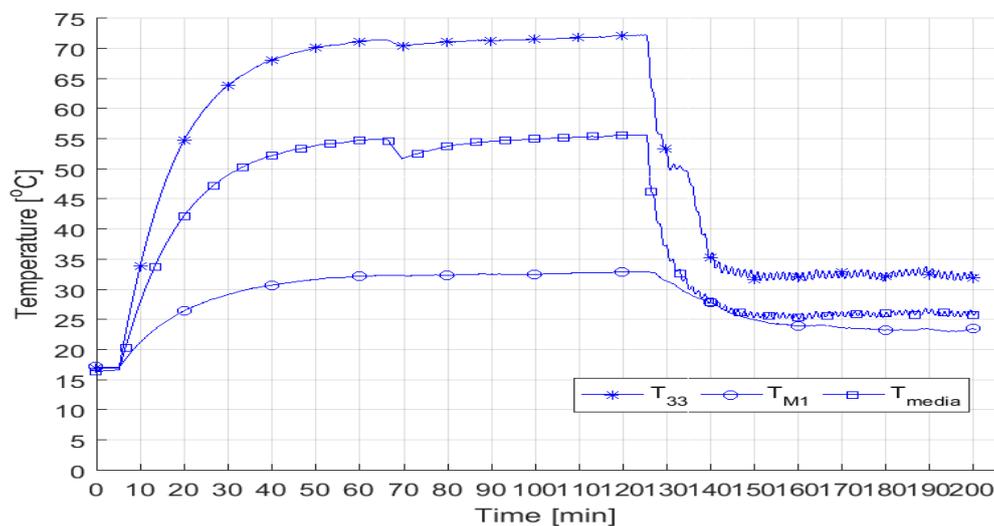


Figura 56 – Andamenti della temperatura massima (T_{33}), della temperatura media e della temperatura minima (T_{M1}) del modulo nel ciclo 30s ON – 60s OFF a $p = 1$ bar, con la 2^a configurazione di ugelli, in funzione del tempo di durata della prova.

In generale, per i vari profili di temperatura è possibile osservare che:

- a. □ Per le celle in linea con gli ugelli (figura 57 a sinistra) si nota che da T_{05} a T_{25} (come da T_{08} a T_{28}) i profili di temperatura sono molto costanti, mentre

da T_{30} a T_{45} (come da T_{33} a T_{43}) si osserva che i primi 6 cicli hanno andamenti meno costanti per poi raggiungere valori di temperatura costanti simili alle altre celle.

b. □ Le celle tra due ugelli consecutivi (figura 57 a destra) subiscono un raffreddamento molto omogeneo solo che nella fase finale del raffreddamento, subiscono tutte un incremento di temperatura di circa $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ causato da un aumento di temperatura dell'acqua proveniente dall'acquedotto anch'esso di un grado centigrado.

In questo caso tutte le temperature indicate con T_M subiscono un buon raffreddamento, con $\Delta T_{\text{RAFFREDDAMENTO}}$ pari anche a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, a conferma del fatto che con questa pressione si riesce ad ottenere un film di acqua uniforme su tutto il modulo. Per quanto riguarda il consumo d'acqua giornaliero esso si attesta a 234 litri/giorno.

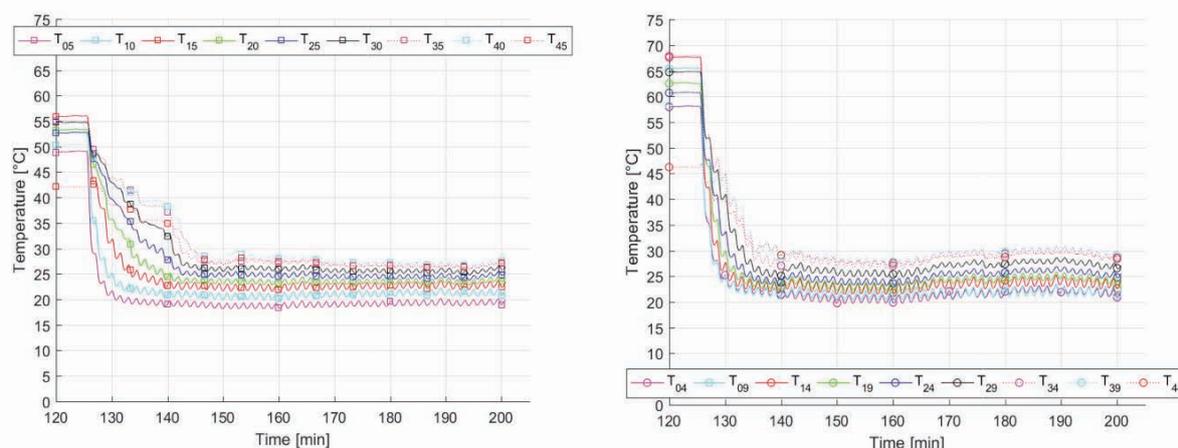


Figura 57 - ciclo 30s ON 60s OFF a pressione di 1 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

Confronto con la 1^a configurazione

Come si può notare dai valori analizzati e dalla figura 57, con la 2^a configurazione di ugelli gli andamenti dei profili di temperatura migliorano tanto rispetto alla 1^a configurazione, sia in termini di uniformità che di tempo: infatti non si verificano più quegli andamenti fortemente variabili per le celle T_{24} e T_{39} come nel ciclo 30s ON – 60s OFF a $p = 1\text{ bar}$ con la 1^a configurazione di ugelli. Inoltre alla fine dei 50 cicli ON-OFF, con la 2^a configurazione, le temperature variano in un range tra $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ mentre,

nella 1^a configurazione, il range di temperatura va da 18 °C a 50 °C quindi molto ampio, nonostante la temperatura dell'acqua in questa 2^a configurazione sia di 3 °C in più rispetto a quella misurata nella 1^a configurazione.

PRESSIONE = 1.5 bar

Per questa prova è possibile osservare che alla fine della fase di riscaldamento, durata 135 min. e durante la quale la $T_{AMB.CENTRO}$ rimane costante a 28 °C mentre l'acqua si riscalda da 21 °C a 26 °C, il pannello si trova ad una temperatura media di 59 °C. La fase di raffreddamento avviene eseguendo 50 cicli 30s ON – 60s OFF alla pressione di 1.5 bar. Con questa pressione si riesce a raffreddare in maniera quasi omogenea circa metà modulo e servono 13 cicli (ovvero circa 20 min.) per ottenere un valore di temperatura media costante pari a 25 °C con un consumo d'acqua pari a 15.1 litri (ovvero 0.7 litri in più rispetto al ciclo precedente a $p = 1$ bar). Inoltre si osserva che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, si raffredda da 26°C a 20°C in 4 minuti (3 cicli ON-OFF), il che significa disporre anche in questo caso di acqua a temperatura costante per tutta la prova di raffreddamento.

Per quanto riguarda il fattore X calcolato si osserva che:

- La T_{33} (temperatura massima misurata), alla fine dei 135 min. di riscaldamento risulta pari a 75 °C, per poi raggiungere un valore di 27.5 °C costante dopo 17 minuti (12 cicli ON-OFF), quindi si ottiene un valore di X pari a $2.79 \frac{^{\circ}C}{min}$ (ovvero $0.2 \frac{^{\circ}C}{min}$ in più del caso a $p = 1$ bar).
- La T_{M1} (temperatura minima), alla fine della fase di riscaldamento arriva a 39 °C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 15 minuti per assestarsi a 24 °C, mostrando quindi un fattore X pari a $1 \frac{^{\circ}C}{min}$ (più alto del caso a $p = 1$ bar di circa $0.4 \frac{^{\circ}C}{min}$).
- La temperatura media del modulo mostra un valore del parametro X pari a $2.62 \frac{^{\circ}C}{min}$.

Gli andamenti di queste tre temperature nel tempo vengono riportati in figura 58.

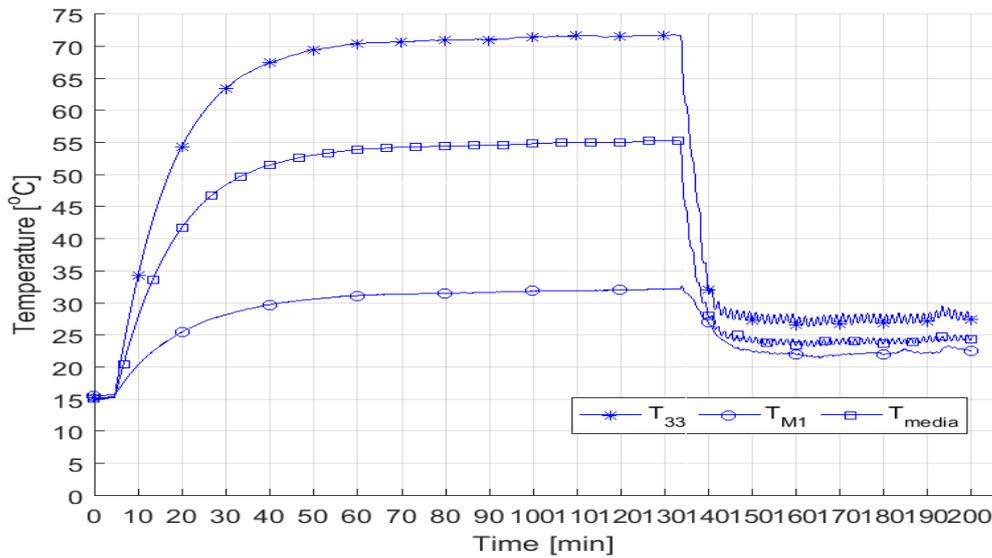


Figura 58 – Andamenti della temperatura massima (T_{33}), della temperatura media e della temperatura minima (T_{M1}) del modulo nel ciclo 30s ON – 60s OFF a $p = 1.5$ bar, con la 2^a configurazione di ugelli, in funzione del tempo di durata della prova.

In generale, per i vari profili di temperatura è possibile osservare che:

- a. □ Per le celle in linea con gli ugelli (figura 59 a sinistra) si nota che il raffreddamento è molto uniforme e costante, riuscendo a bagnare bene anche le celle più lontane dagli ugelli (T_{43} e T_{45}).
- b. □ Le celle tra due ugelli consecutivi (figura 59 a destra) subiscono un ottimo raffreddamento ed è possibile osservare che le celle alla fine dei 50 cicli ON-OFF si stabilizzano in un intervallo di temperature compreso tra 21 °C e 31 °C (infatti il ΔT_{04-44} è pari a 10 °C).

Inoltre, tutte le temperature indicate con la lettera M subiscono un ottimo raffreddamento, $\Delta T_{\text{RAFFREDDAMENTO}}$ pari anche a 23 °C. Il consumo d'acqua giornaliero stimato, si attesta a 280 litri/giorno (46 litri/giorno in più al caso $p=1$ bar).

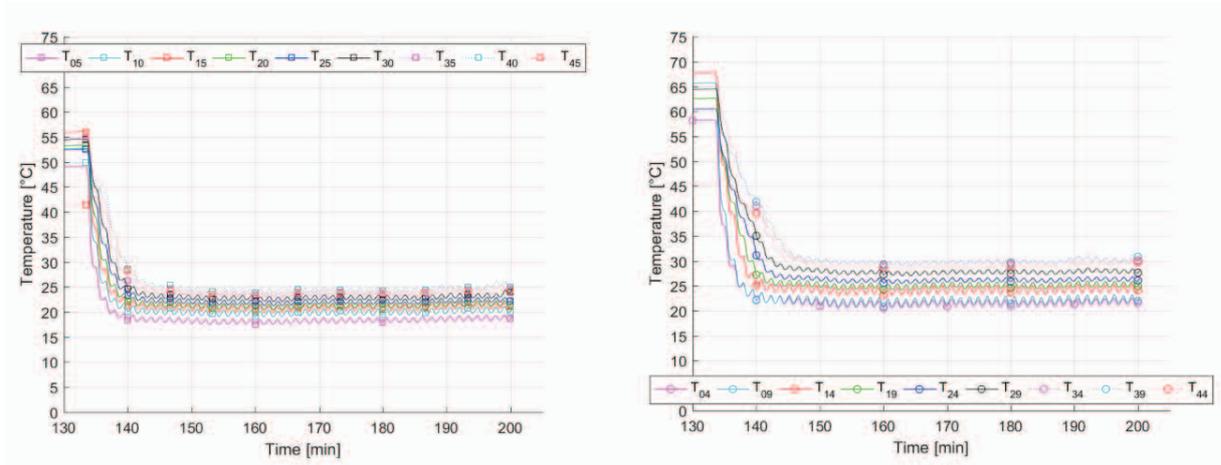


Figura 59 - ciclo 30s ON 60s OFF a pressione di 1.5 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

Confronto con la 1^a configurazione

Come si può ben notare dai valori analizzati e dalla figura 59, con la 2^a configurazione di ugelli gli andamenti dei profili di temperatura migliorano tanto rispetto alla 1^a configurazione, sia in termini di uniformità che di tempo: questo miglioramento lo si ottiene principalmente per le celle situate nella parte bassa del modulo tra le due colonne di celle in linea con gli ugelli (T_{29} , T_{34} , T_{39} , T_{44}) che nella 1^a configurazione presentavano andamenti poco costanti.

CICLO 30s ON - 120s OFF

PRESSIONE = 1 bar

Per questa prova si è esegue una prima fase di riscaldamento della durata di 130 min., durante la quale la $T_{AMB.CENTRO}$ rimane praticamente costante e pari a 24.5 °C mentre l'acqua si riscalda da 18 °C a 22 °C e, alla fine della quale, il pannello si trova ad una temperatura media di 57°C. Dopo i 130 min. di riscaldamento inizia la fase di raffreddamento del modulo mediante 50 30s ON – 120s OFF alla pressione di 1 bar. Con questa pressione servono 22 cicli (ovvero 56 min.) per ottenere un valore di temperatura media costante nell'intorno dei 30 °C con un consumo d'acqua pari a 21 litri. Inoltre, si osserva che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, subisce un raffreddamento di 4 °C, da 22 °C a 18 °C, dopo 16 minuti (7 cicli ON-OFF).

Per quanto riguarda il fattore X calcolato si osserva che:

- □ La T_{33} , ovvero la massima temperatura misurata, alla fine dei 130 min. di riscaldamento risulta pari a $73\text{ }^{\circ}\text{C}$, per poi raggiungere un valore nell'intorno dei $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ dopo 78 minuti (31 cicli ON-OFF), mostrando un valore di X pari a $0.49 \frac{\text{[?]}}{\text{[?]}}$.
- □ La T_{M1} (temperatura minima), alla fine della fase di riscaldamento arriva a $34.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 54 minuti per assestarsi sui $25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, mostrando quindi un fattore X pari a $0.17 \frac{\text{[?]}}{\text{[?]}}$.
- □ La temperatura media del modulo mostra un valore del parametro X pari a $0.48 \frac{\text{[?]}}{\text{[?]}}$.

Gli andamenti di queste tre temperature vengono riportati in figura 60.

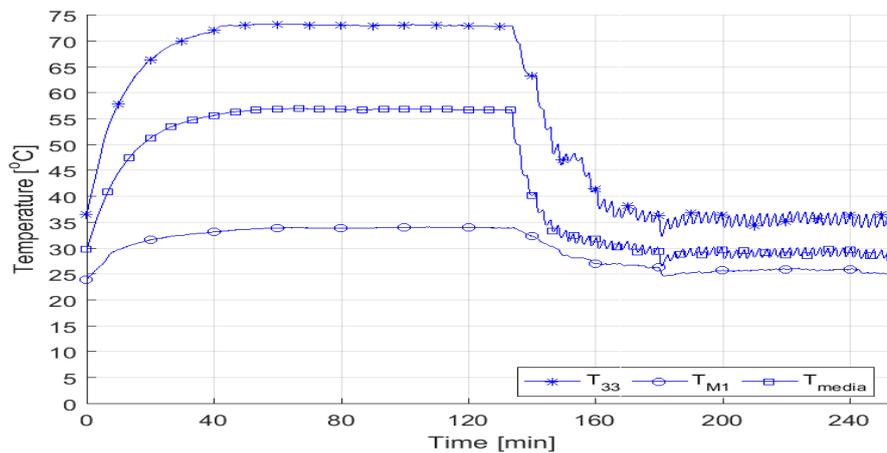


Figura 60 – Andamenti della temperatura massima (T_{33}), della temperatura media e della temperatura minima (T_{M1}) del modulo nel ciclo 30s ON – 120s OFF a $p = 1\text{ bar}$, con la 2^a configurazione di ugelli, in funzione del tempo di durata della prova.

In generale, per i vari profili di temperatura, è possibile osservare quanto segue:

- a. □ Per le celle in linea con gli ugelli (figura 61 a sinistra) si nota che da T_{05} a T_{25} (come da T_{08} a T_{28}) i profili di temperatura sono molto uniformi tra loro mentre da T_{30} a T_{45} (come da T_{33} a T_{43}) che per i primi 10 cicli (25 min.) l'andamento è risulta poco costante anche se poi raggiunge valori di temperatura costanti simili alle altre celle.
- b. □ Le celle tra due ugelli consecutivi (figura 61 a destra) mostrano profili di temperatura molto uniformi tra loro nei primi 7 cicli (18 min.), per poi

distanziarsi di circa 2 °C gli uni dagli altri e rimanere costanti. Questo è sempre legato al fatto che su questa colonna di celle si verifica l'incrocio dei due getti (come visto in precedenza).

In questo caso tutte le temperature indicate con la lettera M subiscono un ottimo raffreddamento, $\Delta T_{\text{RAFFREDDAMENTO}}$ pari anche a 19 °C. Per quanto riguarda il consumo d'acqua giornaliero si stima sia pari a 140 litri/giorno.

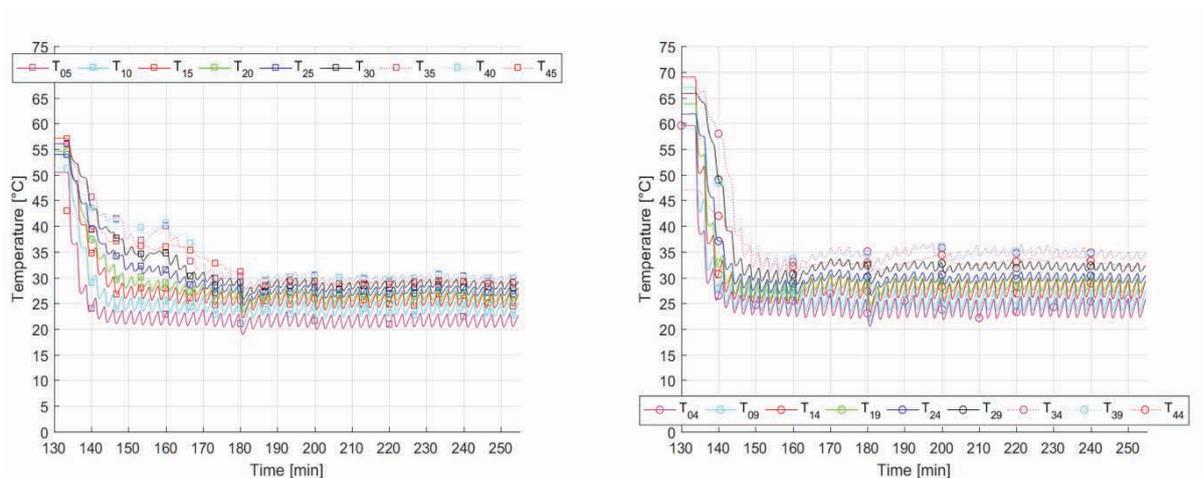


Figura 61 - ciclo 30s ON 120s OFF a pressione di 1 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

Confronto con la 1^a configurazione

Come si può ben notare dai valori analizzati e dalla figura 61, con la 2^a configurazione di ugelli gli andamenti dei profili di temperatura sono nettamente migliori rispetto a quelli ottenuti con la 1^a configurazione, soprattutto per le celle poste tra due ugelli consecutivi da T₂₄ a T₄₄ che nel ciclo 30s ON – 120s OFF a p = 1 bar (1^a configurazione) mostrano andamenti molto variabili per tutta la durata del riscaldamento. Inoltre, a conferma del fatto che con questa 2^a configurazione si ottiene un netto miglioramento nel raffreddamento del modulo c'è la temperatura dell'acqua che nella 2^a configurazione è maggiore (3°C in più) rispetto a quella misurata per lo stesso ciclo e pressione con la 1^a configurazione.

PRESSIONE = 1.5 bar

Per questa prova è possibile osservare che alla fine della fase di riscaldamento, durata 122 min. e durante la quale la $T_{AMB.CENTRO}$ rimane costante a 24 °C mentre l'acqua si riscalda da 17.5°C a 21 °C, la temperatura media del pannello trova un equilibrio nell'intorno dei 56 °C. Il raffreddamento in questo caso viene eseguito con 50 ciclo 30s ON – 120s OFF alla pressione di 1.5 bar. Con questa pressione servono 17 cicli (ovvero circa 43 min.) per ottenere un valore di temperatura media praticamente costanti e pari a 28 °C, con un consumo d'acqua di 19.8 litri, ovvero più di 1 litro in meno rispetto al ciclo precedente a $p = 1$ bar. Inoltre si osserva che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, subisce un raffreddamento di 4 °C, da 21°C a 17°C, in 10 min. (4 cicli ON-OFF)

Per quanto riguarda il fattore X calcolato, si osserva che:

- La T_{33} (temperatura massima misurata), alla fine dei 122 min. di riscaldamento risulta pari a 72.5 °C, per poi raggiungere l'intorno dei 34 °C dopo 58 minuti (17 cicli ON-OFF), mostrando un valore di X pari a $0.66 \frac{°C}{min}$ (ovvero $0.17 \frac{°C}{min}$ in più del caso a $p = 1$ bar).
- La T_{M1} (temperatura minima), alla fine della fase di riscaldamento raggiunge i 34 °C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 26 minuti per raggiungere i 25 °C, mostrando quindi un fattore X pari a $0.35 \frac{°C}{min}$ (più alto del caso a $p = 1$ bar di circa $0.2 \frac{°C}{min}$).
- Per quanto riguarda la temperatura media del modulo, il parametro X risulta pari a $0.65 \frac{°C}{min}$.

Gli andamenti di queste tre temperature nel tempo vengono riportati in figura 62.

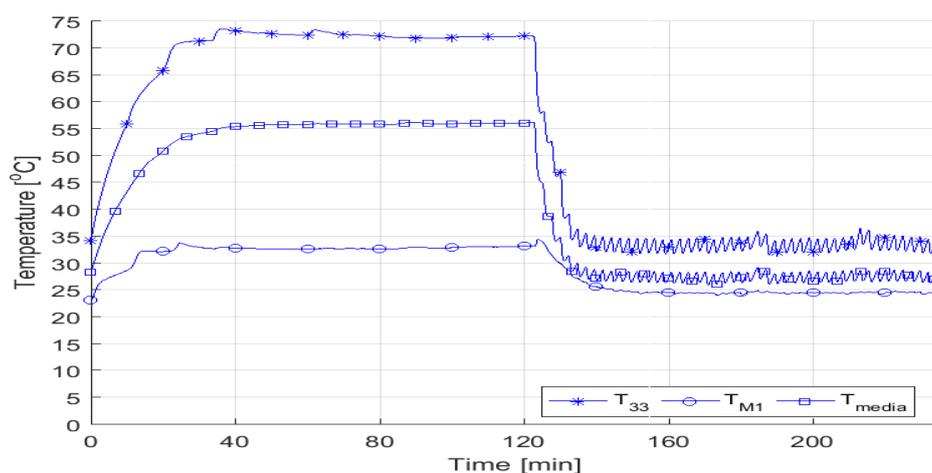


Figura 62 – Andamenti della temperatura massima (T_{33}), della temperatura media e della temperatura minima (T_{M1}) del modulo nel ciclo 30s ON – 120s OFF a $p = 1.5$ bar, con la 2^a configurazione di ugelli, in funzione del tempo di durata della prova.

In generale per i vari profili di temperatura è possibile osservare che:

- a. □ Per le celle in linea con gli ugelli (figura 63 a sinistra) si nota che il raffreddamento è molto incisivo con andamenti dei profili di temperatura molto vicini tra loro, riuscendo a bagnare molto bene anche le celle più lontane da essi (T_{43} e T_{45})
- b. □ Le celle tra due ugelli consecutivi (figura 63 a destra) si notano dei profili di temperatura già molto costanti dopo i primi 7 cicli ovvero dopo 18 min., indice di un'ottima uniformità nel raffreddamento.

Inoltre, tutte le temperature indicate con la lettera M subiscono un ottimo raffreddamento, $\Delta T_{\text{RAFFREDDAMENTO}}$ pari anche a 19 °C, come riscontrato a pressione di 1 bar. Per quanto riguarda il consumo di acqua giornaliero, ipotizzando sempre le 6 ore di funzionamento del sistema di raffreddamento, servono per questo valore di pressione 168 litri/giorno (28 litri/giorno in più al caso $p=1$ bar).

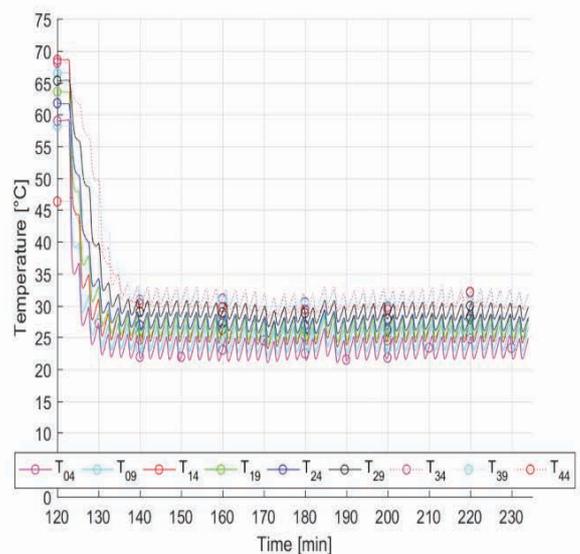
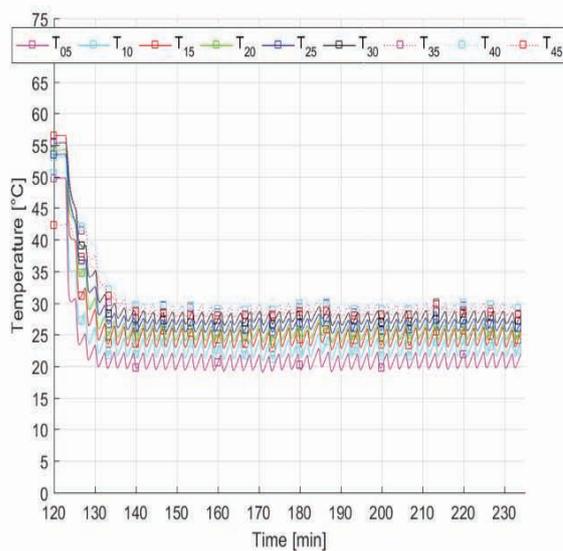


Figura 63 - ciclo 30s ON 120s OFF a pressione di 1.5 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

Confronto con la 1^a configurazione

Per quanto riguarda questo ciclo e pressione si può mettere in evidenza il fatto che in termini di rapidità di raffreddamento si ha che per molte celle (fino alla riga T₁₈ – T₁₉ – T₂₀ inclusa) le cose sono simili tra la 1^a e la 2^a configurazione, mentre dalla riga T₂₃ – T₂₄ – T₂₅ in poi il raffreddamento è molto più rapido con la 2^a configurazione nonostante la temperatura dell'acqua sia più alta di quella misurata nello stesso ciclo e pressione con la 1^a configurazione (2 °C in più).

CICLO 30s ON - 180s OFF

PRESSIONE = 1 bar

Per questa prova la fase di riscaldamento è durata 130 min., durante la quale la T_{AMB.CENTRO} si aggira nell'intorno dei 22 °C mentre l'acqua subisce un riscaldamento da 17 °C a 24 °C e alla fine della quale il pannello si trova ad una temperatura media di 58 °C. Dopo i 130 min. di riscaldamento, il modulo viene raffreddato con 50 cicli 30s ON – 180s OFF alla pressione di 1 bar. Con questa pressione occorrono 16 cicli (ovvero 56 min.) per ottenere un valore di temperatura media costante a 33 °C con un consumo d'acqua pari a 15.3 litri. Inoltre si è osservato che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, si riscalda da 24 °C a 20 °C costanti dopo 10 minuti

(3 cicli ON-OFF), il che vuol dire avere acqua a temperatura costante per tutta la fase di riscaldamento.

Per quanto riguarda il fattore X calcolato si osserva che:

- □ La T_{33} , ovvero la massima temperatura misurata, alla fine dei 130 min. di riscaldamento raggiunge un valore di 74 °C, per poi assestarsi nell'intorno dei 38 °C dopo 100 minuti (29 cicli ON-OFF), mostrando un valore di X pari a $0.36 \frac{[27]}{[2][22]}$.
- □ La T_{M1} (temperatura minima), alla fine della fase di riscaldamento arriva a 37.5 °C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 45 minuti per raggiungere i 30 °C, mostrando quindi un fattore X pari a $0.17 \frac{[27]}{[2][22]}$.
- □ La temperatura media del modulo mostra un valore del parametro X pari a $0.45 \frac{[27]}{[2][22]}$.

Gli andamenti di queste tre temperature sono riportati in figura 64.

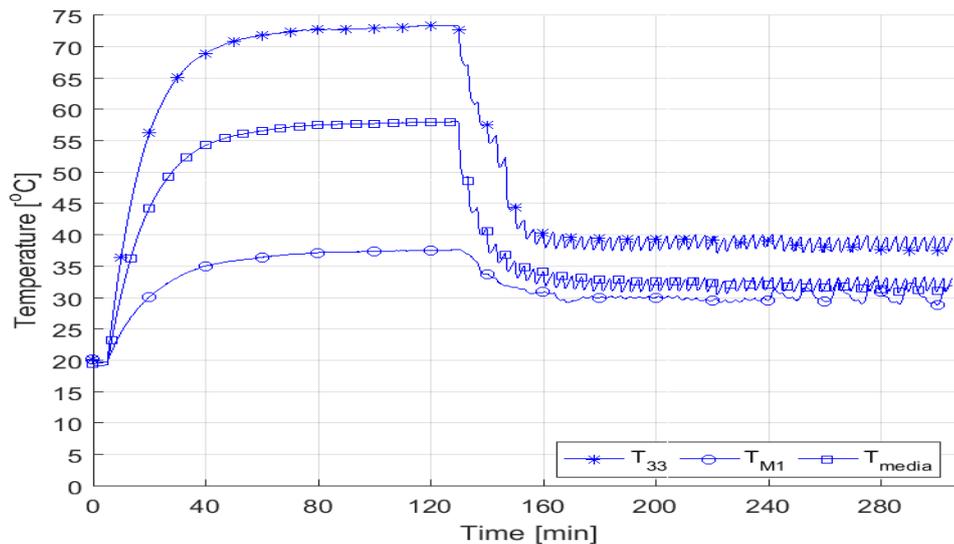


Figura 64 – Andamenti della temperatura massima (T_{33}), della temperatura media e della temperatura minima (T_{M1}) del modulo nel ciclo 30s ON – 180s OFF a $p = 1$ bar, con la 2^a configurazione di ugelli, in funzione del tempo di durata della prova.

In generale per i vari profili di temperatura è possibile osservare che:

- a. □ Per le celle in linea con gli ugelli (figura 65 a sinistra) si nota che da T_{05} a T_{30} (come da T_{08} a T_{28}) i profili di temperatura sono molto uniformi tra loro, mentre T_{35} , T_{40} e T_{45} (come da T_{33} a T_{43}) inizialmente subiscono un

raffreddamento più lento e bisogna attendere il 13° ciclo ON-OFF (ovvero dopo 46 min.) per osservare un andamento di temperatura costate ed omogeneo come gli altri.

b. □ Per le celle tra due ugelli consecutivi (figura 65 a destra) si nota che tutti i profili di temperatura hanno andamenti uniformi tra loro, solo la T_{44} inizialmente riceve un raffreddamento meno incisivo.

In questo caso tutte le temperature indicate con la lettera M subiscono un ottimo raffreddamento, $\Delta T_{\text{RAFFREDDAMENTO}}$ pari anche a 20 °C, però per la T_{M1} si nota che nella fase finale (gli ultimi 18 cicli) ha un andamento poco costante e ciò potrebbe essere legato alla presenza di calcare, la cui formazione risulta molto più accentuata rispetto a tutte le prove precedenti (nelle quali il calcare non è per nulla presente o in quantità minore). Il calcare riduce lo scambio termico e blocca il film di liquido. Per quanto riguarda il consumo di acqua giornaliero si attesta a 100 litri/giorno.

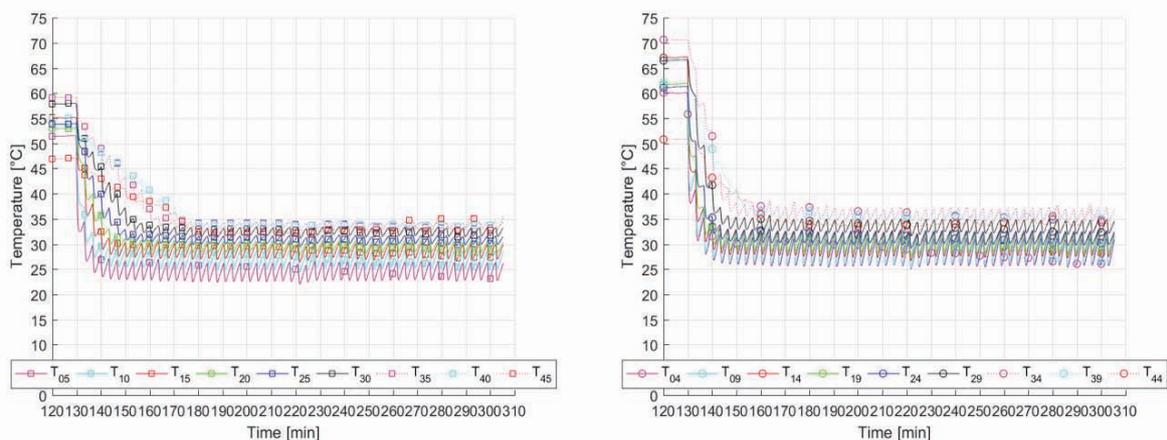


Figura 65 - ciclo 30s ON 180s OFF a pressione di 1 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

Confronto con la 1^a configurazione

Come si osserva da figura 65, per la 2^a configurazione di ugelli il raffreddamento è nettamente migliore soprattutto per quanto riguarda l'omogeneità dei profili di temperatura relativi alle celle da T_{04} a T_{44} (come anche di T_{28} , T_{33} , e T_{38}) le quali, nel ciclo 30s ON – 180s OFF a $p = 1$ bar, subiscono un pessimo raffreddamento e per nulla costante.

PRESSIONE = 1.5 bar

Per questa prova la fase di riscaldamento è durata 125 min., durante la quale la $T_{AMB.CENTRO}$ rimane costante a 27.5 °C mentre l'acqua si riscalda da 17.5°C a 24 °C e alla fine della quale il pannello si trova ad una temperatura media di 57.5 °C. Il raffreddamento si ottiene eseguendo 50 cicli 30s ON – 180s OFF alla pressione di 1.5 bar. Con questa pressione servono 16 cicli (ovvero 56 min.) per ottenere un valore di temperatura media pari a 33 °C, con un consumo d'acqua pari a 18.6 litri, ovvero 3.3 litri in più rispetto al ciclo precedente a $p = 1$ bar. Inoltre si è potuto osservare che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, subisce un raffreddamento di 3°C, da 24°C a 21°C costanti, in 4 min. (ovvero dopo il 1° ciclo ON-OFF).

Per quanto riguarda il fattore X calcolato si osserva che:

- La T_{33} (temperatura massima misurata), alla fine dei 125 min. di riscaldamento risulta pari a 74 °C, per poi raggiungere l'intorno dei 37.5 °C dopo 63 minuti (18 cicli ON-OFF), mostrando un valore di X pari a $0.58 \frac{°C}{min}$ (ovvero $0.22 \frac{°C}{min}$ in più del caso a $p = 1$ bar).
- La T_{M1} (temperatura minima) invece, alla fine della fase di riscaldamento si assesta sui 37.5 °C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 35 minuti per raggiungere i 28 °C costanti mostrando quindi un fattore X è pari a $0.27 \frac{°C}{min}$ (più alto del caso a $p = 1$ bar di $0.1 \frac{°C}{min}$).
- Per quanto riguarda la temperatura media del modulo, il parametro X pari a $0.44 \frac{°C}{min}$.

Gli andamenti di queste tre temperature è possibile osservarlo in figura 66.

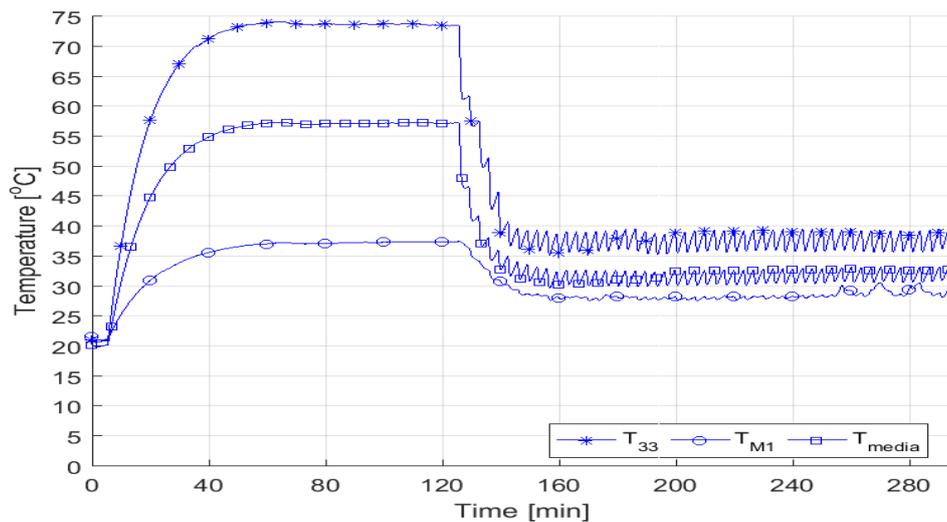


Figura 66 – Andamenti della temperatura massima (T_{33}), della temperatura media e della temperatura minima (T_{M1}) del modulo nel ciclo 30s ON – 180s OFF a $p = 1.5$ bar, con la 2^a configurazione di ugelli, in funzione del tempo di durata della prova.

In generale per i vari profili di temperatura è possibile osservare che:

- a. □ Per le celle in corrispondenza degli ugelli (figura 67 a sinistra) non si nota alcun andamento anomalo dei profili di temperatura con un raffreddamento molto incisivo, riuscendo a bagnare molto bene anche le celle più lontane (T_{43} e T_{45})
- b. □ Per le celle tra due ugelli consecutivi (figura 67 a destra) si nota che da T_{04} a T_{29} gli andamenti sono molto uniformi fin dal 1° ciclo mentre, per T_{34} , T_{39} e T_{44} si ottiene un andamento costante dei profili di temperatura dopo 20 cicli (ovvero dopo 70 min. dall’inizio del raffreddamento). Questo fenomeno è sempre legato alla presenza di goccioline nella seconda metà del pannello (partendo dalla parte alta, dopo la riga T_{28}) che deviano il film d’acqua, fin quando la quantità d’acqua presente sul modulo non è tale da vincere le forze di tensione superficiale delle goccioline.

In questo caso tutte le temperature indicate con la lettera M subiscono un ottimo raffreddamento, $\Delta T_{\text{RAFFREDDAMENTO}}$ pari anche a 20 °C, però per la T_{M1} si nota che nella fase finale ha un andamento poco costante e ciò potrebbe essere sempre legato alla

formazione di calcare che riduce lo scambio termico e blocca il film di liquido (come visto prima). Il consumo d'acqua giornaliero, è stato calcolati pari a 120 litri/giorno (20 litri/giorno in più al caso $p=1$ bar).

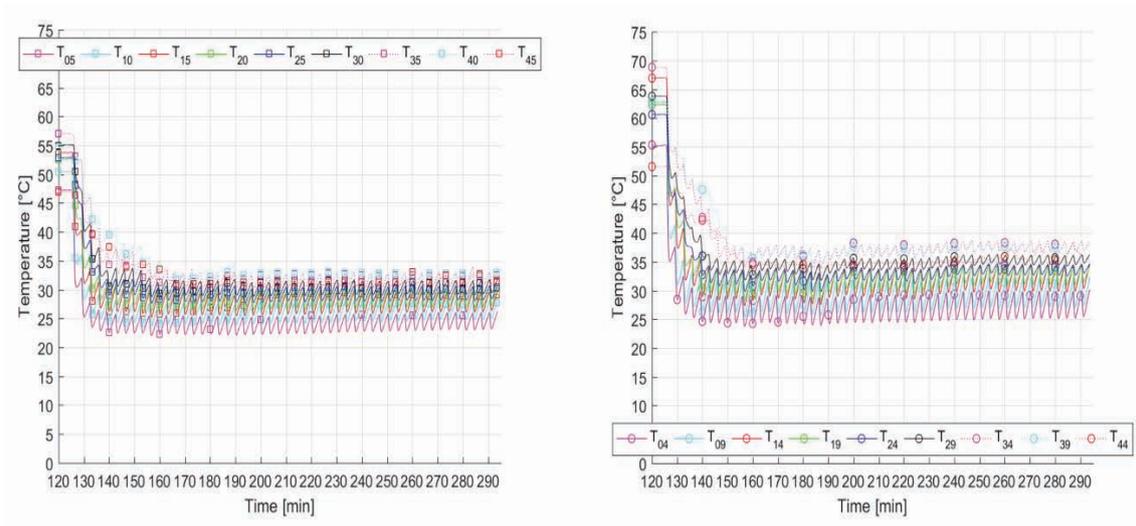


Figura 67 - ciclo 30s ON 180s OFF a pressione di 1.5 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

Confronto con la 1^a configurazione

Come si osserva in figura 67, per la 2^a configurazione di ugelli, il raffreddamento è nettamente migliore soprattutto per quanto riguarda l'omogeneità dei profili di temperatura relativi alle celle da T_{24} a T_{44} (come anche da T_{30} a T_{45}) le quali, nel ciclo 30s ON – 180s OFF a $p = 1.5$ bar (con la 1^a configurazione), subiscono un raffreddamento meno costante e quindi la seconda metà del pannello risulta meglio raffreddata con la 2^a configurazione come è possibile osservare in figura 68, nella quale a sinistra vengono riportati gli andamenti delle temperature della riga di celle 33 – M5 con la prima configurazione mentre a destra le stesse temperature ma ottenute con la seconda configurazione di ugelli.

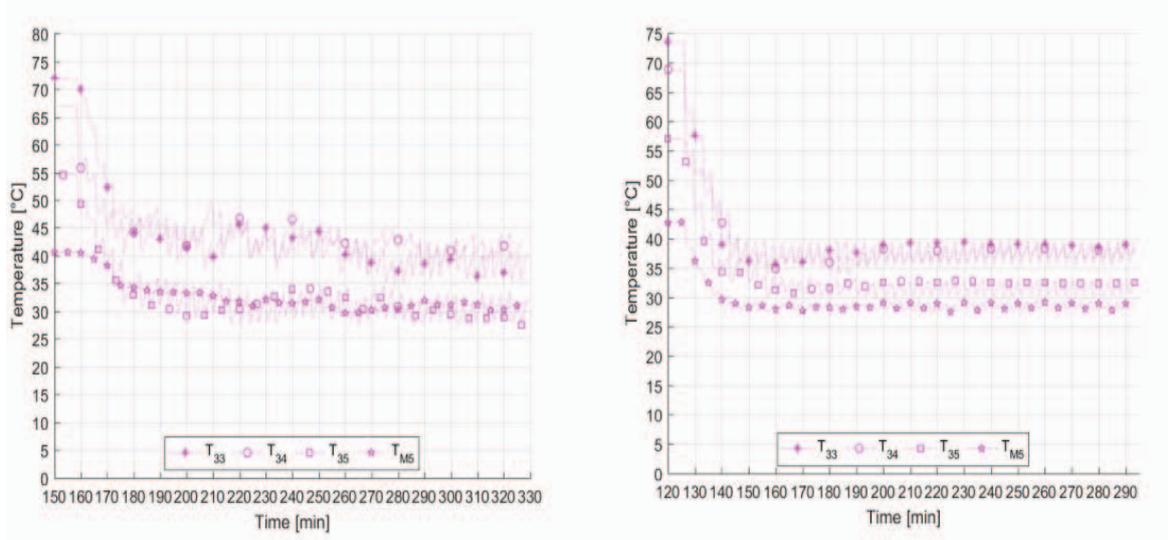


Figura 68 – andamenti dei profili di temperatura della riga di celle 33-M5 nel ciclo 30s ON 180s OFF a $p=1.5$ bar: a sinistra le temperature ottenute con la prima configurazione; a destra le temperature ottenute con la seconda configurazione.

CICLO 30s ON - 300s OFF

PRESSIONE = 1 bar

Per questa prova si esegue una prima fase di riscaldamento durata 120 min., durante la quale la $T_{AMB.CENTRO}$ rimane praticamente costante nell'intorno dei 27.5 °C mentre l'acqua si riscalda da 20 °C a 24 °C e alla fine della quale il pannello si trova ad una temperatura media di 60 °C. Dopo i 120 min. di riscaldamento si raffredda il modulo eseguendo 50 cicli 30s ON – 300s OFF alla pressione di 1 bar. Con questa pressione e occorrono 22 cicli (ovvero 120 min.) per ottenere un valore di temperatura media costante e pari a 36 °C, con un consumo d'acqua pari a 21 litri. Inoltre si è osservato che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, si raffredda da 24 °C a 22 °C costanti dopo 10 minuti (circa 2 cicli ON-OFF), il che vuol dire avere acqua a temperatura costante per tutta la fase di raffreddamento.

Per quanto il fattore X calcolato si osserva che:

- □ La T_{33} , ovvero la massima temperatura misurata, alla fine dei 120 min. di riscaldamento risulta pari a 76 °C, per poi raggiungere un valore nell'intorno dei 47 °C dopo 140 minuti (26 cicli ON-OFF), mostrando un valore di X pari a $0.21 \frac{[7]}{[2] [2]}$.

- □ La T_{M1} (temperatura minima), alla fine della fase di riscaldamento si assesta sui 38 °C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 40 minuti per raggiungere i 30 °C, mostrando quindi un fattore X pari a $0.2 \frac{77}{27}$.
- □ La temperatura media del modulo mostra un valore del parametro X pari a $0.2 \frac{77}{27}$.

Gli andamenti di queste tre temperature analizzate vengono riportati in figura 69.

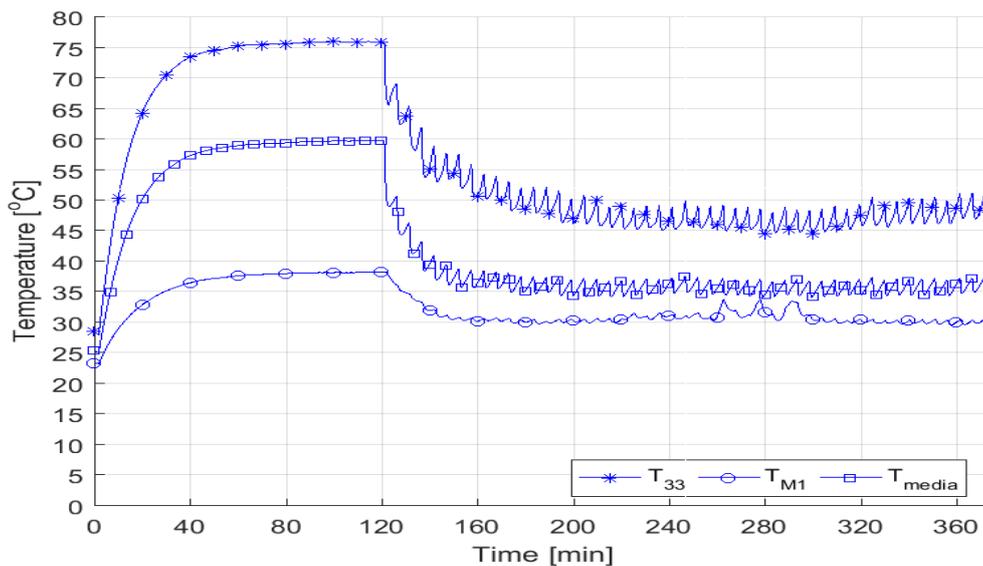


Figura 69 – Andamenti della temperatura massima (T_{33}), della temperatura media e della temperatura minima (T_{M1}) del modulo nel ciclo 30s ON – 300s OFF a $p = 1$ bar, con la 2^a configurazione di ugelli, in funzione del tempo di durata della prova.

In generale per i vari profili di temperatura è possibile osservare che:

- a. □ Per le celle in corrispondenza degli ugelli (figura 70 a sinistra) si nota che i profili di temperatura delle celle fino a T_{28} e T_{30} hanno andamenti molto omogenei tra loro, ma $T_{35} - T_{40}$ (come T_{33} e T_{38}) presentano andamenti poco costanti nella fase iniziale di raffreddamento mentre, nella fase finale si surriscaldano raggiungendo una temperatura costante più alta delle celle precedenti (in pratica impiegano 20 min. in più per raggiungere un valore costante) La T_{45} , come anche la T_{43} subiscono un $\Delta T_{RAFFREDDAMENTO}$ di 14 °C.

b. □ Per le celle tra due ugelli consecutivi (figura 70 a destra) si nota che gli andamenti dei profili di temperatura sono molto costanti e non si osserva quell'andamento poco lineare che mostrano i profili di T_{33} e T_{35} , ad esempio. Questo fenomeno è sempre legato al fatto che su questa colonna di celle (T_{04} – T_{44}) si osserva l'incrocio dei due getti che permette la formazione di un film di acqua omogeneo e costante.

In questo caso tutte le temperature indicate con la lettera M subiscono un buon raffreddamento, $\Delta T_{\text{RAFFREDDAMENTO}}$ pari anche a $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, però per la T_{M1} si nota che ad un certo punto della fase di raffreddamento (dopo circa 130 min. dall'inizio della fase di raffreddamento – figura 70) ha un andamento molto variabile per poi ritornare costante fino alla fine e questo potrebbe essere legato sempre alla formazione di calcare, visto che tra uno spruzzo e il successivo ci sono 5 minuti. Per quanto riguarda il consumo di acqua giornaliero è stato calcolato pari a 64 litri/giorno.

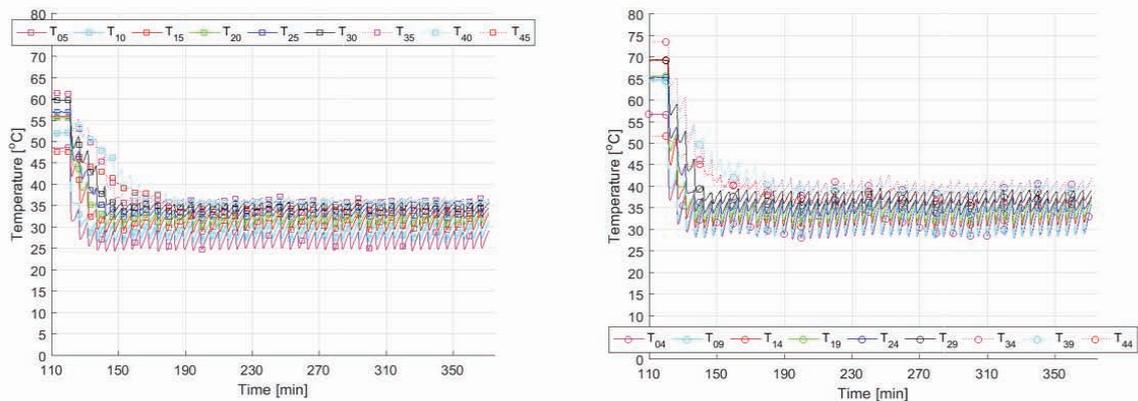


Figura 70 - ciclo 30s ON 300s OFF a pressione di 1 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

Confronto con la 1^a configurazione

Come si osserva dalla figura 70, per la 2^a configurazione di ugelli, il raffreddamento è nettamente migliore sia in termini di uniformità che di tempo: ad esempio considerando la T_{29} che in entrambe le configurazioni, alla fine della fase di riscaldamento, raggiunge i $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, si nota che per la 1^o configurazione impiega 20 min. per raggiungere i $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ mentre con la 2^o configurazione ne impiega 3 min., ovvero un tempo esiguo.

Inoltre se con la 1^a configurazione di ugelli il range di temperatura entro cui si trovano tutti i profili (alla fine dei 50 cicli ON-OFF) va da 20°C a 66 °C, con la 2^a configurazione il range va da 25 °C a 45 °C.

PRESSIONE = 1.5 bar

Per questo test viene eseguita una prima fase di riscaldamento, durata 125 min., durante la quale la $T_{AMB.CENTRO}$ rimane costante a 27.5 °C mentre l'acqua si riscalda da 17.5°C a 24 °C e alla fine della quale il pannello si porta ad una temperatura media di 59 °C. Il raffreddamento del pannello viene eseguito con 50 cicli 30s ON – 300s OFF alla pressione di 1.5 bar. Con questa pressione ci vogliono 20 cicli (ovvero 110 min.) per ottenere un valore di temperatura media pari a 35 °C, con un consumo d'acqua pari a 23.3 litri, ovvero 2.3 litri in più rispetto al ciclo precedente a $p = 1$ bar. Inoltre si osserva che l'acqua, nel momento in cui viene azionato il sistema di raffreddamento, si raffredda da 24°C a 21°C costanti in 7 min.

Per quanto riguarda il fattore X calcolato si osserva che:

- La T_{33} (temperatura massima misurata), alla fine dei 125 min. di riscaldamento risulta pari a 76 °C, per poi raggiungere l'intorno dei 42.5 °C dopo 90 minuti (17 cicli ON-OFF), mostrando un valore di X pari a $0.37 \frac{°C}{min}$ (ovvero $0.16 \frac{°C}{min}$ in più del caso a $p = 1$ bar).
- La T_{MI} (temperatura minima) , alla fine della fase di riscaldamento arriva a 38 °C e impiega, nella successiva fase di raffreddamento, 30 minuti per raggiungere i 30 °C costanti, mostrando quindi un fattore X è pari a $0.30 \frac{°C}{min}$ (più alto del caso a $p = 1$ bar di circa $0.1 \frac{°C}{min}$).
- La temperatura media del modulo mostra un valore del parametro X pari a $0.22 \frac{°C}{min}$.

Gli andamenti di queste tre temperature di cui si è calcolato il fattore X vengono riportati in figura 71.

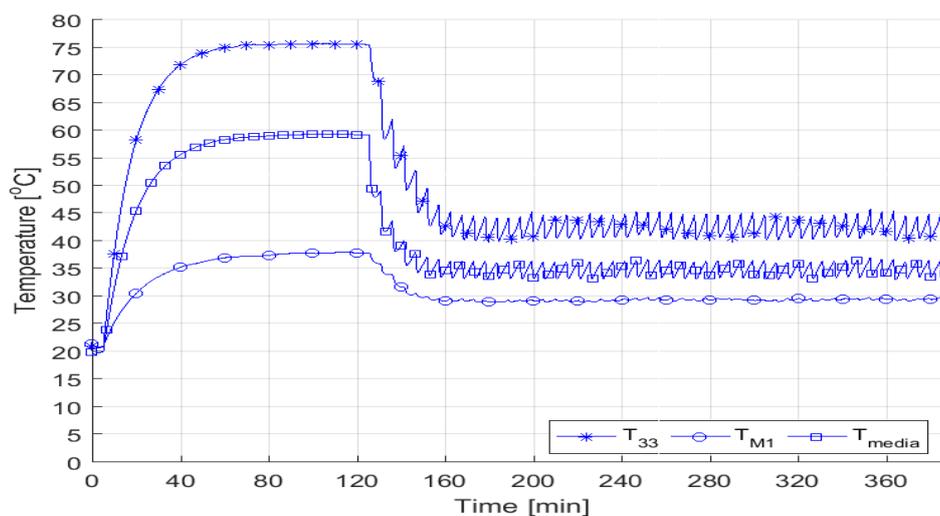


Figura 71 – Andamenti della temperatura massima (T_{33}), della temperatura media e della temperatura minima (T_{M1}) del modulo nel ciclo 30s ON – 300s OFF a $p = 1.5$ bar, con la 2^a configurazione di ugelli, in funzione del tempo di durata della prova.

In generale per i vari profili di temperatura è possibile osservare che:

- a. □ Per le celle in linea con gli ugelli (figura 72 a sinistra) si nota che tutti i profili di temperatura sono costanti già dopo l'8° ciclo (ovvero dopo 44 min.) e mantengono il loro andamento costante fino alla fine della fase di raffreddamento. Anche T_{43} e T_{45} subiscono un $\Delta T_{\text{RAFFREDDAMENTO}}$ pari a 15 °C.
- b. □ Le celle tra due ugelli consecutivi (figura 72 a destra) si nota un andamento dei profili di temperatura più lento (circa 25 min. in più) rispetto a quello osservato per le celle in linea con gli ugelli.

In questo caso tutte le temperature indicate con la lettera M subiscono un ottimo raffreddamento e i profili sono tutti molto costanti, tranne per T_{M5} che presenta un andamento meno costante a causa della presenza di goccioline, in questa zona del pannello, che, per alcuni cicli, impediscono al film di acqua di spandersi su questa zona. Per quanto riguarda il consumo d'acqua giornaliero esso si attesta a 76.5 litri/giorno (circa 13 litri/giorno in più al caso $p=1$ bar).

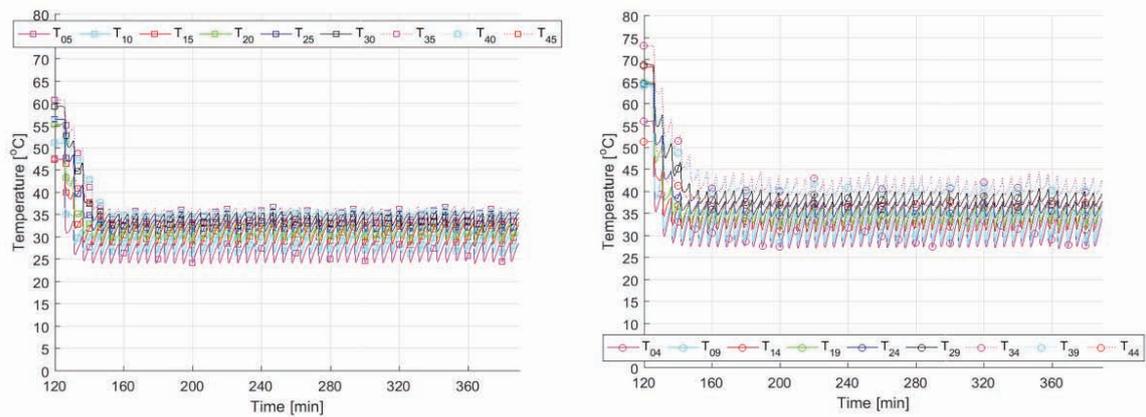


Figura 72 - ciclo 30s ON 300s OFF a pressione di 1.5 bar: a sinistra le temperature delle celle sotto l'ugello spruzzatore; a destra le temperature delle celle tra due ugelli consecutivi.

Confronto con la 1^a configurazione

Come si può ben osservare dalla figura 36, con la 2^a configurazione il raffreddamento è sicuramente migliore: i profili sono tutti molto più uniformi tra loro rispetto a quelli analizzati nel ciclo 30s ON – 300s OFF alla pressione di 1.5 bar (con la 1^a configurazione), infatti se alla fine dei 50 cicli ON-OFF, con la prima configurazione le temperature si attestano in un range da 20°C a 56 °C, con la 2^a configurazione il range va da 24 °C a 45 °C.

4.2.1 ANALISI GENERALE DELLE PROVE EFFETTUATE CON LA 2^a CONFIGURAZIONE.

Da un'analisi generale di tutte le prove eseguite con la 2^a configurazione si è potuto constatare ciò che è stato già messo in evidenza con l'analisi generale dei cicli effettuati con la 1^a configurazione (cap. 4.1.1), ovvero all'aumentare della pressione si osserva che:

- □ Il tempo impiegato dalla temperatura media del pannello per raggiungere un valore costante diminuisce sempre più: infatti, dalla figura 73, è possibile constatare quanto detto perché passando da 0.5 bar a 2 bar si nota che il tempo impiegato dalla temperatura T₃₃ per raggiungere una condizione di stazionarietà, risulta sempre più basso (se a p = 1 bar impiega 20 min. per raggiungere un valore costante, a p = 1.5 bar e 2 bar impiega 14 min.)

- Si riesce a raffreddare sempre meglio la parte bassa del modulo, distante dagli ugelli e quindi migliora l'uniformità del raffreddamento di tutto il modulo: infatti dalla figura 74 si nota come la T_{33} si attesti a valori di temperatura sempre più bassi. Inoltre tra le pressioni di 1.5 bar e 2 bar il raffreddamento di questa cella (n° 33) non cambia e ciò è legato al fatto che a $p = 2$ bar si perde tanta acqua (dai due lati lunghi del pannello) la quale poteva contribuire ad un raffreddamento più incisivo.

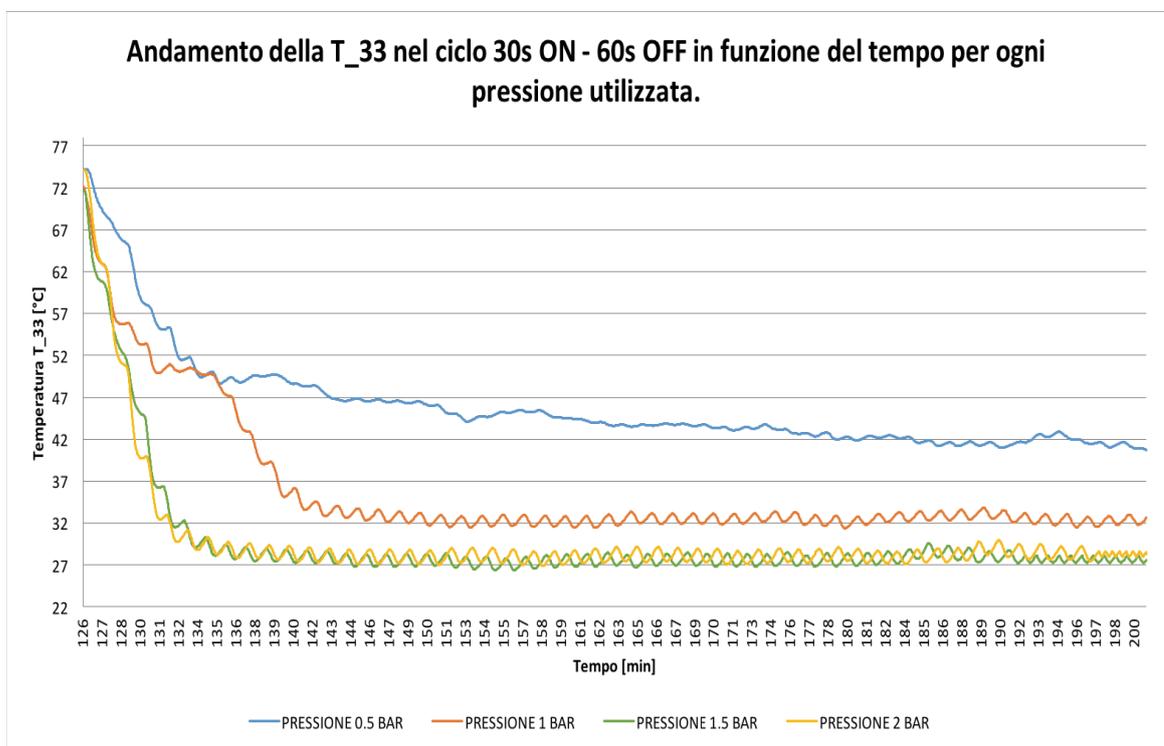


Figura 73 – Andamento della temperatura T_{33} nel ciclo 30s ON – 60s OFF al variare della pressione utilizzata. Andamenti ottenuti con la 2^a configurazione di ugelli.

Per quanto riguarda il rendimento del modulo (si vede da tabella 8) nel ciclo 30s ON – 30s OFF si nota che a $p=1$ bar il rendimento nella fase di riscaldamento scende dal 13.6 % al 12.2 % mentre durante i 50 cicli ON-OFF effettuati, sale dal 12.2 % al 14.1% quindi si riesce ad ottenere un incremento di 1.9 punti percentuali e lo stesso incremento lo si ottiene con la pressione di 1.5 bar, quindi pur aumentando la pressione, l'incremento di rendimento ottenuto è lo stesso. Quanto detto vale anche per i cicli 30s ON – 60s OFF e 30s ON – 120 s OFF e 30s ON – 180s OFF, per i quali si registra per entrambe le pressioni

di 1 e 1.5 bar un incremento del rendimento pari a 1.6 punti percentuali. Spostando l'attenzione sul ciclo mentre 30s ON – 300s OFF si osserva un incremento del rendimento pari a 1.3 punti percentuali per $p = 1$ bar e a 1.4 punti percentuali per la $p = 1.5$ bar, ovvero una piccolissima differenza di 0.1 punti percentuali, che conferma il fatto che tra 1 bar e 1.5 bar il rendimento subisce lo stesso incremento. Ovviamente il valore a cui si stabilizza il rendimento alla fine dei 50 cicli ON – OFF cambia a seconda del ciclo utilizzato: per il ciclo 30s ON – 30s OFF, 30s ON – 60s OFF e 30s ON – 120 s OFF si stabilizza tra il 13.9 % e il 14.1% (per entrambe le pressioni), ovvero varia di pochissimo tra $p = 1$ bar e $p = 1.5$ bar, mentre per il ciclo 30s ON – 180s OFF si stabilizza al 13.8% (per entrambe le pressioni). Solo per il ciclo 30s ON – 300s OFF il valore del rendimento è inferiore ai precedenti, si stabilizza ad un valore tra il 13.5% e 13.6% (circa 0.4 - 0.5 punti percentuali in meno rispetto ai primi tre cicli ON – OFF analizzati).

Quindi la prima conferma al fatto che con questa 2^a configurazione la miglior pressione da utilizzare, come ottimo compromesso tra il consumo di acqua e il $\Delta T_{\text{RAFFREDDAMENTO}}$, è la pressione di 1 bar, viene dall'analisi dell'incremento di rendimento il quale tra la pressione di 1 bar e di 1.5 bar non cambia (al massimo varia di 0.1 punti percentuali).

Inoltre, in tabella 8, si riporta il $\Delta T_{\text{raffreddamento}}$ che si riesce ad ottenere per ogni ciclo e pressione: si va da 34.5 °C ottenuti per il ciclo 30s ON – 30s OFF alla pressione di 1.5 bar ai 23 °C ottenuti per il ciclo 30s ON – 300s OFF a pressione di 1 bar. Ovviamente il tutto fa riferimento alla temperatura media massima del modulo che, in quasi tutte le prove, è di circa 57 - 58 °C però, considerando il fatto che la NOCT (*Normal Cell Operating Temperature*) è di 45 °C e che di solito le celle oltre questo valore di temperatura degradano di molto la loro produzione elettrica, potrebbe bastare anche un ciclo 30s ON – 300s OFF alla pressione di 1 bar (per 6 ore) per ottenere un netto miglioramento della produzione elettrica, anche se il consumo di acqua, pari ai 64 litri/giorno, risulterebbe comunque elevato per un'applicazione reale in un campo fotovoltaico (già con 10 moduli il consumo sarebbe di 640 litri/giorno).

Altra cosa interessante, analizzata nei vari cicli ON-OFF, è il fattore $X \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}} \right]$, di cui si riportano in valori in tabella 9, che viene sempre valutato per le tre temperature: la temperatura massima (T_{33}), la temperatura minima (T_{M1}) e la temperatura media del modulo. Generalmente, per tutte e tre le temperature si nota che all'aumentare del tempo

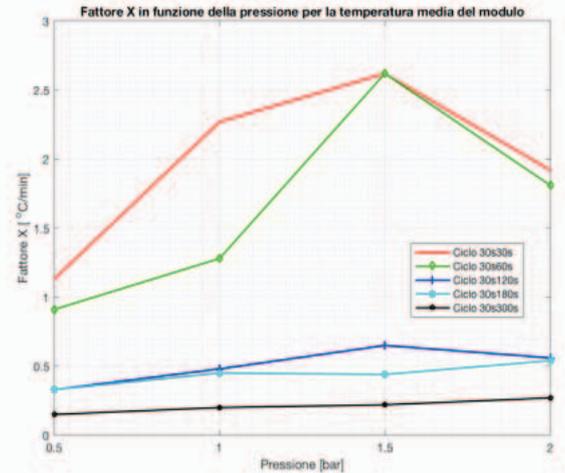
tra uno spruzzo e il successivo il fattore X cala ma non in maniera costante, ovvero se a pressione di 0.5 bar, nel 30 s ON – 30 s OFF, per la T_{33} il fattore X vale $1 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$, nel 30s ON – 60s OFF vale $0.55 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ (ovvero circa la metà) mentre nel 30s ON – 120s OFF risulta pari a 0.43 (ovvero di poco inferiore al valore ottenuto nel ciclo 30s ON - 60s OFF). Inoltre, si può analizzare l'andamento del fattore X (per ogni ciclo ON-OFF) al variare della pressione ed ottenere che (i valori sono riportati in tabella 7 e in figura 75):

- Per la temperatura media (figura 74 – (1)) si nota che con il ciclo 30s ON – 30s OFF e con il 30s ON – 60s OFF, il fattore X, all'aumentare della pressione, varia tra $0.9 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ e $3.2 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ mentre, per i restanti tre cicli, il range entro cui varia il fattore X è più esiguo, va da $0.15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ a $0.65 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$, a conferma del fatto che i cicli più performanti sono i primi due ma sono anche quelli caratterizzati da un consumo di acqua elevato (351 l/giorno e 234 l/giorno per la pressione di 1 bar, 421 l/giorno e 280 l/giorno per la pressione di 1.5 bar). Per quasi tutti i cicli il maggior raffreddamento lo si ottiene a $p = 1.5$ bar tranne per il 30s ON-180s OFF e il 30s ON-300 s OFF per i quali, il maggior valore di X lo si ottiene per la pressione di 2 bar anche se tra $p = 1$ bar e $p = 2$ bar (per questi due cicli) l'andamento è quasi costante, a conferma del fatto che la miglior pressione da utilizzare è proprio 1 bar.
- Per la T_{33} (figura 74 – (2)) si nota che a $p = 0.5$ bar il fattore X per tutti i cicli assume valori piccoli (da $0.2 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ a $0.55 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$) tranne per il ciclo 30s ON – 30s OFF in cui, X risulta pari a $1 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ (circa il doppio di quello valutato per il

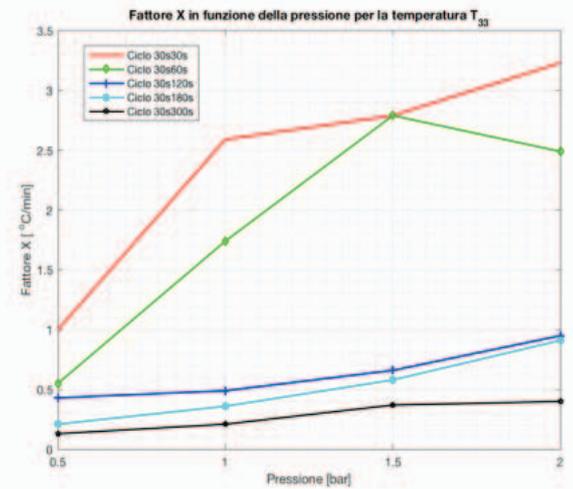
ciclo 30s ON – 60s OFF a p=0.5 bar). Inoltre, per tutti i cicli ON – OFF il fattore X ha un andamento crescente in maniera lineare con la pressione: solo nei cicli 30s ON-30 s OFF e 30s ON – 60s OFF esso cala anche di $0.5 \frac{[2]}{[2]}$ tra p = 1.5 bar e 2 bar.

- Per la T_{M1} (figura 74 – (3)) gli andamenti del fattore X con la pressione sono abbastanza simili tra loro, ovvero per quasi tutti i cicli l'andamento del fattore X al variare della pressione risulta crescente fino a 1.5 bar per poi ridurre il suo valore da 1.5 bar a 2 bar, solo per il ciclo 30s ON – 180 s OFF si ottiene un incremento lineare del fattore X con la pressione fino a 2 bar. Una cosa interessante da notare è relativa all'andamento del fattore X nei cicli 30s ON – 30s OFF e 30s ON – 60 s OFF dove è possibile osservare, da p = 0.5 bar a p = 1.5 bar, un notevole incremento di tale parametro, cosa che non si osserva per gli altri cicli in quanto il tempo tra uno spruzzo e il successivo risulta abbastanza elevato.

(1)



(2)



(3)

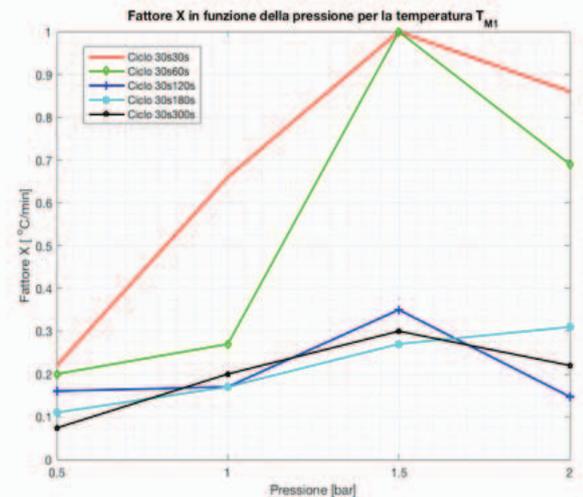


Figura 74 - andamenti del fattore X [°C/min.] in funzione della pressione ottenuto con la 2^a configurazione di ugelli: (1) fattore X relativo alla temperatura media; (2) fattore X relativo alla T₃₃; (3) fattore X relativo alla T_{M1}.

Tabella 8 - Valori di T_{media} , T_{acqua} , rendimento, ΔT di raffreddamento e della quantità di acqua utilizzata, per tutti i cicli e pressioni con la 2^a configurazione di ugelli: analisi dei valori in fase di riscaldamento e in fase di raffreddamento (ovvero durante i 50 cicli ON-OFF).

			1 [bar]	1.5 [bar]
Ciclo 30s ON - 30s OFF	T_{media} [°C]	RISCALDAMENTO	35 - 59	35 - 59
		RAFFREDDAMENTO	59 - 25	59 - 25
	η	RISCALDAMENTO	13.6 - 12.2	13.5 - 12.2
		RAFFREDDAMENTO	12.2 - 14.1	12.2 - 14.1
	T_{acqua} [°C]	RISCALDAMENTO	21 - 24.5	21 - 26
		RAFFREDDAMENTO	24.5 - 19.5	26 - 20
	Δ Traffredd. [°C]		34	34.5
Tot. acqua usata	[kg]	47.7	54.6	
	[litro/giorno]	351	421	
			1 [bar]	1.5 [bar]
Ciclo 30s ON - 60s OFF	T_{media} [°C]	RISCALDAMENTO	16.5 - 55.5	15 - 55
		RAFFREDDAMENTO	55.5 - 26	55 - 24
	η	RISCALDAMENTO	14.8 - 12.4	14.7 - 12.4
		RAFFREDDAMENTO	12.4 - 14	12.4 - 14.15
	T_{acqua} [°C]	RISCALDAMENTO	16 - 21.5	15 - 20
		RAFFREDDAMENTO	21.5 - 17.5	20 - 16
	Δ Traffredd. [°C]		30	31
Tot. acqua usata	[kg]	46.5	53.2	
	[litro/giorno]	234	280	
			1 [bar]	1.5 [bar]
Ciclo 30s ON - 120s OFF	T_{media} [°C]	RISCALDAMENTO	30 - 57	29 - 56
		RAFFREDDAMENTO	57 - 30	56 - 28
	η	RISCALDAMENTO	13.9 - 12.3	14 - 12.4
		RAFFREDDAMENTO	12.3 - 13.9	12.4 - 14
	T_{acqua} [°C]	RISCALDAMENTO	18 - 22	17.5 - 21
		RAFFREDDAMENTO	22 - 18	21 - 17
	Δ Traffredd. [°C]		27	29
Tot. acqua usata	[kg]	45.7	52.4	
	[litro/giorno]	140	168	
			1 [bar]	1.5 [bar]
Ciclo 30s ON - 180s OFF	T_{media} [°C]	RISCALDAMENTO	19 - 58	20 - 57.5
		RAFFREDDAMENTO	58 - 33	57.5 - 32
	η	RISCALDAMENTO	14.4 - 12.2	14.4 - 12.2
		RAFFREDDAMENTO	12.2 - 13.8	12.2 - 13.8
	T_{acqua} [°C]	RISCALDAMENTO	17 - 24	17.5 - 24
		RAFFREDDAMENTO	24 - 20	24 - 21.5
	Δ Traffredd. [°C]		25	25
Tot. acqua usata	[kg]	44.9	51.3	
	[litro/giorno]	100	120	
			1 [bar]	1.5 [bar]
Ciclo 30s ON - 300s OFF	T_{media} [°C]	RISCALDAMENTO	26 - 60	20 - 59
		RAFFREDDAMENTO	60 - 37	59 - 35
	η	RISCALDAMENTO	14.1 - 12.2	14.4 - 12.2
		RAFFREDDAMENTO	12.2 - 13.5	12.2 - 13.6
	T_{acqua} [°C]	RISCALDAMENTO	20 - 24	17.5 - 24
		RAFFREDDAMENTO	24 - 22	24 - 21
	Δ Traffredd. [°C]		23	24
Tot. acqua usata	[kg]	43.8	50.1	
	[litro/giorno]	64	76	

Tabella 9 - Calcolo del fattore X [$^{\circ}\text{C}/\text{min}$] per tutti i cicli effettuati con la 2^a configurazione di ugelli.

FATTORE X [$^{\circ}\text{C}/\text{min}$] CALCOLATO PER LE VARIE PRESSIONI (2 ^o CONFIGURAZIONE)					
		0.5 [bar]	1 [bar]	1.5 [bar]	2 [bar]
CICLO 30 s ON - 30 s OFF	T_33	1.1	2.59	2.79	3.23
	T_M1	0.22	0.66	1	0.86
	T_media	1.13	2.27	2.62	1.92
CICLO 30 s ON - 60 s OFF	T_33	0.55	1.74	2.79	2.49
	T_M1	0.20	0.27	1	0.69
	T_media	0.91	1.28	2.62	1.81
CICLO 30 s ON - 120 s OFF	T_33	0.43	0.49	0.66	0.95
	T_M1	0.16	0.17	0.35	0.147
	T_media	0.33	0.48	0.65	0.56
CICLO 30 s ON - 180 s OFF	T_33	0.21	0.36	0.58	0.91
	T_M1	0.11	0.17	0.27	0.31
	T_media	0.33	0.45	0.44	0.54
CICLO 30 s ON - 300 s OFF	T_33	0.13	0.21	0.37	0.4
	T_M1	0.074	0.2	0.3	0.22
	T_media	0.15	0.2	0.22	0.27

4.2.2 CONFRONTO CON LA 1^a CONFIGURAZIONE DI UGELLI E CONCLUSIONI.

Come si è potuto constatare, tutti i profili di temperatura e i vari fattori analizzati risultano nettamente migliori in tutti i cicli ON-OFF eseguiti con la 2^a configurazione di ugelli. Confrontando tre parametri fondamentali, ovvero il rendimento, il $\Delta T_{\text{raffreddamento}}$ e il fattore X, è possibile notare che:

- Per quel che concerne il rendimento, nel caso di un ciclo 30s ON – 30s OFF eseguito con la 2^a configurazione di ugelli, si ottiene un incremento di 1,9- 2 punti percentuali mentre per la prima configurazione l'incremento è di 1,8 punti percentuali (nonostante ci sia acqua a temperatura più bassa anche di 6 $^{\circ}\text{C}$ in meno); per il 30s ON – 60 s OFF si ottiene un rendimento massimo, alla fine del raffreddamento, che risulta uguale tra la 1^a e la 2^a configurazione, ovvero pari al 14,1 % e questa è un'ulteriore conferma del fatto che la 2^a configurazione porta a un raffreddamento migliore in quanto, se per questo ciclo ON-OFF nella 1^a configurazione di ugelli il modulo si raffredda con una temperatura dell'acqua pari a 14 $^{\circ}\text{C}$ (medi) con la seconda configurazione l'acqua è a 17 $^{\circ}\text{C}$

e nonostante sia di 3 °C più elevata, il rendimento alla fine è lo stesso. Per il 30s ON – 120 s OFF si nota che il rendimento è leggermente superiore per la 2^a configurazione (14 %) soprattutto a bassa pressione dove l'omogeneità del raffreddamento la fa da padrona per la seconda configurazione. E' nel ciclo 30 s ON – 180 s OFF e in quello 30 s ON – 300 s OFF che si ottiene un gran miglioramento con la 2^a configurazione perché, nella 1^a configurazione, un rendimento del 13.8% si ottiene con una pressione di 1.5 bar mentre per la 2^a configurazione lo stesso valore di rendimento lo si ottiene con la pressione di 1 bar e questo risulta essere un vantaggio enorme in quanto, con una portata di acqua inferiore di circa 14 litri/giorno (a temperatura più elevata del caso con la 1^a configurazione), si ottiene lo stesso rendimento.

- Per quanto riguarda il $\Delta T_{\text{raffreddamento}}$ per il ciclo 30s ON – 30s OFF, è possibile osservare che, a pressione di 1 bar e 1.5 bar, con la 1^a configurazione si ottiene un raffreddamento di 32-33 °C mentre con la 2^a configurazione il raffreddamento è di circa 34.5 °C (nonostante l'acqua venga spruzzata con una temperatura maggiore +6 °C rispetto al caso precedente); per i cicli 30s ON – 60s OFF, 30s ON – 120s OFF e 30s ON – 180s OFF il $\Delta T_{\text{raffreddamento}}$ che si riesce ad ottenere con la 2^a configurazione è sempre di qualche grado superiore a quello ottenuto con la 1^a configurazione, ma è nel ciclo 30s ON – 300s OFF che è possibile osservare il netto miglioramento apportato dalla 2^a configurazione, ovvero a pressione di 1 bar mentre con la 1^a configurazione si ottiene un $\Delta T_{\text{raffreddamento}}$ pari a 14 °C, con la 2^a configurazione il $\Delta T_{\text{raffreddamento}}$ risulta pari a 23 °C (9° C in più) e, la cosa ancora più interessante, è che questi 23 °C di raffreddamento medio li si ottengono con acqua a temperatura media di circa 22 °C ovvero circa 7 °C in più rispetto all'acqua utilizzata con la 1^a configurazione.
- Per quanto riguarda il fattore X è possibile osservare che per la T_{M1} , ovvero la temperatura minima, questo fattore calcolato per la 2^a configurazione risulta più alto di quello calcolato con la 1^a configurazione, per tutti i cicli e pressioni, a conferma del fatto che con la 2^a configurazione c'è una maggiore uniformità

nello spruzzamento e, di conseguenza, nel raffreddamento e si riesce a bagnare bene anche le celle più lontane dagli ugelli. Per la temperatura media vale lo stesso, si ottiene un raffreddamento medio più incisivo con la 2^a configurazione, mentre le cose sono un po' diverse per quanto riguarda la temperatura massima, ovvero T_{28} e T_{33} (rispettivamente relative alla 1^a config. e alla 2^a config.): dalla figura 75 è possibile osservare il confronto tra i due fattori X calcolati per le rispettive temperature massime per ogni pressione utilizzata. Quello che è possibile notare è che per la pressione di 0.5 bar (figura 75, in alto a sinistra) il fattore X relativo alla 1^a configurazione (per T_{28}) risulta, per ogni ciclo ON-OFF, sempre maggiore rispetto a quello calcolato per la 2^o configurazione (per T_{33}) e questo potrebbe essere legato al fatto che il punto 33 si trova più distante dagli ugelli rispetto al punto 28 quindi, essendo la pressione bassa, si raffredda più lentamente in quanto si ritrova sempre acqua più calda. Per quanto riguarda invece il confronto fatto a pressione di 1 bar e 1.5 bar si osserva che per il ciclo 30s ON – 30s OFF e per quello 30s ON – 60s OFF, il fattore X per la T_{33} è maggiore di quello calcolato per la T_{28} mentre dal 30s ON – 120s OFF in poi risulta essere più basso e questo potrebbe essere legato al fatto che con la 2^a configurazione si è aumentata la gittata dello spruzzo, quindi si ha che l'acqua bagna più punti del modulo, ma in quantità minore (il film di acqua risulta ben diffuso ma con spessore minore rispetto alla 1^a configurazione). Quindi fin quando il tempo tra uno spruzzo e il successivo è pari o minore a 60 secondi, l'acqua non riesce ad evaporare del tutto, ma nel momento in cui il tempo è di 120s (tra uno spruzzo e il successivo) questo non accade più e la cella comincia a riscaldarsi più velocemente. Per quanto riguarda il confronto a pressione di 2 bar si nota che fino al 30s ON-60s OFF il fattore X per T_{33} è molto più alto di quello per T_{28} (1.36 °C/min in più), mentre dal 30s ON – 120 s OFF i due fattori sono circa uguali.

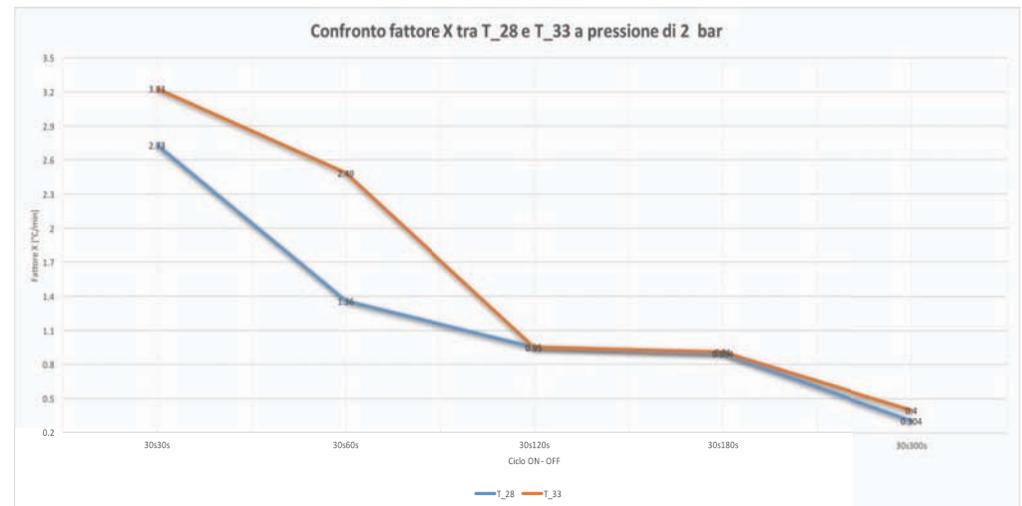
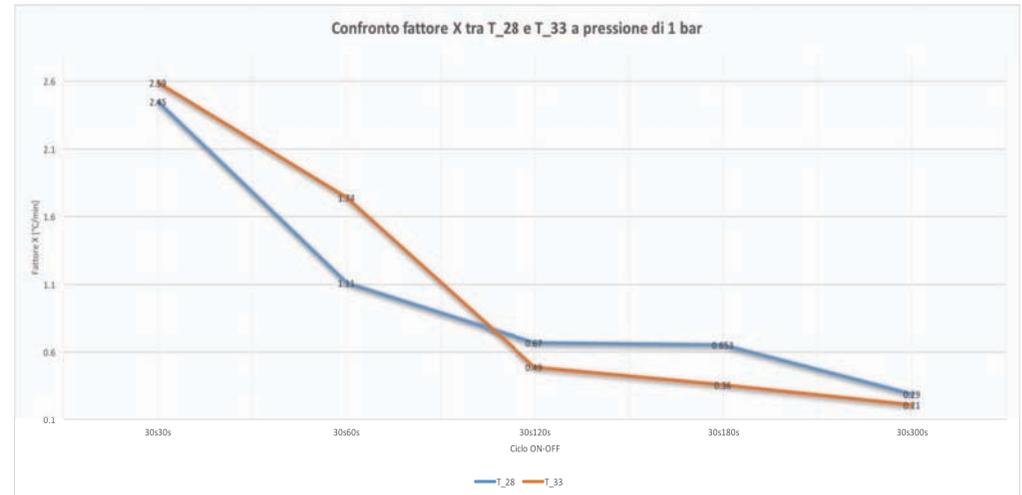
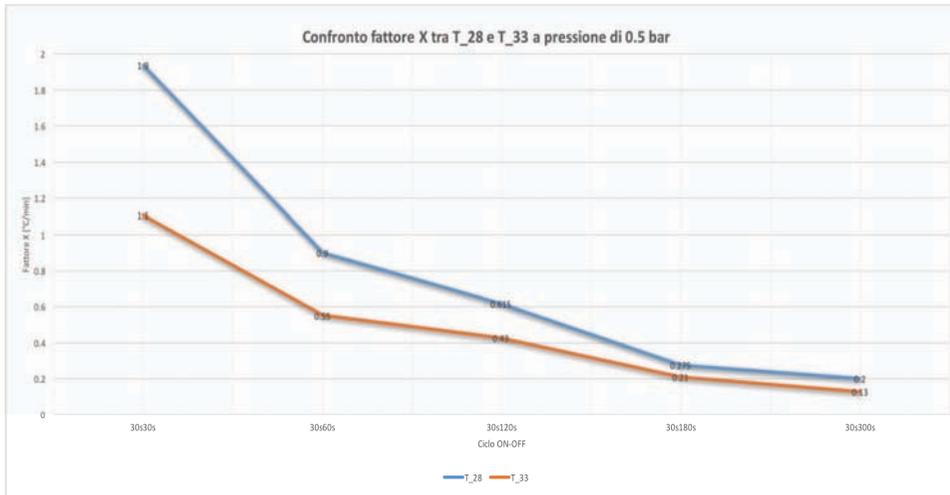


Figura 75 - Confronto tra il fattore X calcolato per T₂₈ e quello calcolato per T₃₃ per ogni ciclo ON-OFF eseguito: da p = 0.5 bar (in alto a sinistra) a p = 2 bar (in basso a destra)

Quindi in definitiva si può affermare che con la 2^a configurazione, si ottiene un netto miglioramento del raffreddamento sia in termini di uniformità che in termini di tempo: analizzando i cicli ON-OFF con la 2^a configurazione a pressione di 1 bar si ottengono andamenti dei profili di temperatura molto simili a quelli ottenuti con la 1^a configurazione a pressione di 1.5 bar. Pertanto con la 2^a configurazione di ugelli, si riesce a ridurre la quantità di acqua necessaria per ottenere un buon $\Delta T_{\text{raffreddamento}}$, anche se il consumo di acqua risulta ancora abbastanza elevato: il minimo consumo misurato è stato di 64 litri/giorno per il ciclo 30s ON- 300s OFF a pressione di 1 bar, per ogni singolo modulo, quindi per un campo fotovoltaico significa avere un consumo di acqua giornaliero elevatissimo. Però bisogna notare che tutte le prove di raffreddamento sono state eseguite partendo dalla temperatura massima del modulo che nella realtà si raggiunge solo in alcuni momenti della giornata, in quanto non vi è alcun isolamento termico sul retro del modulo, le condizioni dell'aria sono un pò differenti (sia in temperatura che umidità relativa) e bisogna tener conto dell'effetto del vento che, nei casi analizzati, non è stato valutato. Inoltre, come già è stato accennato in precedenza, facendo riferimento alla NOCT, pari a 45 °C le cose potrebbero cambiare in quanto si potrebbe optare per un raffreddamento con un numero di cicli ON-OFF inferiore ai 50 eseguiti precedentemente e ripetuti nel tempo: per esempio, nei vari cicli a pressione di 1 bar si è visto che mediamente occorrono 15-20 cicli ON-OFF per ottenere condizioni di stazionarietà (sulla temperatura media del modulo) quindi si potrebbero eseguire delle prove in cui si fa riscaldare il modulo fino ad una temperatura media di 45 °C, poi eseguire 15 o 20 cicli ON-OFF a pressione di 1 bar (con la 2^a configurazione di ugelli) per poi attendere di nuovo che la temperatura media risalga al valore di 45 °C (senza spruzzare ulteriore acqua sul modulo) e ripetere i 15 cicli ON-OFF, il tutto ripetuto per almeno 3 volte, in modo tale da poter calcolare un consumo di acqua giornaliero considerando sempre le sei ore di funzionamento.

5. BAGNABILITA' SUPERFICIALE: ASPETTI LEGATI ALLA RUGOSITA' SUPERFICIALE, IDROFILIA E IDROFOBIA DI UNA SUPERFICIE.

Il problema principale, riscontrato nel sistema di raffreddamento in esame, è quello relativo alla bagnabilità della superficie: come visto nel capitolo precedente, il pannello, con sistema di raffreddamento a 3 ugelli, non risulta bagnato uniformemente e le celle non bagnate tendono a raggiungere una temperatura assai elevata di quelle bagnate e di conseguenza un'efficienza più bassa. In pratica, con questo sistema di raffreddamento si va a un po' a sbilanciare la producibilità elettrica delle singole celle, alcune produrranno di più (in quanto più fredde) ed altre di meno, quindi, in vista di un futuro miglioramento del vetro superficiale del modulo, sono stati valutati alcuni aspetti legati alla bagnabilità delle superfici e di come questa proprietà vari in funzione della rugosità superficiale.

Con il termine bagnabilità, o bagnatura, si intende la capacità di un liquido di mantenere il contatto con una superficie solida. Tale capacità dipende dalle interazioni intermolecolari che sono presenti quando il liquido e la superficie entrano in contatto: in pratica descrive come un liquido viene in contatto con una superficie solida [8]. A governare la forma di una goccia, su una superficie solida, è il bilancio di tutte le forze di interazione tra solido e liquido: bisogna tener conto delle forze di *adesione* che tendono ad aumentare l'interazione liquido-solido permettendo alla goccia di diffondersi sulla superficie (sono forze di attrazione tra specie differenti) e delle forze di *coesione* (forze di attrazione tra specie uguali) che, al contrario, tendono a ridurre l'interazione liquido-solido portando alla formazione della goccia a sfera, forma che minimizza l'interazione superficiale.

Come si evince da [10], nel corso degli anni sono state sviluppate diverse teorie che hanno dato una spiegazione al fenomeno dell'adesione e tra le più importanti si possono annoverare le seguenti:

- **TEORIA MECCANICA:** è la più classica delle teorie ed afferma che nel momento in cui aderente ed aderendo vengono in contatto, si verifica un ancoraggio di tipo meccanico. Secondo questa teoria la forza di adesione è tanto maggiore quanto maggiore è la rugosità superficiale e la porosità della

superficie ed inoltre è tanto grande quanto maggiore è la compatibilità tra la dimensione molecolare dell'aderente e gli interstizi superficiali dell'aderendo.

C'è da dire però che l'influenza della rugosità superficiale sull'adesione, presenta un limite superiore ovvero se aumentasse di molto la rugosità (oltre un certo valore critico) il contatto tra aderente e aderendo potrebbe essere non completo (l'area di contatto è minore) causando un decremento della forza di adesione con formazione di zone vuote e presenza di aria intrappolata tra i due.

- **TEORIA DELL'ENERGIA SUPERFICIALE:** secondo questa teoria, più è alta l'energia libera del substrato maggiore sarà la forza adesiva. Si definisce tensione superficiale [N/m], per i liquidi, o energia superficiale [J/m^2], per i solidi, la risultante delle forze di attrazione tra il bulk⁵ del materiale e le molecole nella zona più superficiale. Mentre per gli atomi e le molecole interne al materiale sono soddisfatti tutti i legami possibili e quindi si è in condizioni di equilibrio stabile, per le molecole più esterne (quelle sulla superficie del materiale) esistono dei legami "aperti" e quindi esse tendono a legarsi al materiale su cui aderiscono. Si può quindi affermare che l'energia superficiale non è altro che l'energia in eccesso che si ha sulla superficie di un solido rispetto al bulk e si possono definire due tipologie di superfici solide:

1. Superfici ad alta energia: i legami che tengono insieme gli atomi sono di tipo chimico (covalenti, ionici e metallici) e sono molto forti. La maggior parte dei liquidi polari riesce a bagnare una superficie ad alta energia (es. metalli, vetri, ceramiche)

⁵ Campione di materiale "in massa", è usato, ad esempio, per indicare la parte interna di un materiale in contrapposizione con la sua superficie infatti, le proprietà del bulk sono quelle della massa interna e differiscono da quelle della superficie le cui particelle sono esposte all'ambiente esterno.(<http://www.sapere.it/enciclopedia/bulk.html>)

2. Superfici a bassa energia: le molecole sono tenute insieme da forze di tipo fisico (forze di Van Der Waals e legami idrogeno); è possibile rompere tali legami con energie basse. Tali superfici possono permettere una completa o parziale bagnabilità a seconda del tipo di liquido (es. ghiaccio, idrocarburi ecc.)

Questa teoria fa riferimento ad alcune relazioni fondamentali e, tra queste, una delle più importanti è l'equazione di Young la quale descrive il comportamento di una goccia su una superficie liscia e piana:

$$\gamma_L \cos \theta = \gamma_S - \gamma_{SL} \quad (1.1)$$

dove γ_L è la tensione superficiale del liquido, γ_S è l'energia superficiale del solido e γ_{SL} è relativa all'interfaccia liquido-solido, mentre θ è l'angolo di contatto tra la goccia e la superficie, ovvero, l'angolo formato dall'incontro dell'interfaccia liquido-vapore con l'interfaccia liquido-solido. come mostrato in figura 76.

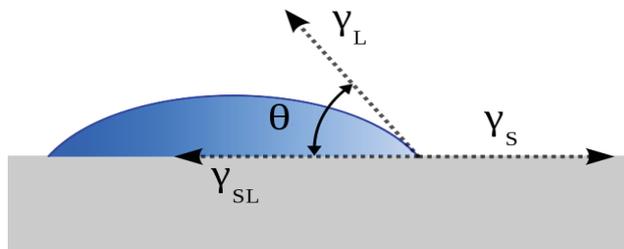


Figura 76 – Angolo di contatto tra la goccia di liquido e la superficie solida con relative energie/tensioni superficiali

Un'altra relazione utilizzata è quella di Duprè la quale fornisce un'espressione del lavoro di adesione:

$$\gamma_{SL} = \gamma_S - \gamma_L \cos \theta \quad (1.2)$$

Combinando la 1.1 e la 1.2 si ottiene l'equazione di Young-Duprè:

$$W_{adh} = \gamma_l * (1 + \cos\theta) \quad (1.3)$$

Da quest'ultima relazione si evince che il lavoro compiuto dalla goccia per aderire alla superficie dipende dall'angolo di contatto che si forma tra la superficie solida e la goccia liquida. Per massimizzare questo lavoro è necessario rendere massima l'energia superficiale del solido γ_S e minimizzare γ_{Sl} , il requisito base è che $\gamma_S > \gamma_l$.

È ovvio che una bassa bagnabilità della superficie provoca una pessima adesione, però una superficie, può anche essere bagnabile e allo stesso tempo avere una pessima adesione, questo perché non c'è affinità chimica tra aderente ed aderendo. Quindi una buona bagnabilità superficiale è una condizione necessaria ma non sufficiente per riscontrare una buona adesione.

- **TEORIA ELETTROSTATICA:** secondo tale teoria quando due corpi, ad esempio un liquido ed un solido oppure due solidi, vengono messi a contatto tra loro si verifica un trasferimento di cariche tale da portare alla formazione di un doppio strato elettrico. In pratica i due strati possono essere paragonati a due elettrodi formanti un condensatore nel quale, bisogna compiere un lavoro per separare i due elettrodi.

- **TEORIA DIFFUSIVA:** valida principalmente per le superfici polimeriche e si basa sulla teoria della mutua solubilità delle molecole. La diffusione delle molecole avviene quando le due fasi da unire hanno una mobilità molecolare relativa: quello che accade è che tra i due componenti nel momento in cui avviene il loro contatto si verifica un'auto diffusione per cui le molecole di uno diffondono nell'altro e viceversa.

Per lo studio in esame, la teoria dell'energia superficiale sembrerebbe quella più esaustiva da un punto di vista teorico, quindi ci si focalizzerà principalmente su questa teoria: la prima cosa da mettere in evidenza è che l'equazione di Young (1.1) non può essere applicata a superfici reali poiché si basa su ipotesi di superficie liscia, omogenea e priva di impurità e permette di individuare un unico angolo di contatto.

Nella realtà tutte le superfici presentano eterogeneità ed una determinata rugosità, gli angoli di contatto da considerare sono due, non uno come in (1.1): supponiamo di avere una goccia di liquido su un piano, il suo volume può essere incrementato attraverso l'immissione di acqua con un ago e ciò permette la misura dell'angolo di contatto di avanzamento θ_{av} ; viceversa, sottraendo acqua dalla goccia il volume decresce ottenendo l'angolo di contatto

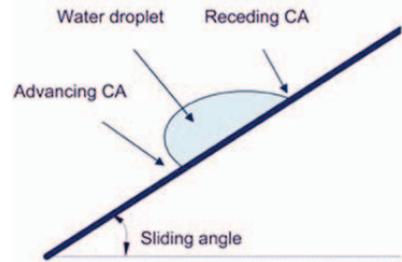


Figura 77 - Angolo di contatto avanzante e retrocedente, misurato su superficie inclinata

retrocedente θ_{ret} (figura 77). La differenza $\theta_{av} - \theta_{ret}$ definisce l'angolo di contatto di isteresi con il quale è possibile valutare l'eterogeneità e la rugosità della superficie: l'isteresi è responsabile dell'attaccamento del liquido alla superficie. Le superfici reali di solito presentano un angolo di contatto di isteresi piccolo ed un basso valore di quest'angolo permette ad una goccia, posta sulla superficie, di rotolare via piuttosto che diffondersi sulla superficie.

I parametri che influenzano maggiormente l'angolo di contatto di isteresi sono la rugosità e l'eterogeneità superficiale, infatti, a seconda di questi due parametri è possibile distinguere due regimi diversi:

1. **Regime di Wenzel:** in accordo con questo modello, per una superficie ruvida, che presenta un'area superficiale maggiore di una superficie liscia, le gocce di liquido vengono in contatto con l'intera superficie e penetrano nelle asperità superficiali.

In questo regime però l'angolo di contatto misurato, θ_{W} , differisce da quello reale θ , come riporta la figura 78, secondo l'equazione di Wenzel (1.4):

$$\cos \theta_{W} = r \cos \theta \tag{1.4}$$

dove, r è il rapporto tra l'area effettiva della superficie e quella apparente (proiettata). Si nota come la rugosità superficiale, secondo Wenzel, influenzi sia la bagnabilità che la non bagnabilità della superficie.

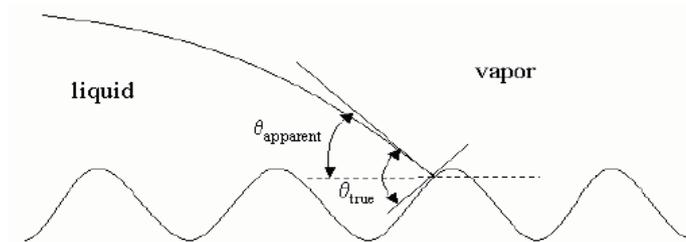


Figura 78 – Rappresentazione dell'angolo di contatto vero θ_{true} e dell'angolo di contatto apparente $\theta_{apparent}$.

2. **Regime di Cassie-Baxter:** a differenza del primo, questo modello non suppone la completa penetrazione della goccia di liquido nella cavità superficiale (figura 79) ovvero, il regime di Cassie-Baxter si presenta quando la rugosità superficiale è tale che le asperità sulla superficie non vengono riempite dal liquido, ma dall'aria/vapore. Questo modello ipotizza che il diffondersi di una goccia di liquido su una superficie rugosa distrugga l'interfaccia solido-vapore e formi le interfacce solido-liquido e liquido-vapore. In accordo con questo modello, l'angolo di contatto apparente $\theta_{apparent}$ è correlato all'angolo di contatto vero θ_{true} secondo la seguente equazione (1.5):

$$\cos \theta_{apparent} = f_s \cos \theta_{true} + f_v \quad (1.5)$$

dove f_s e f_v rappresentano rispettivamente la frazione di area della goccia di liquido in contatto con la superficie solida e la frazione di area della goccia di liquido in contatto con il vapore. Lo stato di Cassie-Baxter generalmente corrisponde alla superidrofobicità della superficie, infatti questo modello è applicabile solo a superfici idrofobiche/superidrofobiche.

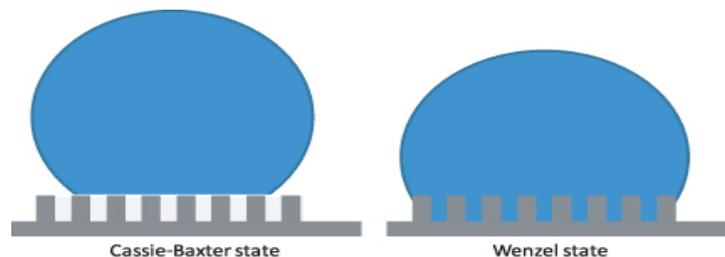


Figura 79 - Stato di Cassie-Baxter e di Wenzel - Raffigurazione di una goccia liquida su una superficie solida rugosa.

In generale, le goccioline possono transitare dallo stato energetico più elevato di Cassie-Baxter a quello di Wenzel, corrispondente all'energia più bassa, solo se riescono a superare la barriera energetica presente tra i due stati, riempiendo di liquido le asperità superficiali e formando un'interfaccia omogenea più stabile.

H.R. Moutinho et al. [9] hanno studiato gli effetti della rugosità superficiale su superfici campione e hanno valutato le due principali forze di adesione con la superficie ovvero, le forze capillari e forze di Van der Waals. Per quanto riguarda le forze di Van der Waals, se misurate in un ambiente chiuso a umidità relativa nulla, un incremento della rugosità superficiale comporta un'area di contatto più piccola e quindi una diminuzione della forza di adesione. Per le forze capillari, invece, si può sostenere che: l'effetto della rugosità su queste forze è ancora più forte, infatti più è ruvida la superficie maggiore sarà la quantità di acqua necessaria per generare forze capillari. Infine, è possibile affermare che, incrementando la rugosità superficiale di un materiale solido con bassa energia superficiale, incrementerà l'idrofobia del materiale, mentre, un incremento della rugosità superficiale per un materiale solido ad alta energia superficiale incrementerà l'idrofilia del materiale (per comprendere l'idrofobia e l'idrofilia si faccia riferimento ai prossimi due sotto capitoli).

Si è quindi messo in evidenza che la rugosità superficiale gioca un ruolo chiave nella bagnabilità di una superficie ma non è l'unico fattore, infatti bisogna tener presente che anche l'affinità chimica tra aderente ed aderendo è importantissima e, per poter comprendere al meglio questo concetto, bisogna focalizzare l'attenzione sull'angolo di contatto e sulla sua misura.

Nel corso degli anni, sono stati sviluppati diversi metodi per la misura della tensione superficiale e/o energia superficiale e della bagnabilità, tra questi quello più utilizzato è relativo alla misura dell'angolo di contatto: a seconda dell'angolo di contatto che l'acqua forma con il solido si possono distinguere diverse condizioni, di cui si parlerà in seguito.

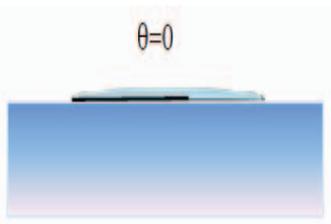
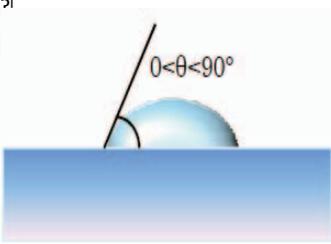
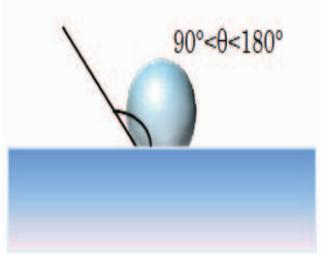
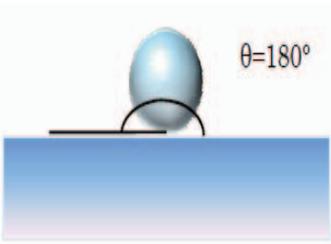
Dal punto di vista fisico, la bagnabilità superficiale è correlata alle tre tensioni/energie superficiali tramite il coefficiente S detto "*spreading coefficient*":

$$S = \gamma_s - \gamma_l - \gamma_{sl} \quad (1.6)$$

Se $S > 0$ vuol dire che la differenza $\gamma_S - \gamma_{Sl}$ risulta maggiore della tensione superficiale del liquido e una goccia di liquido, posta su questa superficie, tende a spandersi completamente formando un angolo di contatto θ quasi nullo. Quindi grazie all'affinità chimica tra i due materiali si ottiene un incremento dell'area di contatto tra i due e quindi un incremento della bagnabilità.

Se $S < 0$ vuol dire che non c'è alcuna affinità chimica tra aderente ed aderendo, il liquido non bagna la superficie ma rimane appoggiato su di essa ed assume una forma sferica con angolo di contatto θ elevato andando a ridurre al minimo l'area di contatto con la superficie.

Tabella 10 – Bagnabilità superficiale e forze di adesione e coesione in funzione dell'angolo di contatto formato tra aderente ed aderendo.

<p>Forze di adesione > forze di coesione</p>	<p>Forze di adesione = forze di coesione</p>	<p>Forze di adesione < forze di coesione</p>	<p>Forze di adesione > forze di coesione</p>	<p>Angolo di contatto</p>
<p>Forze di adesione > forze di coesione</p>	<p>Forze di adesione = forze di coesione</p>	<p>Forze di adesione < forze di coesione</p>	<p>Forze di adesione > forze di coesione</p>	<p>$\theta = 0^\circ$</p> 
<p>Forze di adesione > forze di coesione</p>	<p>Forze di adesione = forze di coesione</p>	<p>Forze di adesione < forze di coesione</p>	<p>Forze di adesione > forze di coesione</p>	<p>$0 < \theta < 90^\circ$</p> 
<p>Forze di adesione > forze di coesione</p>	<p>Forze di adesione = forze di coesione</p>	<p>Forze di adesione < forze di coesione</p>	<p>Forze di adesione > forze di coesione</p>	<p>$90^\circ < \theta < 180^\circ$</p> 
<p>Forze di adesione > forze di coesione</p>	<p>Forze di adesione = forze di coesione</p>	<p>Forze di adesione < forze di coesione</p>	<p>Forze di adesione > forze di coesione</p>	<p>$\theta = 180^\circ$</p> 

Come accennato in precedenza, si possono definire diverse condizioni a seconda del valore dell'angolo di contatto: quest'angolo può variare da 0° (perfetta bagnabilità) fino a 180° (bagnabilità nulla). Come si evince dalla tabella 1 maggiore è l'angolo di contatto formato da aderente ed aderendo minore sarà la bagnabilità superficiale a parità delle altre condizioni (es. rugosità superficiale costante) ed è quindi possibile mettere in evidenza il seguente grafico (figura 80) dove, sull'asse delle ascisse, viene riportata l'energia della superficie solida mentre, sull'asse delle ordinate, la tensione superficiale della goccia:

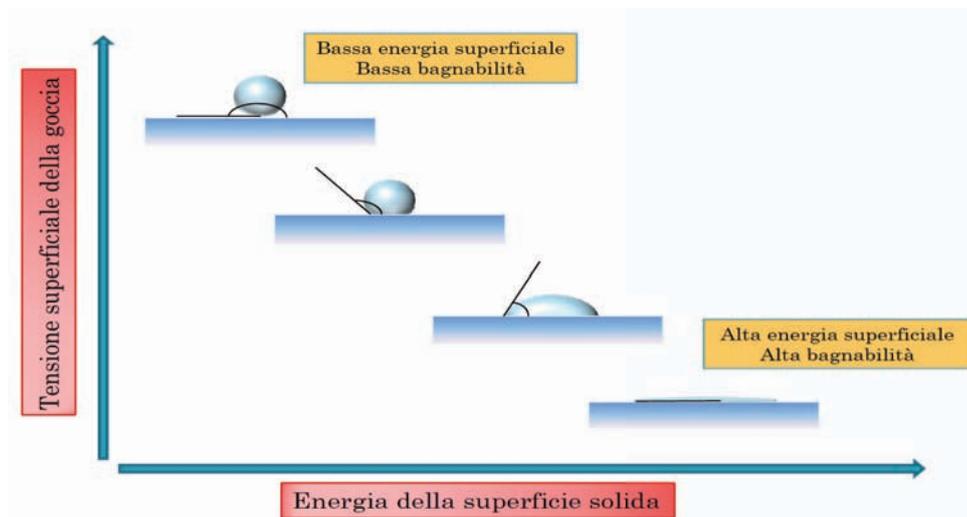


Figura 80 – Diagramma della tensione superficiale del liquido in funzione dell'energia superficiale del solido.

Quello che si deduce è che a parità di tipologia di liquido utilizzata, ovvero a parità di tensione superficiale, maggiore è l'energia della superficie solida maggiore è il grado di bagnabilità della superficie; a parità di tipologia di superficie utilizzata, ovvero a parità di energia superficiale, maggiore è la tensione superficiale del liquido minore sarà la bagnabilità superficiale.

Nel caso particolare dell'acqua, l'angolo di contatto prende il nome di WCA (*water contact angle*) ed è possibile distinguere, a seconda di quest'angolo, diverse tipologie di superficie:

- □ Superficie SUPERIDROFILICA: 0° θ $\leq 90^\circ$
- □ Superficie IDROFILICA: 0° θ $\leq 90^\circ$
- □ Superficie IDROFOBICA: 90° θ $\leq 180^\circ$
- □ Superficie SUPERIDROFOBICA: 150° θ $\leq 180^\circ$

Una volta stabilito che l'angolo di contatto può essere differente da superficie a superficie, per poter comprendere la scarsa bagnabilità del vetro di copertura in esame, si può procedere con lo studio dell'idrofobia e dell'idrofilia delle superfici e cercare di stabilire i fenomeni fisico-chimici che si presentano, come si vedrà nei seguenti due sotto capitoli.

5.1 STUDIO DELL'IDROFOBIA E SUPERIDROFOBIA SUPERFICIALE

Attualmente esistono numerose applicazioni di vetri solari idrofobici o superidrofobici il cui scopo principale è quello di generare un effetto auto pulente del pannello fotovoltaico. L'accumulo di polvere ambientale e il suo insediamento su una superficie di raccolta dell'energia, come la superficie di un modulo fotovoltaico, influenzano significativamente le performance del dispositivo: uno dei metodi per minimizzare questo insediamento è quello di introdurre una superficie auto pulente.

Il termine auto-pulente è correlato alle proprietà che contribuiscono a rimuovere la polvere o altri contaminanti utilizzando gocce d'acqua che rotolano o scorrono sulla superficie: una superficie auto pulente è governata da due caratteristiche principali, le quali includono l'idrofobia/idrofilia e la morfologia della superficie.

L'idrofobia superficiale, come si è visto, è correlata all'energia superficiale e viene calcolata attraverso la misura dell'angolo di contatto statico dell'acqua (static WCA), mentre, per stimare le proprietà di auto pulizia di una superficie, viene utilizzato l'angolo di scorrimento dell'acqua (WSA –water sliding angle) il quale è definito come l'angolo critico per il quale una gocciolina di acqua inizia a scivolare giù da una superficie inclinata: una superficie con un elevato WCA, però, non è detto che mostri sempre un basso WSA.

In pratica, su una superficie idrorepellente (idrofobica/superidrofobica) una goccia inizia a rotolare via quando essa è inclinata di un angolo specifico: questo angolo di inclinazione (*Tilt angle – TA*) viene semplicemente definito come l'angolo di inclinazione di una superficie sulla quale una goccia, applicata su di essa, inizia a muoversi ed è possibile affermare che un TA minore di 10° è caratteristico di una superficie superidrofobica ed autopulente [8].

I materiali idrofobici dovrebbero possedere un'elevata rugosità ed una bassa energia

superficiale tuttavia bisogna tener presente che l'elevata rugosità riduce le proprietà meccaniche della superficie ed altre proprietà come la trasparenza. S. Sutha et al. [4] hanno messo in evidenza che, in relazione alla rugosità superficiale, la trasmittanza ottica e la superidrofobicità sono proprietà in competizione tra loro e raggiungere una buona coesistenza tra questi due fattori è molto difficile. Inoltre, come ben è risaputo, i moduli fotovoltaici presentano un rivestimento antiriflesso (ARC) il cui scopo è quello di rendere minima la radiazione solare incidente riflessa e, a causa dell'elevata rugosità delle superfici idrofobiche, riuscire a combinare le proprietà antiriflesso con una superficie idrofobica, non sembrerebbe essere fattibile poiché la rugosità superficiale aumenta la dispersione di radiazione solare, incidente sulla superficie, quindi c'è bisogno di trovare un compromesso anche tra queste due proprietà.

Per quanto riguarda la trasmittanza ottica del vetro, in pratica, le caratteristiche di rugosità superficiale, essenziali per ottenere proprietà idrofobiche e superidrofobiche, sono state considerate come la principale causa del deterioramento della trasmittanza ottica, di conseguenza, le superfici auto-pulenti otticamente trasparenti per moduli fotovoltaici devono essere fabbricate attraverso un processo di ottimizzazione della rugosità superficiale.

Si è notato che l'allumina (ossido di alluminio) ha dimostrato di avere caratteristiche promettenti come minore tossicità, basso costo, elevata stabilità termica e meccanica, inoltre, il rivestimento in ossido di alluminio fornisce protezione contro le particelle o particolato portato dal vento ed è

otticamente trasparente nella regione delle lunghezze d'onda del visibile. Come si può notare dalla figura 81, S. Sutha et al. [11] hanno misurato la trasmittanza ottica del vetro con rivestimento di uno, due, tre o quattro strati di ossido di alluminio ed è stata paragonata a quella del vetro non trattato (in nero in figura 81): un fenomeno interessante lo si nota con il campione di vetro B3 (tre strati di allumina) in cui il valore medio della trasmittanza è stato valutato pari al 95% ovvero il 2% in più rispetto al vetro semplice:

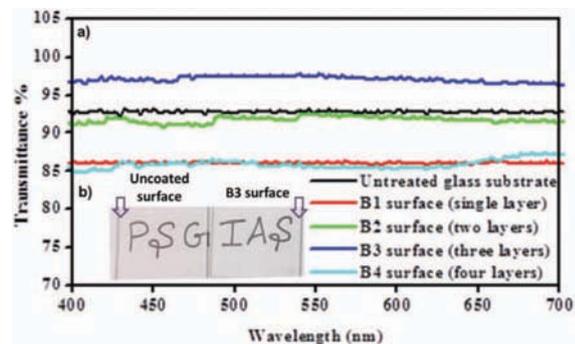


Figura 81 - Trasmittanza di un vetro non trattato ed un vetro rivestito con ossido di alluminio (con 1,2,3 e 4 strati) nella regione delle lunghezze d'onda del visibile.

questo incremento potrebbe essere dovuto alla presenza di nanoflakes⁶ porosi interconnessi che hanno la capacità di confinare la luce incidente, dispersa e riflessa verso la superficie del vetro. Inoltre c'è da osservare che la dimensione del poro e il livello di porosità dei rivestimenti, determinano le proprietà ottiche dei rivestimenti stessi: se la dimensione del poro è maggiore o comparabile alla lunghezza d'onda della radiazione solare incidente, il rivestimento diventa opaco, invece, se la dimensione del poro è minore della lunghezza d'onda della luce incidente, il rivestimento diventa otticamente trasparente e reprime la riflessione superficiale. Nella figura

82 vengono riportati i risultati collettivi degli studi ottici e di bagnabilità dei rivestimenti fabbricati in ossido di alluminio: si può osservare che il valore medio della trasmittanza e dell'angolo di contatto statico dell'acqua aumenta con il numero di strati fino al campione B3, mentre per il campione B4 (quattro strati di allumina) il valore della trasmittanza diminuisce

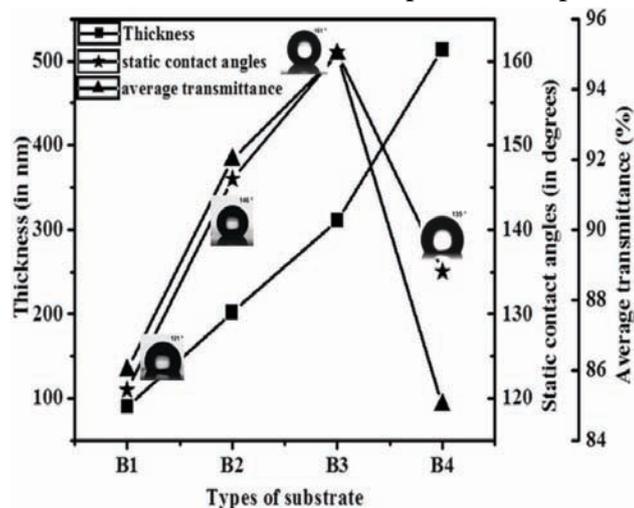


Figura 82 – Grafico comparativo del valor medio della trasmittanza, spessore e WAC statico dei rivestimenti fabbricati in allumina in funzione del numero di strati (B1, B2, B3, B4).

al di sotto dell'85% e il WAC statico si riduce a 135°, perdendo sia in termini di trasmittanza ottica che di non bagnabilità.

⁶ In generale, un *nanoflake* è una scaglia, cioè un pezzo di materiale non uniforme, con una dimensione sostanzialmente più piccola delle altre due : per applicazioni solari questo *nanoflake* è un tipo di semiconduttore con una forma tale da riuscire a catturare fino al 30% in più di luce solare incidente.

[<https://science.howstuffworks.com/environmental/green-tech/energy-production/nano-flakes1.htm>].

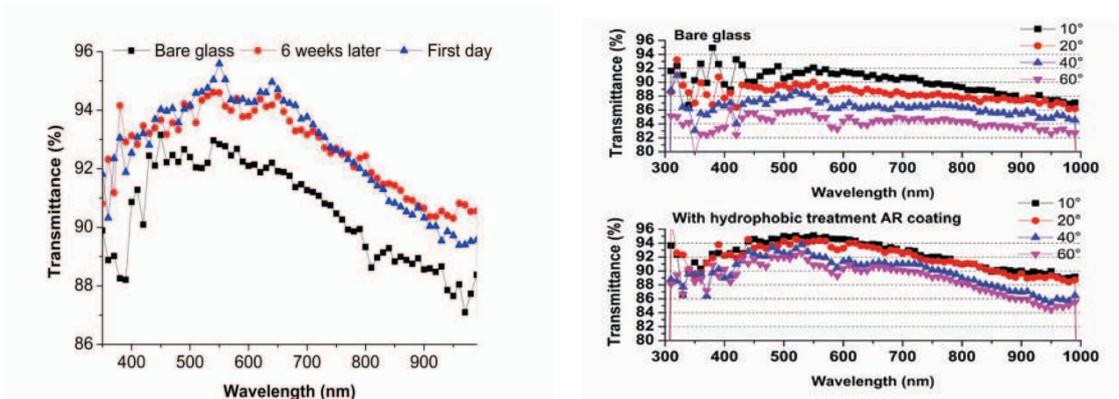


Figura 83 – variazione della trasmittanza in funzione dello spettro solare con angolo di incidenza normale (a sinistra) e con angolo di incidenza variabile tra 10° e 60° (a destra.)

Per quanto riguarda invece la riflessione superficiale della radiazione solare, Umer Mehmood et al. [12] hanno esaminato quantitativamente una superficie rugosa ed hanno dedotto che ci può essere un compromesso tra idrofobia e bassa dispersione nella stessa struttura: ad esempio l'uso del silicio poroso prodotto con il metodo sol-gel, di cui si parlerà in seguito. Inoltre, come si evince dallo studio di Wen-Lin Lan et al. [6], quando il rivestimento ARC in SiO₂ di un vetro solare viene trattato con la soluzione C₁₈-TEOS (per renderlo idrofobo) ed è posto in ambiente ad elevata umidità, la sua sua trasmittanza rimane invariata per almeno sei settimane, come si può evidenziare in figura 83 (a sinistra), mentre in figura 83 (a destra), viene rappresentata la trasmittanza di un rivestimento AR con trattamento idrofobico sotto angolo di incidenza variabile da 10° a 60° e si nota come nel campo del visibile rimane circa pari al 90% fin quando l'angolo di incidenza è inferiore ai 60°, quindi si evince che la trasmittanza del rivestimento AR trattato è maggiormente immune alla variazione dell'angolo di incidenza.

Una volta valutati gli aspetti chimici e fisici relativi all'idrofobia si può affermare che una superficie idrofobica o superidrofobica può essere realizzata in due modi, come messo in evidenza da K. Surekha et al. [13] su vetro auto-pulente:

1. □ Creando una struttura ruvida su una superficie a bassa energia superficiale attraverso tecniche come la litografia, incisione al plasma, allungamento meccanico ecc.

2. □ Modificando la superficie ruvida attraverso composti aventi bassa energia libera superficiale, come i composti fluororati o siliconici, materiali organici (polietilene, polistirolo ecc..) e materiali inorganici (ZnO e TiO₂)

Una classificazione dei materiali e processi per creare una superficie idrofoba sono riportati in figura 84 [12]:

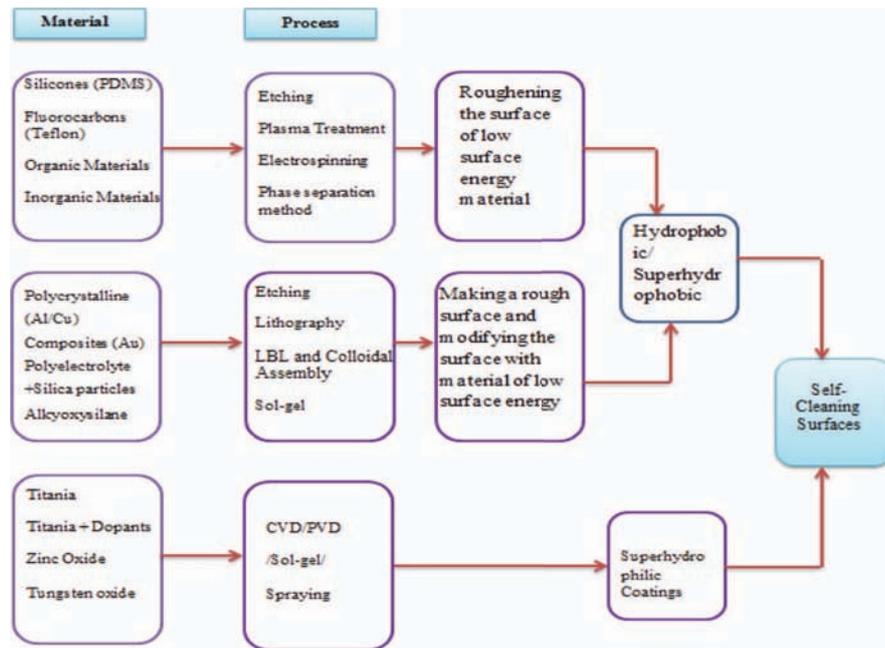


Figura 84 - Tecniche per la produzione di una superficie idrofobica/ superidrofobica e superidrofilica.

Per quanto riguarda i materiali, alcuni di questi sono ampiamente utilizzati ed altri invece sono oggetto di ricerca:

- □ **SILICONI (PDMS):** il polidimetilsilossano (PDMS) è uno dei più comuni dei polisilossani ed è caratterizzato da una notevole resistenza alla temperatura, agli attacchi chimici, all'ossidazione, è un ottimo isolante elettrico ed ha una vita utile molto elevata. Questo polimero, inoltre, non si lega né al vetro, né al metallo, né alla plastica in fase di solidificazione, ma conserva maggiore aderenza sulle superfici lisce una volta solidificato. Il PDMS possiede anche un'energia superficiale bassa a causa della sua intrinseca deformabilità e delle sue proprietà idrofobiche.

- **POLIMERI FLUORORATI:** siccome i fluorocarburi possiedono un'energia superficiale estremamente bassa, sono ampiamente utilizzati per produrre superfici superidrofobiche. Questi polimeri idrofobici sono composti da cristalli fibrosi con una grande porzione di spazi liberi nella superficie del polimero tali da garantire la pulizia della superficie stessa. Essi non possono essere usati direttamente poiché la loro solubilità è limitata e, quindi, si preferisce usarli come una miscela o collegati ad altri materiali per formare superfici superidrofobiche.
- **MATERIALI ORGANICI:** molti ricercatori hanno utilizzato questi materiali per produrre superfici superidrofobiche. Lu et al. [14] hanno prodotto una superficie in polietilene altamente porosa e superidrofobica attraverso il controllo del meccanismo di cristallizzazione della superficie; di fatto sono riusciti ad ottenere un WCA di 173° con una struttura di cristallo floreale aggiungendo una sostanza non solvente ad una soluzione di PE/xilene.
- **MATERIALI INORGANICI:** anche alcuni materiali inorganici presentano proprietà superidrofobiche.

Per quanto riguarda, invece, i processi adoperati per rendere idrofobica una superficie uno dei più utilizzati è il processo sol-gel il quale rappresenta uno dei principali metodi per la fabbricazione di materiali ceramici (tipicamente ossidi metallici). I ricercatori Y. Yuan et al. [15] hanno messo in risalto la modalità di realizzazione dei rivestimenti ARC in SiO_2 (per il vetro soda-lime) con il processo sol-gel basato sulla catalisi e quello che si deduce è che in ambiente acido, il rivestimento antiriflesso (ARC) dei normali moduli FV, presenta proprietà meccaniche eccellenti, ma dà un piccolo contributo all'antiriflessione a causa della sua bassa porosità e del suo alto indice di rifrazione; al contrario gli ARCs preparati con una catalisi basica incrementano in maniera significativa la loro trasmittanza, ma sono molto sensibili alle condizioni di umidità a causa della loro struttura porosa e della presenza dell'idrossile attivo, quindi non avrebbero buone proprietà meccaniche e resistenza agli agenti atmosferici che sono cruciali per i vetri solari per resistere agli agenti stessi.

Un modo per migliorare queste due proprietà (meccanica e resistenza agli agenti atmosferici) è eseguire un post trattamento del rivestimento (ARC): gli ARCs trattati inizialmente con ammoniaca e successivamente con vapore di Esametildisilazano (HMDS) possono ridurre la tendenza ad assorbire il vapore. Infatti come si può notare in [15] “in un ambiente sottoposto a forti radiazioni UV e bassa temperatura, i rivestimenti modificati con HMDS hanno idrofobia e antiriflessione stabili, perciò gli ARCs modificati con HDMS, diminuiscono la reattività superficiale dei film antiriflesso in silice porosa, quindi riducono l’effetto dello sporco esterno e mostrano una durabilità a lungo termine”.

Bisogna inoltre notare che, durante una temporale, le coperture in vetro dei moduli FV vengono bagnate e ricoperte dalla pioggia la quale contiene una certa quantità di sale e nel momento in cui la pioggia evapora dal vetro solare, i sali rimangono sulla superficie e riducono la trasmittanza del vetro e gli ARCs (non trattati) verrebbero danneggiati in modo irreparabile se fossero intrisi di sale per tanto tempo. Quindi, in conclusione, i vetri modificati con HMDS potrebbero presentare non solo una trasmittanza elevata ma anche una capacità di auto-pulizia la quale potrebbe affrontare il problema della contaminazione della superficie. Rimangono però ancora molte sfide da affrontare prima che queste superfici trattate possano essere usate in applicazioni pratiche: in primis perché queste superfici sono molto sensibili ai contatti meccanici, come ad esempio il tocco delle dita, cicli di lavaggio o l’impatto della sabbia ecc.; in secondo luogo perché molte tecniche di fabbricazione (mostrate in figura 84) richiedono procedure multistep oppure servono condizioni o attrezzature speciali e reagenti chimici, di conseguenza molte di queste tecniche sono costose e applicabili soltanto a piccole superfici piane o substrati di specifici materiali. La durabilità limitata e l’alto costo della superficie rivestita sono due principali barriere per la commercializzazione di questa superficie idrofobica: la maggior parte delle ricerche correnti è ancora focalizzata sull’incremento della capacità di trasmissione della luce e sul controllo della bagnabilità di queste superfici.

L’unica tecnica che sembrerebbe avere minori problemi è la tecnica di incisione laser: Aditia Rifai et al. [16] hanno messo in evidenza che siccome la micro/nano testurizzazione della superficie ha da affrontare molteplici sfide in termini di costo, tempo di processo ed attrezzatura e siccome la precisione della tecnica utilizzata è un fattore cruciale per ottenere la superficie testurizzata voluta, molto spesso per eseguire la testurizzazione della superficie si usa la tecnica laser la quale offre precisione nell’operazione, basso costo e piccolo tempo di processo. È stato dimostrato che, durante

il processo di testurizzazione laser, la bagnabilità della superficie cambia gradualmente e corrispondentemente cambia anche l'angolo di contatto: il trattamento laser migliora significativamente l'idrofobia della superficie a causa della struttura superficiale composta da micro/nano "pillars" [17]. Tuttavia la maggior parte delle superfici idrofobiche e superidrofobiche hanno esito negativo quando vengono messe a contatto con l'aria perché esse potrebbero essere danneggiate da alcuni fattori ambientali che includono, reazioni chimiche con alcune soluzioni e aria, invecchiamento da UV, erosione dovuta a particelle o germi, che ne limitano l'applicazione come rivestimento per pannelli fotovoltaici.

5.2 STUDIO DELL'IDROFILIA E SUPERIDROFILIA SUPERFICIALE ED APPLICAZIONI NEL CAMPO SOLARE.

L'idrofilia e/o la superidrofilia è causata da differenti micro/nano strutturizzazioni della superficie e la natura fornisce degli esempi differenti di superfici idrofile: Koch et al. [8] affermano che le superfici delle piante idrofile/superidrofile possono essere divise in quelle che rimangono permanentemente bagnate, quelle che assorbono l'acqua sopra la loro superficie e quelle che permettono all'acqua di diffondersi sulla superficie. Inoltre è stato osservato che l'acqua evapora molto più velocemente da una foglia superidrofilica rispetto a quella idrofobica o superidrofobica, dove l'acqua forma goccioline sferiche o semisferiche, questo perché le superfici idrofiliche/superidrofiliche fanno sì che l'acqua si diffonda sulla superficie: quest'ultimo aspetto è molto interessante per il caso studio in esame il cui scopo principale è quello di ridurre il consumo di acqua al minimo e allo stesso tempo migliorare il più possibile l'efficienza del modulo, ovvero rendere massima l'efficienza di raffreddamento.

Per un substrato solido idrofilico, il contatto liquido-solido è comunemente governato dallo stato di Wenzel e l'idrofilia superficiale può essere migliorata attraverso la rugosità superficiale e se l'energia superficiale del solido è alta l'acqua diffonde sulla superficie stessa come un sottile film, senza la formazione di gocce sferiche (come nel caso di superfici idrofobe): tali superfici si asciugherebbero in modo naturalmente veloce e preverrebbero l'annebbiamento quando vengono in contatto con vapore o liquido in condensazione. Infatti una delle principali capacità di queste superfici è quella di prevenire l'appannamento della superficie, cosa non banale se si tratta di vetri solari in

quanto eviterebbe la necessità di rivestimenti anti appannamento, riducendo i costi del modulo FV ed aumentando la sua efficienza (Baquedano et al. [18]).

Si è già parlato dell'uso di superfici idrofobiche con capacità auto pulenti, esistono applicazioni simili anche per le superfici idrofiliche: Banerjee et al [19] hanno evidenziato che nel caso di superfici idrofiliche le gocce di acqua si distribuiscono sulla superficie e vanno a formare un film e, durante questo processo di distribuzione, i contaminanti presenti sulla superficie vengono lavati via (figura 85).

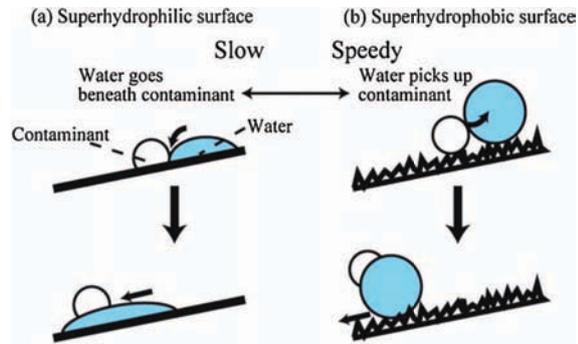


Figura 85 – Superfici autopulenti: superidrofilica (a) e superidrofobica (b).

Una volta stabilito quali sono le principali applicazioni di superfici idrofiliche/superidrofiliche, bisogna osservare che la maggior parte degli studi eseguiti su queste superfici non ha esaminato le loro caratteristiche in ambiente esterno: come si è già visto nel sotto capitolo 5.1, le superfici idrofobiche/superidrofobiche potrebbero riscontrare alcuni problemi quando poste in ambiente esterno, Jaesung Son et al. [20] hanno valutato l'efficacia dei loro rivestimenti auto pulenti (idrofobici ed idrofilici) andando a monitorare la variazione dell'angolo di contatto, la trasmittanza ottica e le performance fotovoltaiche sotto le condizioni dell'ambiente esterno per 12 settimane.

Sono stati preparati campioni di vetro con WCA da 3° a 170° per esaminare gli effetti autopulenti, sono stati montati su un tetto di una costruzione con angolo di inclinazione pari a 23° (come mostrato in figura 86(a)) durante la stagione delle piogge a Singapore con temperatura esterna di 23°C.

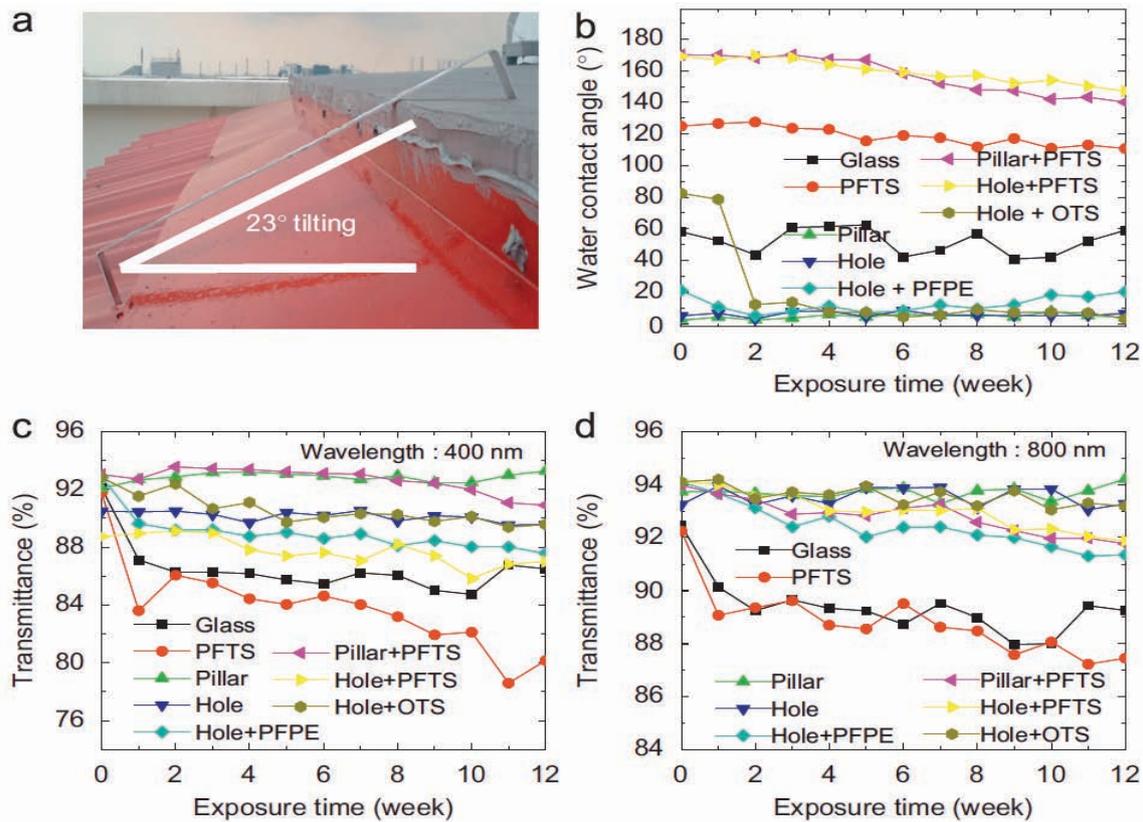


Figura 86- (a) campione in vetro montato su un tetto con inclinazione di 23°; (b) variazione a lungo termine del WCA; (c) variazione della trasmittanza ottica valutata ad una lunghezza d'onda di 400 nm; (d) variazione della trasmittanza ottica valutata ad una lunghezza d'onda di 800 nm.

La figura 86(b) riporta la variazione dell'angolo di contatto in funzione dell'esposizione all'ambiente esterno per i vari campioni: il WCA di tutti i campioni nanostrutturati (relativo alle superfici superidrofobiche – PFTS in figura 86 (b)) diminuisce al di sotto dei 150° e ciò implica che l'effetto autopulente delle superfici superidrofobiche svanisce gradualmente, quindi le gocce di acqua si ancorano facilmente alla superficie e le particelle di sporco non vengono rimosse dalle goccioline di acqua se il WCA scende sotto i 160°; d'altro canto invece, i campioni nano strutturati idrofilici/superidrofilici sono meno influenzati dall'esposizione all'ambiente esterno, mantenendo costantemente un basso CA intorno ai 5°.

In figura 86(c) e 86(d) viene riportato l'andamento della trasmittanza ottica in funzione delle lunghezze d'onda rispettivamente di 400nm e 800nm, la trasmittanza del vetro nudo (superficie idrofila) e del vetro nudo rivestito in PFTS (superficie idrofoba) diminuisce significativamente nelle prime 2 settimane dopo le quali si osserva un graduale decremento con un calo totale del 4,5% della trasmittanza a 800nm.

Poiché la superficie perde la sua idrofobicità, le gocce di acqua contenenti particelle di polvere iniziano ad attaccarsi alla superficie e lasciando alle spalle un conglomerato di polvere quando le gocce d'acqua evaporano, ciò porterebbe ad un incremento dello sporco sul vetro.

D'altro canto però i campioni nanostrutturati non rivestiti (superficie superidrofila) mostrano un effetto auto pulente superiore, mantenendo la loro trasparenza oltre le 12 settimane indipendentemente dalla morfologia della superficie: la trasparenza del campione con superficie superidrofoba tende a degradarsi così come il WCA cala, mentre per i campioni superidrofili la trasmittanza ed il WCA rimangono costanti e questo li rende sicuramente più applicabili, nel campo del fotovoltaico, rispetto ai rivestimenti idrofobici.

La maggior parte dei rivestimenti autopulenti superidrofili sono composti da TiO_2 che non è altro che un ossido metallico attivo fotocatalitico: questi rivestimenti possono abbattere chimicamente lo sporco quando esposti alla luce del sole, in quanto il sole attiverebbe il processo di fotocatalisi del TiO_2 . I rivestimenti in TiO_2 sono stati applicati maggiormente su vetri di finestre e su celle solari grazie alle loro proprietà idrofiliche e fotocatalitiche che sono molto adatte negli ambienti esterni, tuttavia, è stato anche osservato che il più importante effetto catalitico viene perso entro i 5,5 anni di esposizione all'ambiente esterno.

Verma et al. [21] hanno utilizzato un simulatore solare per misurare le performance della cella con il vetro modificato con TiO_2 posto sulla parte superiore delle celle. Le proprietà superidrofile delle superfici nanostrutturate sono state analizzate andando a misurare l'angolo di contatto delle goccioline mentre la proprietà di autopulizia sono state confermate da test in ambiente esterno. Le misure di trasmittanza ottica effettuate dai ricercatori sono mostrate in figura 87 nella quale, lo spettro di trasmittanza viene comparato con un vetro di riferimento non nanostrutturato.

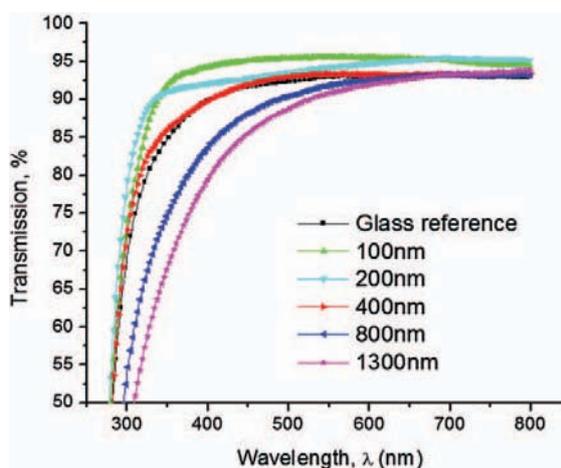


Figura 87 – Trasmittanza del vetro di riferimento e dei vetri nanostrutturati con unità da 100nm a 1300nm.

Le misure di trasmittanza delle nanostrutture con unità inferiore ai 400 nm mostrano un incremento della trasmittanza ottica nel totale range di lunghezza d'onda da 300 nm a 800nm: il campione di riferimento mostra una trasmittanza ottica di circa il 92% in un intervallo di lunghezze d'onda grandi (450 nm- 800 nm), mentre lo stesso valore decade all'85% nell'intervallo di lunghezze d'onda più piccole (300nm - 350nm).

Tuttavia, questi rivestimenti hanno un indice di rifrazione maggiore del vetro sottostante il che incrementa la riflessione della luce e quindi, avendo bassa dispersione e adesione, questo rivestimento mostra un tempo di vita basso e una bassa trasmittanza. Altri materiali utilizzati per l'idrofilia/superidrofilia sono l'ossido di zinco e l'ossido di tungsteno ma sono ancora in fase di sviluppo e ricerca.

5.3 CONCLUSIONI

Una volta valutate le proprietà idrofobiche ed idrofiliche e dopo un'attenta analisi del vetro solare in esame è possibile affermare che: il vetro installato sul modulo fotovoltaico analizzato ha un angolo di contatto WCA sicuramente inferiore a 90° il che induce a pensare che il vetro sia idrofilico.

Ovviamente il tutto è confermato dal fatto che nel momento in cui il sistema di raffreddamento con ugelli viene attivato, si ha la formazione sia del film di liquido, non uniformemente distribuito, sia di goccioline sulla superficie (figura 88): nonostante il modulo sia inclinato di 30°, le goccioline si spandono e cercano di occupare quanto più superficie possibile, mentre se il vetro fosse superidrofilico le stesse goccioline tenderebbero a diffondersi di più, ad unirsi tra loro e contribuire alla formazione del film.

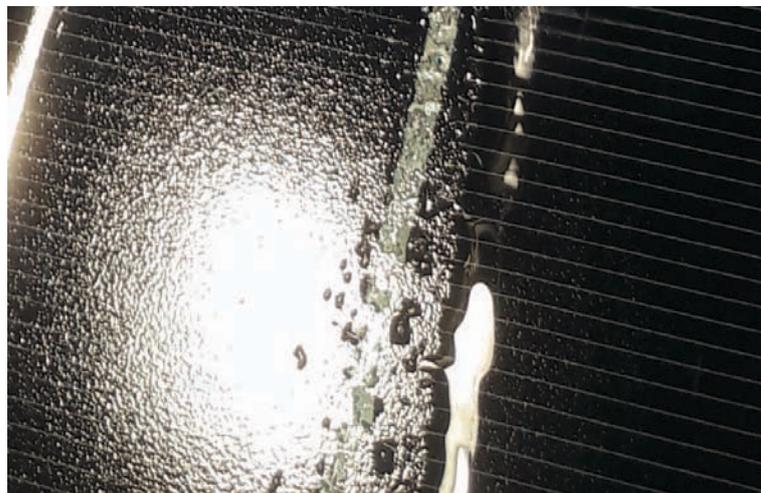


Figura 88 – Foto di una zona del modulo fotovoltaico in esame, scattata durante il periodo di funzionamento del sistema di raffreddamento ad ugelli.

Una futura miglioria del vetro in esame potrebbe essere quella di sostituire il vetro del modulo FV in esame con uno superidrofilico, in modo non solo di avere un film di liquido più uniforme, ma anche un raffreddamento più efficiente: se il vetro in esame fosse idrofobico o superidrofobico, l'acqua tenderebbe a formare goccioline (di forma sferica) e quindi ad avere un'area di contatto più bassa con la superficie solida sottostante. La presenza di aria intrappolata tra la goccia e la superficie degraderebbe lo scambio termico tra l'acqua e il vetro, mentre con una superficie superidrofilica, siccome si ha un film di liquido e non gocce, l'area di contatto tra l'acqua e il vetro risulterebbe molto più elevata e l'aria non resterebbe intrappolata tra le asperità superficiali e l'acqua stessa (come descritto dal regime di Wenzel), cosicché il tutto porterebbe ad un miglioramento del sistema di raffreddamento a 3 ugelli con un'efficienza più elevata in termini di scambio termico con la superficie. A rafforzare questa tesi c'è anche il fatto che l'acqua, come è già stato osservato in precedenza, evaporerebbe molto più velocemente rispetto ad un vetro idrofobico e ciò porterebbe ad un ulteriore incremento dell'efficienza di raffreddamento della superficie.

Un'altra miglioria potrebbe essere quella di usare entrambi i domini superidrofilico e superidrofobico sullo stesso vetro: come si evince da [20] è stato creato un film moderato composto da tre strati, uno di gel di Al_2O_3 , un sottilissimo strato di gel in TiO_2 e uno strato di fluoroalkasilane (FAS): la superficie mostra un WCA (water contact angle) di 150° , quindi è superidrofobica, il quale però diminuisce drasticamente nel momento in cui viene illuminato dai raggi UV, ciò è dovuto al fatto che questa irradiazione di raggi UV avvia il processo fotocatalitico del TiO_2 . Questo permetterebbe al modulo FV di avere ottime proprietà auto pulenti nel caso di mal tempo (in mancanza di radiazione solare il vetro è superidrofobico) e allo stesso tempo di migliorare l'efficienza del sistema di raffreddamento in esame (in presenza di radiazione solare il vetro diventa superidrofilico), il tutto con ottime proprietà meccaniche e trasmittanza elevata. Purtroppo a frenare lo sviluppo di quest'ultima tipologia di superficie sono i costi elevati e si spera che in un futuro prossimo la ricerca dia risultati migliori anche in termini di tecniche di produzione meno costose e meno rigida

6. FLOATING PHOTOVOLTAIC SYSTEM

Il sistema di raffreddamento in esame, come si è visto, utilizza acqua ad una temperatura che si aggira intorno ai 16 °C e dalle misure di portata effettuate si può però notare che il consumo di acqua è abbastanza elevato, soprattutto per i cicli più performanti da un punto di vista del raffreddamento. Un'applicazione che potrebbe risolvere il problema dell'ingente quantità di acqua è quella di installare il modulo fotovoltaico direttamente su una superficie d'acqua come, ad esempio, un lago. Inoltre, c'è da dire che negli ultimi anni, la capacità installata del fotovoltaico ha subito un rapido incremento però ci sono alcuni fattori che possono limitare un ulteriore sviluppo di questa tecnologia, come si può evincere dal lavoro di Sahu et al. [22]:

- a. Invasività e impatto ambientale: le applicazioni su larga scala dell'energia FV ricoprono una grande porzione di terra ferma.
- b. Perdita di efficienza ad alta temperatura operativa di cella: un tipico modulo fotovoltaico converte il 4-18% dell'energia solare incidente (dipendente dalla tecnologia utilizzata), la restante parte è convertita in calore ed incrementa la temperatura del modulo.
- c. Seppur i costi dei sistemi di tracking hanno subito una forte riduzione negli ultimi anni, soprattutto per quello a singolo asse, questa soluzione (FV con tracker) di solito è indicata quando si hanno a disposizione grandi superfici di terra e ciò è un problema come si è evidenziato nel punto a;
- d. Intermittenza di funzionamento e disponibilità per un tempo limitato che varia tra le 1000 e le 2000 ore anno.

Tutti questi problemi possono essere parzialmente o totalmente risolti da una tecnologia solare conosciuta come *sistema fotovoltaico galleggiante* (FLOATING FV - FVP): è una tecnologia di nuova concezione, senza alcuno sviluppo commerciale intrapreso e con qualche progetto dimostrativo sviluppato nel mondo. A causa della novità di questi sistemi FV, molti di essi sono di proprietà private e di piccola taglia: negli

ultimi 3 anni sono stati installati circa 100 MW in tutto il mondo e si prevede una forte espansione per i prossimi anni (l'India ha annunciato di voler raggiungere il target di 100 GW di potenza installata con questi sistemi).

Questa tecnologia sostituisce gli impianti di generazione fotovoltaici installati sulla terra ferma, quindi può essere installata sui corpi idrici come oceani, laghi, lagune, bacini di irrigazione ecc.

COMPONENTI PRINCIPALI

Il sistema fotovoltaico galleggiante (FPV) è costituito principalmente da un pontone o strutture galleggianti (zattere) separate, sistema di ormeggio, pannelli solari e cavi elettrici, come si può notare in figura 89 [22]:

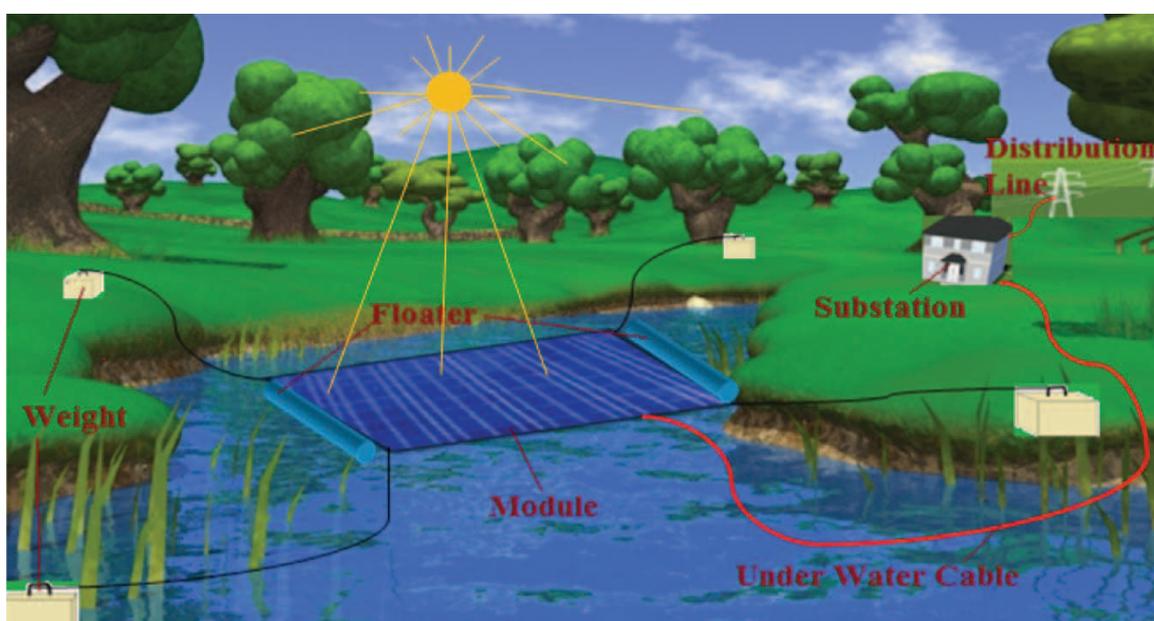


Figura 89 - Layout di un impianto fotovoltaico galleggiante.

Prima di illustrare tutti i componenti bisogna notare che le strutture di supporto per un sistema FPV con moduli fotovoltaici rigidi, differiscono da quelle convenzionali principalmente perché non hanno un solido ancoraggio (non sono fissati ad un tetto ad esempio) e non si trovano su una superficie regolare (a causa delle onde). I moduli FV rigidi, quando sono esposti al vento e alle onde possono subire rotture (cell crack formation) a causa della loro limitate proprietà meccaniche e flessibilità. Quindi l'idea di base è quella di installare i moduli fotovoltaici su una zattera con una spinta (galleggiamento) adeguata e di lanciarli in acqua per assemblare la piattaforma completa.

Di seguito i principali componenti di un FPV:

- □ **PONTONE:** un pontone è una struttura (piattaforma) galleggiante avente abbastanza spinta da galleggiare sia da sola sia con un carico pesante collocato sopra. La piattaforma è progettata per contenere un numero adeguato di moduli in serie/parallelo in base alle esigenze e alla disponibilità di spazio.

- □ **SRUTTURA GALLEGGIANTE (ZATTERA):** galleggianti cavi in plastica, con una spinta effettiva per il proprio peso, che vengono assemblati tra loro in modo tale da formare un grande pontone. I galleggianti sono tipicamente costruiti in HDPE (polietilene ad alta densità) conosciuto per la sua resistenza alla trazione, per il fatto che non richiede manutenzione e per la sua resistenza alla corrosione e ai raggi UV.

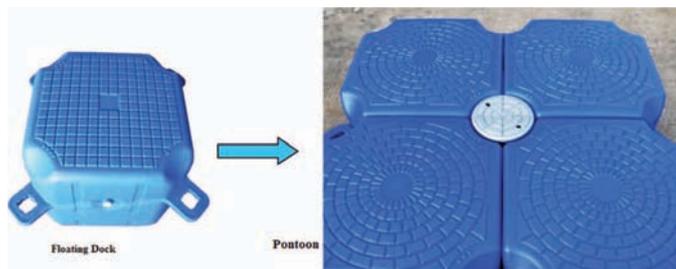


Figura 90- Strutture galleggianti per sostenere i moduli FV.

- □ **SISTEMA DI ORMEGGIO:** quando si parla di sistema di ormeggio, usualmente ci si riferisce a qualsiasi struttura permanente a cui può essere fissato un container, come ad esempio banchine, moli, pontili, boe di ancoraggio, gavitelli. Il sistema di ormeggio mantiene i pannelli nella stessa posizione per impedire

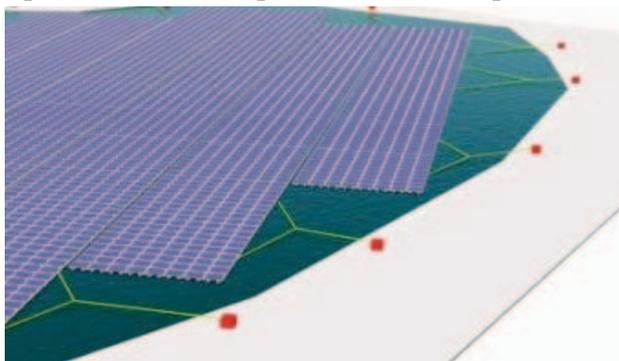


Figura 91 - Tipico sistema di ormeggio.

loro di ruotare o di muoversi a causa del galleggiamento; esso può essere fatto con imbragature in corda di nylon legate a bitte sulla riva e fissate ad ogni angolo. Ogni corda di ormeggio è in grado di resistere al massimo carico

del vento: tuttavia il carico del vento è distribuito su tutta la struttura, anche se in maniera non omogenea, cosicché la robustezza di questo sistema di ormeggio è senza dubbio idonea.

- □ **MODULO FV:** fino ad oggi, per i sistemi FV galleggianti, si sono utilizzati i moduli fotovoltaici in silicio cristallino. Tuttavia, siccome molti progetti sono installati su superfici di acqua salata, vengono richiesti moduli fabbricati specificamente per resistere all'esposizione a lungo termine alla nebbia salina.
- □ **CAVI E CONNETTORI:** importanti per trasportare la corrente dai moduli alla terra ferma ove è presente la rete elettrica o il carico. Fin ora per i progetti commissionati, non si prevedono cavi sottomarini ma l'impianto elettrico viene fatto passare sopra l'acqua. Anche se non ci sono componenti elettrici sott'acqua, per i progetti del *floating FV* sono importanti cavi adeguatamente calibrati e box impermeabili (per le connessioni).

VANTAGGI e SVANTAGGI

Ad oggi ci sono i vari tipi di installazione solare come è mostrato nel seguente diagramma:

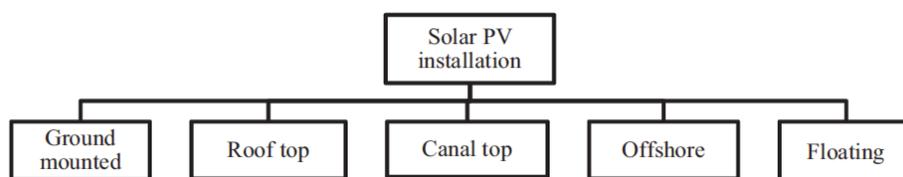


Figura 92 - Tipologie di installazione di moduli FV.

I vantaggi che offre il sistema FPV rispetto alle altre tecnologie mostrate in figura 92 e che si possono evidenziare sia in [22] che nel lavoro di Marco Rosa et al. [23], sono:

- □ **Incremento dell'efficienza:** la riflessione della luce dall'acqua e il raffreddamento evaporativo naturale possono mantenere bassa la temperatura del modulo fotovoltaico e quindi innalzare la sua efficienza.

- **Minore evaporazione dell'acqua:** i sistemi galleggianti forniscono ombreggiamento alla superficie d'acqua e permettono di ridurre l'evaporazione.
- **Miglioramento della qualità dell'acqua:** FPV può portare ad una migliore qualità dell'acqua sottostante a causa di una minore fotosintesi clorofilliana e crescita delle alghe.
- **Riduzione delle onde:** la piattaforma flottante permette di ridurre la formazione di onde e, quindi, l'erosione delle sponde del bacino.
- **Minore effetto della polvere:** tipicamente aree con un'elevata energia solare possono essere polverose ed aride, mentre i sistemi FPV lavorano in un ambiente in cui c'è pochissima polvere.
- **Disponibilità di acqua per la pulizia e il raffreddamento:** il benefit che l'acqua riceve dall'installazione di un FPV sulla sua superficie è anche un contributo per la diffusione di questa tecnologia e il suo sviluppo.
- **Risparmio di terreno:** i sistemi FPV permettono di preservare terreni importanti per l'agricoltura, le miniere, il turismo e trasformano la superficie d'acqua, non redditizia e non sfruttata, in centrali solari.
- Offrono un approccio globale per i bacini d'acqua dolce, isole remote, bacini idroelettrici, bacini industriali, riserve di irrigazione, ad essere confacenti all'energia solare.

Gli svantaggi di questa tecnologia, invece, messi in evidenza da L. Liu et al. [24], si possono così riassumere:

- FPV è incline a molte minacce come alta marea, onde marine, cicloni e tsunami.
- I moduli solari sono circondati da acqua e perciò le prestazioni del sistema potrebbero essere compromesse per l'elevato contenuto di umidità.
- La corrosione delle strutture metalliche e dei componenti aumenta e può ridurre la vita del sistema.
- Problematiche di sicurezza (safety) legate al trasporto della potenza dalla superficie d'acqua alla terra ferma.

- A causa di una ridotta penetrazione della luce solare nel corpo idrico, viene influenzata sia la crescita di animali acquatici che delle alghe marine.
- Umidità e temperatura ridotte sul pannello provocano una deriva termica negativa che può ridurre l'efficienza complessiva.
- FPV hanno bisogno di un sistema di ormeggio con controllo direzionale per mantenere effettivamente lo stesso azimuth e la stessa posizione, questo perché un cambiamento di direzione dei moduli riduce la potenza prodotta.
- Sono molto comuni nei FPV problemi legati a stress meccanici e vibrazioni a causa del vento, delle onde e di forze esterne.
- È richiesta una regolare pulizia dell'argilla accumulata sui lati del fiume/lago.
- Possono influenzare l'attività di pesca ed altre attività di trasporto, dipende dal sito scelto.
- C'è la possibilità di incidenti elettrici a causa dei cavi sottomarini e hanno un impatto sull'ecosistema esistente.
- Il costo della generazione di energia da pannelli solari è 10 volte maggiore rispetto ad un altro a combustibile fossile, durante i primi anni, ovviamente questo vale esclusivamente per FPV (comprende tutti i costi).
- L'installazione di FPV non può essere fatta in mare in quanto la marea influenzerebbe continuamente la posizione dei moduli FV.

DAI SISTEMI SOMMERSI A QUELLI GALLEGGIANTI

Ci sono molte possibilità per sfruttare l'acqua come vettore energetico, sia acqua dolce che salata, si possono avere sistemi galleggianti o anche sistemi sommersi in acqua ad una certa profondità. Come si evince dallo studio di R. Cazzinga et al. [25] gli impianti FV sommersi (figura 93), sono visti come una soluzione avente il minimo impatto ambientale in quanto evitano o riducono il problema della pulizia ed incrementano l'efficienza a causa della scomparsa dell'effetto di deriva termica.

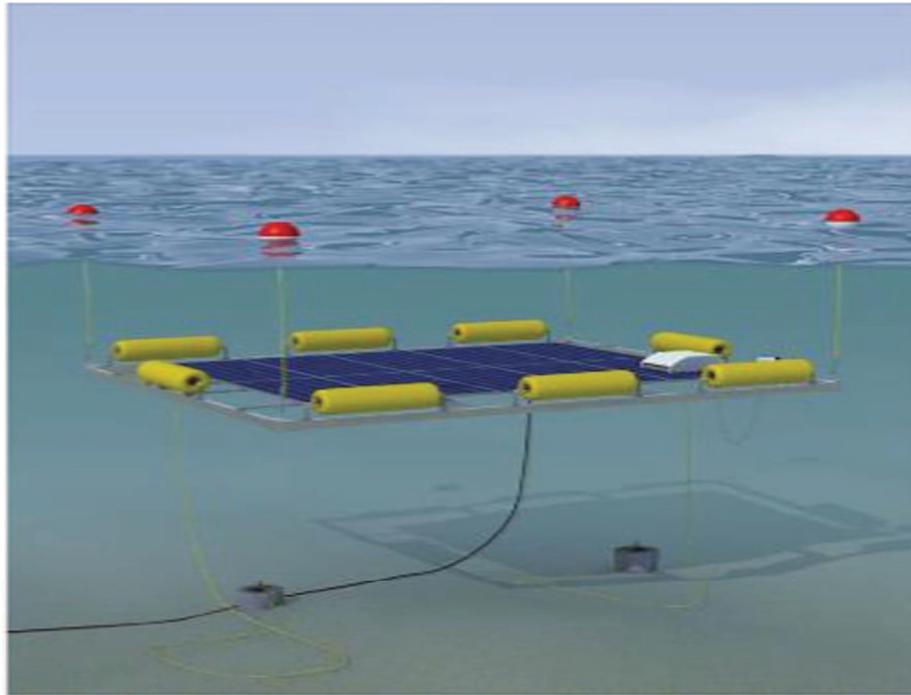


Figura 93 - Applicazione di un modulo FV sommerso.

Bisogna però notare che l'acqua è un forte assorbitore di luce; l'assorbimento dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione solare incidente. Essa si comporta come un filtro passa alto, ovvero l'acqua blocca i fotoni con lunghezza d'onda elevata (regione dell'infrarosso), mentre la trasmissione della luce arriva al suo massimo nell'intervallo delle lunghezze d'onda fra i 350nm e 550nm (spettro del visibile) dove la maggior parte dei moduli FV lavora.

Nella figura 94 viene riportata la variazione dello spettro solare per diverse profondità dell'acqua, dove la linea rossa tratteggiata rappresenta la risposta allo spettro solare di una cella FV in silicio cristallino.

L'impatto della sommersione si ha sia sul decremento e stabilizzazione della temperatura e sia sulla riduzione dell'irradianza incidente, quindi il rendimento energetico del modulo FV sommerso può essere maggiore o minore di quello galleggiante, dipende

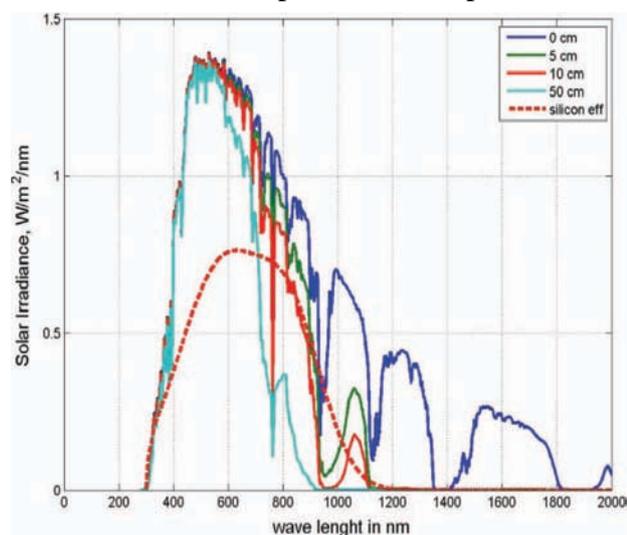


Figura 94 - Variazione dello spettro di radiazione solare in funzione della profondità dell'acqua.

dalla profondità in acqua, dalla temperatura dell'acqua e dalla tecnologia utilizzata. Se lo strato di acqua è piccolo (1-2 cm) e la temperatura dell'acqua è intorno ai 15 °C, l'incremento del rendimento dovuto ad una bassa temperatura supera ampiamente le piccole perdite che si hanno nella radiazione assorbita (da notare che questa è una cosa positiva per quanto riguarda il raffreddamento del modulo con film di acqua).

La discussione principale si ha riguardo la possibilità di usare i bacini idrici al fine di installare moduli FV sommersi o galleggianti con un velo di acqua con i seguenti vantaggi, che risolvono o per lo meno riducono due dei limiti prima citati:

1. L'uso di aree disponibili e inutilizzate: ove l'attività umana è presente, ritroviamo dei bacini idrici che possono essere utilizzati come supporto alle piattaforme flottanti;
2. L'eliminazione della deriva termica grazie alla possibilità di raffreddare i moduli o sommergendoli o generando un velo d'acqua sulla loro superficie.

La soluzione del modulo galleggiante, presenta due vantaggi rispetto a quello sommerso [25]:

- La semplicità del meccanismo di tracking. Una grossa piattaforma galleggiante può ruotare senza alcuno sforzo intorno all'asse verticale, semplificando fortemente il meccanismo di tracking e quindi riducendo fortemente i costi;
- La possibilità di utilizzare la cavità del galleggiante come un volume dove l'aria compressa può essere accumulata in via quasi isoterma, quindi consentendo l'accumulo dell'energia prodotta dal pannello.

Naturalmente per quanto riguarda il tipo di acqua su cui installare il sistema FPV o sommerso, l'uso di acqua dolce (quindi laghi, fiumi, bacini naturali ecc.) ha molti vantaggi rispetto all'acqua salata: limita il problema della corrosione, si ha un impatto ridotto delle onde e del vento e infine anche una limitata proliferazione di alghe. D'altro

canto però, la disponibilità di acqua salata è molto più alta rispetto a quella dolce, ma sicuramente il costo delle zattere e del sistema di ormeggio può essere più alto.

EFFETTO DI UN FPV SULL'EVAPORAZIONE DELL'ACQUA

Come si è visto nei vantaggi legati a questa tecnologia, FVP riduce la quantità di acqua che normalmente evapora dal bacino permettendo di conservare l'acqua accumulata. Sono due i principali fattori che, insieme, contribuiscono a ridurre l'evaporazione dell'acqua:

- a) L'ombreggiatura fornita dalla struttura flottante riduce la quantità di radiazione solare che arriva in acqua e, di conseguenza la sua temperatura;
- b) Il sistema FPV ricopre parzialmente la superficie di acqua e riduce l'effetto del vento su questa superficie.

Marco Rosa et al. [23] hanno studiato questo effetto in zone come l'Australia dove si ha un alto livello di radiazione solare ma anche un clima arido, quindi, l'opportunità di salvare l'acqua e allo stesso tempo sfruttare l'elevata irradianza rappresenta un target importantissimo: una stima approssimativa stabilisce che per ogni MW di picco installato su un bacino si ha una riduzione di acqua evaporata che va dai 15000 ai 25000 metri cubi.

Un grosso vantaggio lo si può avere, ad esempio, con i bacini per il trattamento delle acque reflue che, normalmente, sono grosse estensioni di acqua superficiale in cui i reflui della città vengono accumulati, trattati in maniera naturale con dei batteri e trasformati in acqua utilizzabile per le irrigazioni: ricoprire questi bacini con un FVP riduce fortemente il meccanismo di evaporazione, limitando, allo stesso tempo, gli odori e migliorando l'attività dei batteri stessi.

Bisogna però notare che questo effetto è in contrapposizione al primo vantaggio elencato (incremento dell'efficienza a causa dell'evaporazione naturale dell'acqua) in quanto ridurre l'evaporazione dell'acqua significa avere un minore raffreddamento evaporativo per il modulo e, quindi, un minor incremento dell'efficienza del sistema complessivo.

Da recenti studi effettuati in zone come l’Australia, si è visto che, in condizioni di giornata soleggiata, i parametri che influenzando il tasso di evaporazione sono la tensione di vapore e il vento, i quali possono cambiare il tasso di evaporazione di un fattore 10 come mostrato in figura 95: come bene si capisce dalla figura, il tasso di evaporazione si riduce di una frazione di mm per giorno e si può facilmente affermare che questa riduzione può essere superiore al 90%. La situazione cambia se viene utilizzato un sistema di raffreddamento con film di acqua sulla superficie dei moduli: in questo caso, cioè quando il sistema di raffreddamento è acceso, i parametri da valutare sono sostanzialmente uguali a quelli usati per una superficie d’acqua aperta (cioè non coperta da FPV). L’utilizzo di questo sistema di raffreddamento, comunque, lo si ha solo nelle ore più calde della giornata (6-8 ore in una giornata estiva) e per una superficie che, approssimativamente, è i 2/3 della superficie della piattaforma: la temperatura del film di acqua (usato per raffreddare) è maggiore della temperatura dell’acqua di bacino, favorendo un po’ l’evaporazione, ma non supera mai i 30 °C.

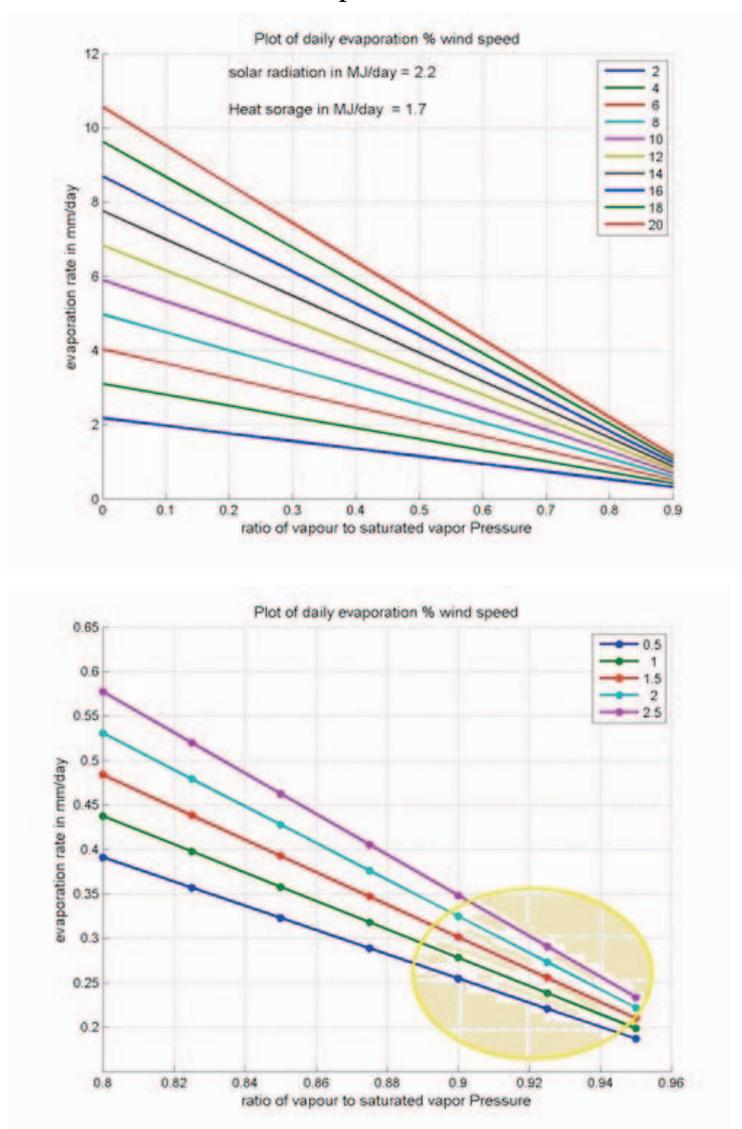


Figura 95 - Tasso di evaporazione dell’acqua in funzione della pressione del vapor saturo, rispetto alla velocità del vento.

Assumendo che l’evaporazione occupi i 2/3 della superficie e che avviene in un periodo pari ad 1/3 del tempo (in una giornata soleggiata), si può affermare che l’evaporazione è circa il 30% in meno rispetto ad una superficie non coperta da un FPV.

Si può infine concludere dicendo che:

- a) In assenza di un sistema di raffreddamento, l'evaporazione è limitata per circa il 90%
- b) In presenza di un sistema di raffreddamento l'evaporazione si riduce dal di sotto del 75%.

RAFFREDDAMENTO E PULIZIA DI UN FPV

Nelle condizioni di normale funzionamento (senza ombreggiamento né difetti di costruzione), si è detto più volte che sono due i fattori che possono ridurre l'efficienza dei moduli FV: alta temperatura operante e riduzione dell'irradianza incidente a causa dello sporco.

Ci sono modi differenti di raffreddare un modulo FV, i quali possono essere classificati in attivi e passivi: la soluzione più efficace per FPV è quella di utilizzare efficientemente l'acqua per raffreddare e pulire il modulo. Ovviamente adottando questa soluzione con acqua si hanno due elementi critici da tener presente: bisogna avere abbastanza acqua disponibile e un basso consumo di energia per il pompaggio dell'acqua (condizioni che sono soddisfatte nel FPV).

Possiamo raffreddare il pannello con due tecniche differenti come si evince da [26]:

1. Water veil Cooling (WVC) – raffreddamento con velo d'acqua
2. Sprinkler cooling system – sistema di raffreddamento Spinkler

WATER VEIL COOLING

È una tecnica di raffreddamento che consiste nel generare un velo d'acqua sulla superficie del modulo usando una pompa (sistema di pompaggio – figura 96):



Figura 96 - Water Veil Cooling system

L'acqua ha un indice di rifrazione pari a 1,33 che si trova tra quello dell'aria (pari a 1) e del vetro (pari a 1,55). In questo modo il velo d'acqua riduce l'effetto della riflessione della radiazione solare, dando un incremento del rendimento del 2% se la radiazione solare è perpendicolare al modulo, del 6% per un angolo di incidenza inferiore a 30°.

L'effetto negativo dell'assorbimento della radiazione solare da parte dell'acqua può essere trascurato a causa del piccolo spessore del velo di acqua che influisce leggermente sulla zona dell'infrarosso dello spettro solare. La presenza del velo d'acqua riduce a zero l'effetto dello shock termico e diminuisce l'invecchiamento del modulo.

Sono stati fatti molti sforzi per costruire impianti che sfruttino questo effetto il quale, comunque, è praticabile solo quando si lavora su un bacino che dia la possibilità di prelevare acqua e di scaricarla senza problemi.

L'acqua viene pompata, di solito, a bassa pressione: una stima fatta su un velo d'acqua su singolo pannello suggerisce che è necessario avere circa 1-2 l/min in modo tale che 100 m³ possano fornire un velo d'acqua a circa 1000 moduli FV per un ora. Per concludere, solo lo 0,25 % dell'energia prodotta viene utilizzata dal sistema di pompaggio mentre l'incremento di energia a causa di un miglior assorbimento di luce e dell'assenza di deriva termica è dell'ordine del 20%.

SPRINKLER COOLING SYSTEM

Una soluzione alternativa al WVC è l'uso di sprinkler (spruzzatori – figura 97) ad alta pressione. In questo caso il sistema di raffreddamento consiste in alcuni spruzzatori standard per l'irrigazione che lavorano ad una pressione di 2-3 bar.



Figura 97 – Sprinkler Cooling System

Da test effettuati su un singolo modulo, nel breve periodo e senza considerare l'energia spesa dal sistema di raffreddamento, la miglior opzione di raffreddamento si è rivelata essere quella del raffreddamento simultaneo della superficie anteriore e posteriore del modulo. Questo approccio semplificato riduce i costi di irrigazione, ma rimane il problema della trasparenza del getto di acqua.

SISTEMA DI TRACKING

Un sistema di tracking ha lo scopo di massimizzare l'energia annua prodotta da FV, poichè l'incremento di energia, per un determinato luogo, è dipendente dal tipo e dall'accuratezza dell'allineamento delle celle FV nella direzione di massima irradianza. Un sistema di tracking per un FPV deve prendere in considerazione non solo che manca una fissa e solida base, ma anche dai problemi (disturbi) legati alle condizioni di galleggiamento: il sistema di tracking ad asse verticale sembra essere molto adatto ai FPV.

In questi ultimi anni sono state proposte e brevettate diverse soluzioni per il sistema di tracking per FVP le quali, si basano su un sistema meccanico di tracking e su un sistema di allineamento basato su un sensore solare. Per descrivere alcuni concetti legati a questi sistemi, si potrebbe, in linea di massima, dividerli in due categorie:

- □ Tracking con struttura confinante.
- □ Tracking senza struttura confinante: con corda esterna, usando una struttura sommersa oppure usando propulsori di prua.

TRACKING CON STRUTTURA CONFINANTE

Per questa tipologia di tracking la piattaforma galleggiante è circondata da una struttura fissa (cerchio o poligono) e un motore elettrico adeguato permette la rotazione della piattaforma rispetto alla struttura fissa (come si nota in figura 98). Bisogna però notare che questo sistema è stato solo progettato ma mai sviluppato in quanto richiede costi di installazione e manutenzione elevati, inoltre, risulta intrinsecamente limitato per piccole piattaforme galleggianti con al più 30m di diametro.

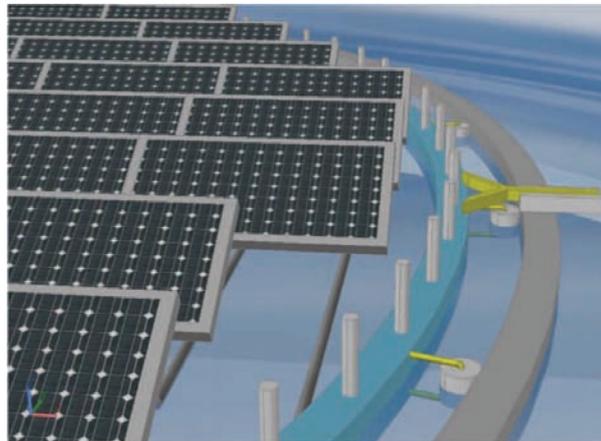


Figura 98– Tracking con struttura confinante

TRACKING SENZA STRUTTURA CONFINANTE - SISTEMA CON CORDA

In questo sistema una corda viene messa intorno alla piattaforma ed uno/due verricelli, posizionati su una boa galleggiante o in un punto vicino alla sponda del bacino, generano il movimento. L'ormeggio centrale è dato da un asse centrale con un plinto o semplicemente da un blocco di cemento pesante con una catena fissata al centro della piattaforma (figura 99)



Figura 99 – Sistema di tracking con corda

TRACKING SENZA STRUTTURA CONFINANTE – SISTEMA CON STRUTTURA SOMMERSA

Per ottenere un sistema di tracking preciso senza elementi esterni è stata suggerita e brevettata un'ulteriore soluzione. I suoi componenti principali sono:

- Una ruota di ferro sommersa sotto la piattaforma dal diametro di 2.5m (figura 101);
- Un serbatoio vuoto per spingere su la ruota di ferro;
- Alcuni rulli attaccati alla parte superiore della piattaforma per permettere lo scorrimento;
- Tre punti di ormeggio per mantenere l'intera struttura in posizione (figura 102).
- Un motore elettrico per far ruotare la piattaforma.

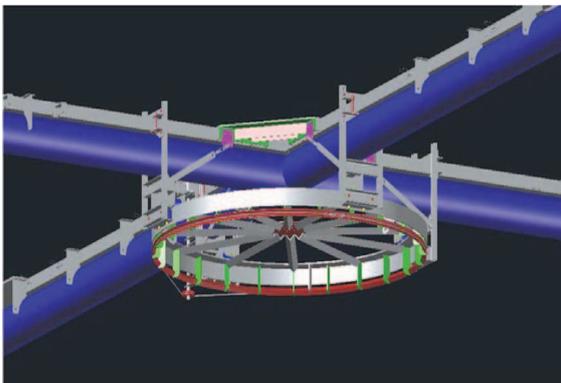


Figura 100 – Ruota in ferro

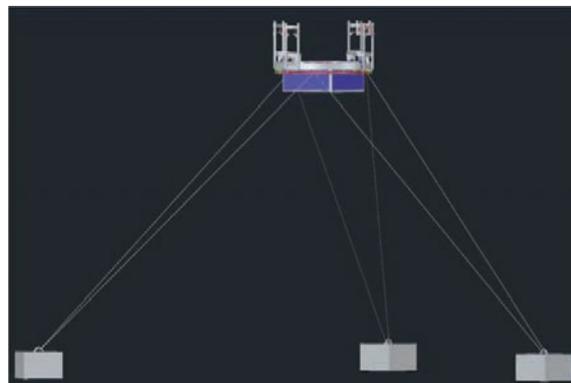


Figura 101 – Sistema di ormeggio

TRACKING SENZA STRUTTURA CONFINANTE – SISTEMA CON PROPULSORI DI PRUA

Questa soluzione è molto economica ed è stata implementata e testata negli impianti pilota di Pisa e Suvereto. Per questo tipo di sistema, la piattaforma è fissata al centro e due o più propulsori di prua generano la coppia per mettere in rotazione la piattaforma (come si nota in figura 102).



Figura 102 – Sistema con propulsori di prua

Il sistema è composto da:

- □ Un sistema di guida elettronica (EGS) in grado di riconoscere la posizione del sole relativa alla piattaforma: si basa su una fotocamera e su un SW in grado di identificare la zona di massima irradianza con una precisione di pochi decimi di grado;
- □ Uno o più propulsori di prua posizionati sui bordi della piattaforma;
- □ Un blocco pesante in cemento con una catena che consente di fissare la piattaforma con un movimento limitato del suo centro di rotazione;
- □ Un secondo ormeggio che limita la rotazione della piattaforma per un certo angolo in modo tale da evitare la torsione del cavo quando il sistema è fermo.

Dall'accensione e lo spegnimento dei due motori, l'EGS setta la piattaforma nella direzione corretta dei raggi solari; se il sistema deve essere spento per qualsiasi motivo (di notte oppure forti venti ecc.) l'ormeggio esterno blocca la rotazione della piattaforma. Sono state effettuate misurazioni e simulazioni di vento e sulla solidità della struttura ed

è stato verificato che le forze coinvolte possono essere gestite facilmente con dei propulsori a bassa potenza.

SISTEMA DI ALLINEAMENTO SOLARE

Il sistema di tracking, in tutti i casi visti, non si può unicamente basare su un algoritmo geometrico (tracking astronomico) siccome manca, in generale, un sistema di riferimento fisso. Per questo motivo, può essere adottato un sistema di tracking basato su dei sensori e sono state valutate due possibilità: una che è fissa ed usa i modelli di ombreggiatura per trovare la posizione del sole ed un'altra che utilizza le immagini di una fotocamera.

Per quanto riguarda quello con sfruttamento di una fotocamera, le immagini acquisite vengono analizzate da un SW che identifica il cerchio di luce solare: se, a causa di nuvole o nebbia, il disco solare è assente, il sistema punterà in una zona più luminosa.

La precisione di questi strumenti è collegata al numero di pixel della fotocamera: per una fotocamera commerciale a basso costo, la risoluzione è sotto $0,5^\circ$ con un errore che diminuisce in condizioni di cielo sereno.

SISTEMI DI ACCUMULO (Elettrico) CON ARIA COMPRESSA

La possibilità di rimodellare la curva di generazione di un FPV potrebbe incrementare l'interesse per questa tecnologia, specialmente se è connessa ad una rete isolata. In questo conteso i sistemi di accumulo dell'energia ad aria compressa (CAES – Compressed air energy storage) sono una delle tecnologie più promettenti in questo campo, perché sono caratterizzati da un'alta affidabilità, basso impatto ambientale ed una notevole densità di energia. In particolare, il sistema micro-CAES, avente un contenitore rigido d'accumulo, garantisce una buona trasportabilità del sistema ed un'elevata adattabilità anche con produzioni di energia distribuite o isolate.

Una delle soluzioni proposte per il CAES è l'utilizzo di tubi galleggianti in acciaio, i quali hanno una loro massa che bisogna aggiungere alla massa della struttura esistente. Con ciò si riesce a garantire un buon galleggiamento e gli operatori possono lavorare in condizioni di sicurezza su una zattera isolata. Ciò che importa tuttavia è che i tubi d'acciaio siano immersi per almeno due terzi nel bacino idrico se la pressione è nulla o

per circa l'80% se i cilindri sono carichi di aria compressa: questo garantisce uno scambio di calore tra l'acqua del bacino e l'aria all'interno dei tubi.

Altra cosa importante è scegliere tra una compressione isoterma (con una gran quantità di calore scambiato) o una compressione adiabatica (con il problema di accumulare il calore e di recuperarlo in maniera efficiente).

Infine il compressore e il motore pneumatico devono essere trattati con cautela ed è importante avere un buon scambio di calore per ridurre le irreversibilità, per quanto è possibile.

COSTI

È ovvio che ricoprire un bacino è un'operazione molto costosa ma, usando un sistema che ricopre il bacino e allo stesso tempo produce energia (come FVP) si può risolvere questo problema.

Un primo accorgimento da tener presente è quello di utilizzare bacini vicino ai centri abitati in modo tale da ridurre i costi per la trasmissione dell'energia elettrica.

Le strutture di supporto utilizzate per i FPV incidono per il 25% del costo totale del progetto ma sono in misura minore rispetto al costo di acquisto e preparazione di un'area equivalente sulla terra ferma. Anche i costi di installazione e manutenzione sono spesso inferiori a quelli di un equivalente sistema solare a terra perché l'acqua necessaria per la pulizia del modulo è disponibile alla fonte e i componenti hanno meno probabilità di surriscaldarsi.

Il costo tipico sistema FPV da 1 MW di picco (istallato in un bacino a Singapore) potrebbe essere sintetizzato come in tabella 11.

	Quantity	Cost (€)
Raft carpentry (number of rafts)	160	200,000
PE pipes (number of pipes)	640	160,000
PV Modules (number of module)	3200	420,000
Cable & Inverter	-	140,000
Site preparation	-	30,000
Work (hour)	3000	40,000
Total costs		990,000

Tabella 11 - costi di un FPV

6.1 CONCLUSIONI

Con riferimento al sistema di raffreddamento analizzato nel capitolo 4, un'interessante soluzione potrebbe essere quella di utilizzare il sistema proposto proprio nei sistemi FPV: siccome il modulo fotovoltaico galleggiante viene installato principalmente su riserve di acqua, dotando questo sistema di una pompa che aspira dalla riserva sottostante, è possibile spruzzare acqua che, alla fine del suo percorso sulla superficie del modulo, ritornerebbe alla fonte (ovvero alla riserva d'acqua sottostante). In questo caso, quindi, il consumo d'acqua sarebbe ipoteticamente nullo, anche se bisogna tener conto della quantità di acqua che evapora dalla superficie del pannello, ma comunque rappresenterebbe una quantità esigua rispetto a quella che ritorna alla fonte.

Inoltre però, bisogna tener presente che l'acqua della riserva non è pulita come quella del rubinetto, quindi bisognerebbe dotare il sistema di un filtro e, eventuale addolcitore, per evitare che la sporcizia ed il calcare intacchino i componenti del sistema (pompa, tubi, ugelli ecc.) e a sporchino la superficie del modulo stesso.

7. CONCLUSIONI

In questa tesi sperimentale si è potuto analizzare, sia da un punto di vista pratico che teorico, un sistema di raffreddamento ad acqua per moduli fotovoltaici.

In una prima fase sono stati analizzati vari sistemi di raffreddamento attivi e passivi ed è stato riscontrato che, da un punto di vista energetico, i migliori sono quelli passivi con materiali a cambiamento di fase (PCMs) ma, da un punto di vista dell'impatto ambientale, da un'analisi LCA eseguita da alcuni ricercatori su tutti i sistemi di raffreddamento sperimentati, si è evidenziato che i sistemi attivi ad acqua e/o ad aria sono molto avvantaggiati rispetto agli altri, in quanto il fluido termovettore non ha alcun impatto ambientale (bisogna però prestare attenzione ai materiali utilizzati per costruire questi sistemi).

Per quanto riguarda il sistema di raffreddamento, proposto nel capitolo 4, durante il suo funzionamento sono state adoperate due configurazioni di ugelli, il cui unico tratto distintivo è legato alla loro inclinazione rispetto al piano del modulo (63° nella 1^a configurazione e 83° nella 2^a configurazione). Per entrambe le configurazioni di ugelli si è visto che il raffreddamento del modulo risulta meno incisivo per le basse pressioni (0.5 bar) e per cicli il cui tempo tra uno spruzzo e il successivo è considerevole (180 s o 300 s), mentre per pressioni elevate (1.5 – 2 bar) e tempi contenuti (30s – 60s) le cose migliorano molto. Nel caso della prima configurazione si è visto che la pressione di 1.5 bar risulta essere un buon compromesso tra i consumi di acqua e l'incisività del raffreddamento, rispetto alle pressioni di 1 bar (in cui si ha un minor consumo di acqua ma anche un peggior raffreddamento) e di 2 bar (in cui il consumo di acqua è il massimo ottenibile mentre l'incisività del raffreddamento non migliora tanto rispetto a $p = 1.5$ bar). Con la seconda configurazione di ugelli si ottiene un netto miglioramento soprattutto nell'incisività del raffreddamento tanto che la pressione di 1 bar è risultata il miglior compromesso tra i fattori prima citati (consumo di acqua e uniformità del raffreddamento) comportando quindi un minor consumo di acqua rispetto alla prima configurazione di ugelli. Ovviamente il tutto è stato analizzato partendo sempre dalla massima temperatura del modulo (non la NOCT) e considerando 50 cicli ON-OFF per la fase di raffreddamento: prolungando questa fase per tutto l'arco temporale che va dalle 10:00 alle 16:00 di una tipica giornata di luglio, i consumi di acqua risultano ancora troppo elevati (per il ciclo 30s ON – 300s OFF a $p = 1$ bar si ha un consumo di acqua pari a 64

litri/giorno) per possibili applicazioni reali. Però, se si iniziasse a raffreddare il modulo nell'istante in cui la sua temperatura media raggiunge i 45 °C (NOCT) e si eseguisse un numero inferiore di cicli ON-OFF, i consumi di acqua potrebbero ridursi molto e il sistema potrebbe risultare applicabile nella realtà. C'è da dire però che il sistema analizzato lo si trova installato principalmente in luoghi comuni come tetti di case, serre, edifici industriali ecc., ma nel momento si passa a configurazioni di tipo FVP, il problema del consumo di acqua potrebbe non esserci in quanto installati su bacini idrici e ciò consentirebbe un incremento della produzione elettrica di tutto il campo fotovoltaico senza preoccuparsi minimamente del consumo d'acqua.

Altro problema riscontrato durante le diverse fasi di raffreddamento eseguite, è che l'acqua non riesce a distribuirsi omogeneamente su tutta la superficie del pannello, rimangono sempre delle zone poco bagnate (anche con la 2^a configurazione di ugelli che presenta un'uniformità maggiore nel raffreddamento): questo problema potrebbe risolversi o incrementando l'idrofilia del vetro di copertura (attraverso alcune tecniche viste nel capitolo 5.2, anche se costose) oppure sostituendo il modulo con uno il cui vetro di copertura presenta delle caratteristiche idrofiliche migliori. Ciò permetterebbe al film di acqua di distribuirsi ancora meglio su tutta la superficie evitando il problema delle zone poco bagnate.

Quindi, in definitiva, unendo il sistema di raffreddamento con la seconda configurazione di ugelli e un modulo fotovoltaico il cui vetro solare tende ad avere caratteristiche superidrofiliche, si potrebbero ottenere netti miglioramenti nella distribuzione del film di acqua sulla superficie soprattutto a pressione di 0.5 bar, con la quale il consumo di acqua risulterebbe il più piccolo possibile.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Giama, S. Nižetić, A.M. Papadopoulos- Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part II: Active cooling techniques - Energy Conversion and Management, Volume 156, pages 301–323, 2018.
- [2] J. Siecker, K. Kusakana, B.P. Numbi - A review of solar photovoltaic systems cooling technologies - Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 79, pages 192–203, 2017
- [3] Natale Arcuri, Francesco Reda, Marilena De Simone - Energy and thermo-fluid-dynamics evaluations of photovoltaic panels cooled by water and air - Solar Energy, Volume 105, pages 147–156, 2014.
- [4] E. Giama, S. Nižetić, A.M. Papadopoulos- Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part I: Passive cooling techniques - Energy Conversion and Management, Volume 149, pages 334 - 354, 2017.
- [5] A. ShuklaaKarunesh Kant, Atul Sharma, Pascal Henry Biwol - Cooling methodologies of photovoltaic module for enhancing electrical efficiency: A review - Solar Energy Materials & Solar Cells, Volume 160, pages 275–286, 2017.
- [6] M. Hasanuzzaman, A.B.M.A. Malek, M.M. Islam, A.K. Pandey, N.A. Rahim - Global advancement of cooling technologies for PV systems: A review - Solar Energy, Volume 137, pages 25–45, 2016.
- [7] S. Sargunanathan, A. Elango, S. Tharves Mohideen – Performance enhancement of solar photovoltaic cells using effective cooling methods: A review – Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 64, pages 382–393, 2016.
- [8] Kerstin KOCH, Wilhelm Barthlott - Superhydrophobic and superhydrophilic plant surfaces: an inspiration for biomimetic materials - Phil. Trans. R. Soc. A, volume 367, pages 1487–1509, 2009 – (doi:10.1098/rsta.2009.0022).
- [9] H.R. Muotinho, C.S. Jiang, B.To, C. Perkins, M. Muller, M.M. Al-Jassim, L. Simpsons – Adhesion mechanism on solar glass: Effects of relative humidity, surface roughness and particle shape and size – Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 172, pages 145-153, 2017. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2017.07.026>).
- [10] Ing. Luca Mazzola – Rivestimenti organici ed inorganici su substrati polimerici e metallici: analisi delle problematiche di accoppiamento all’interfaccia, individuazione degli indici prestazionali e messa a punto di metodologie per la loro misura - Tesi di dottorato in ingegneria meccanica e industriale, Università degli studi “Roma tre”, pagine 12-20 e 55-60, anno 2010/2011.
- [11] S. Sutha, Sisira Suresh, Baldev Raj, K.R. Ravi - Transparent alumina based superhydrophobic self-cleaning coatings for solar cell cover glass applications - Solar Energy Materials & Solar Cells, Volume 165, pages 128–137, 2017.
- [12] Umer Mehmood, Fahad A.Al-Sulaiman, B.S. Yilbas, B. Salhi, S.H.A. Ahmed, Mohammad K. Hossain- Superhydrophobic surfaces with antireflection properties for

solar applications: A critical review. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Volume 157(2016), pages 604–623.

[13] Krishnan Surekha and Sureshbabu Sundararajan – Self-cleaning glass. *Anti-Abrasive Nanocoatings*, Elsevier Ltd. All rights reserved, 2015.

[14] X. Lu, C. Zhang, Y. Han, Low-density polyethylene superhydrophobic surface by control of its crystallization behavior, *Macromol. Rapid Commun.* (2004), [<http://dx.doi.org/10.1002/marc.200400256>]

[15] Y. Yuan, Y. Chen, W.L. Chen, R.J. Hong - Preparation, durability and thermostability of hydrophobic antireflective coatings for solar glass covers. Volume 118, Pages 222 – 231, 2015, *Solar Energy*

[16] Aditia Rifai, Numan Abu-Dheir, Mazen Khaled, Nasser Al-Aqeeli, Bekir Sami Yilba - Characteristics of oil impregnated hydrophobic glass surfaces in relation to self-cleaning of environmental dust particles. Volume 171, pages 8-15, *Solar Energy Materials and Solar Cells*.

[17] V.D. Ta, A. Dunn, T.J. Wasley, J. Li, R.W. Kay, J. Stringer, et al., Laser textured surface gradients, *Appl. Surf. Sci.* 371 (2016) 583–589.

[18] Estela Baquedano, Lorena Torné, Pablo Caño, Pablo A. Postigo - Increased Efficiency of Solar Cells Protected by Hydrophobic and Hydrophilic Anti-Reflecting Nanostructured Glasses – *Nanomaterials*, volume 7, pages 437 – 449, 2017 (<http://www.mdpi.com/2079-4991/7/12/437>).

[19] Swagata Banerjee, Dionysios D. Dionysiou, Suresh C. Pillai - Self-cleaning applications of TiO₂ by photo-induced hydrophilicity and photocatalysis – *Applied Catalysis B: Environmental*, volume 176–177, pages 396–428, anno 2015.

[20] Jaesung Son, Shreya Kundu, Lalit K. Verma, Mridul Sakhuja, Aaron J. Danner, Charanjit S. Bhatia, Hyunsoo Yang - A practical superhydrophilic self cleaning and antireflective surface for outdoor photovoltaic applications – *Solar energy material & solar cells*, volume 48, pages 46-51, 2012.

[21] L.K. Verma, M. Sakhuja, J. Son, A.J. Danner, H. Yang, H.C. Zeng, C.S. Bhatia- Self-cleaning and antireflective packaging glass for solar modules - *Renewable Energy* – volume 36, pages 2489-2493, 2011. (doi:10.1016/j.renene.2011.02.017).

[22] Alok Sahu, NehaYadav , K.Sudhakar - Floating photovoltaic power plant: A review – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 66, pages 815–824, 2016.

[23] Marco Rosa-Clot, Giuseppe Marco Tina, Sandro Nizetic - Floating photovoltaic plants and wastewater basins: an Australian project – *Energy Procedia*, volume 134, pages 664-674, 2017.

[24] Luyao Liu, Qinxing Wang, Haiyang Lin, Hailong Li, Qie Sun , Ronald wannersten - Power Generation Efficiency and Prospects of Floating Photovoltaic Systems - *Energy Procedia*, volume 105, pages 1136 – 1142, 2017.

[25] R. Cazzaniga, M. Cicu, M. Rosa-Clo, P. Rosa-Clot, G.M. Tina, C. Ventura - Floating photovoltaic plants: Performance analysis and design solutions - *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 81, 1730–1741, 2018

[26] Young-Geun Lee, Hyung-Joong Joo, Soon-Jong Yoon - Design and installation of floating type photovoltaic energy generation system using FRP members - Solar Energy, volume 108, pages 13–27, 2014.

[27] Miguel Redón Santafé, Juan Bautista Torregrosa Soler, Francisco Javier Sánchez Romero, Pablo S. Ferrer Gisbert, José Javier Ferrán Gozávez, Carlos M. Ferrer Gisbert - Theoretical and experimental analysis of a floating photovoltaic cover for water irrigation reservoirs – Energy, volume 67, pages 246 - 255, 2014.

RINGRAZIAMENTI

Desidero ricordare tutti coloro che mi hanno aiutato nella stesura della tesi con suggerimenti, critiche ed osservazioni: a loro va la mia gratitudine.

Vorrei ringraziare anzitutto la relatrice prof.ssa Anna Stoppato ed il correlatore Ing. Alberto Benato per avermi dato la possibilità di partecipare attivamente a questo progetto di tesi, per la disponibilità ed il sostegno durante l'elaborazione di questo lavoro.

Ringrazio i miei genitori Anna e Matteo, per avermi dato forza nei momenti difficili, è a voi che devo tutto questo. Mi avete insegnato a credere nelle mie capacità e ad avere sempre la grinta di non mollare mai.

Ringrazio le mie due belle sorelle Diletta e Ada, per avermi supportato nei momenti difficili.

Ringrazio te che sei sostanza dei miei giorni, grazie per avermi compreso ed aiutato nei momenti bui e per avermi donato sempre un sorriso nonostante le avversità. Ti amo.

Ringrazio i miei nonni materni, Luigi e Ada che hanno sempre creduto in me.

Un ringraziamento e un pensiero particolare va ai miei nonni paterni, Raffaele e Diletta, che da lassù sono stati e saranno sempre i miei angeli custodi.