

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

Realizzazione e valutazione di un sistema di raffreddamento a film d'acqua per un pannello fotovoltaico

Relatore: Prof.ssa Anna Stoppato

Correlatore: Ing. Alberto Benato

Laureando: Andrea Gonella

Matricola: 1005776

Anno Accademico 2016/2017

Indice

INTRODUZIONE	1
1. IL FOTOVOLTAICO.....	3
1.1 FUNZIONAMENTO DI UNA CELLA FOTOVOLTAICA	3
1.2 RENDIMENTO DI CONVERSIONE DI UNA CELLA SOLARE.....	7
1.3 EFFETTI DELL'IRRAGGIAMENTO SULLE PRESTAZIONI.....	9
1.4 EFFETTI DELLA TEMPERATURA SULLE PRESTAZIONI	9
1.5 PERDITE ENERGETICHE	11
1.6 RIFLESSIONE DELLA RADIAZIONE SOLARE	14
1.7 IMPIANTI FOTOVOLTAICI.....	15
1.7.1 Principali componenti di un impianto fotovoltaico.....	16
1.7.2 Tipologia di pannelli fotovoltaici.....	18
1.7.3 Ombreggiamento dei moduli.....	20
1.7.4 Tipologia di impianti fotovoltaici	21
2. RAFFREDDAMENTO DI PANNELLI FOTOVOLTAICI.....	23
2.1 CONVENIENZA DEL RAFFREDDAMENTO	23
2.2 ESPERIENZE DOCUMENTATE	24
2.2.1 Modello di Krauter.....	24
2.2.2 Modello di Moharram et al	26
2.2.3 Modello di Wilson	29
2.2.4 Raffreddamento frontale del pannello con <i>ground water tunneling</i> del fluido	30
2.2.5 Sistemi di raffreddamento ad aria	31
2.3 TEST DI AFFIDABILITÀ DEI MODULI FOTOVOLTAICI.....	32
3. SET UP SPERIMENTALE	35
3.1 IL PANNELLO FOTOVOLTAICO	35
3.2 INSTALLAZIONE DEL PANNELLO	35
3.3 SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO.....	36
3.3.1 Tubo collettore	36
3.3.2 Ugelli.....	37
3.3.3 Sistema di recupero dell'acqua	38
3.4 FARO ALOGENO	38

3.5 SISTEMA DI RILEVAMENTO DELLE TEMPERATURE.....	40
3.6 APPARATO SPERIMENTALE COMPLETO	41
4. ANALISI SPERIMENTALE: PRIMA PARTE.....	43
4.1 ASSUNZIONI FATTE	43
4.2 MISURE DELLE PORTATE D'ACQUA.....	44
4.2.1 Portate a monte del pannello.....	44
4.2.2 Portate a valle del pannello	45
4.2.3 Perdite di portata	46
4.3 CALCOLO TEORICO DELLA PORTATA	47
4.4 REGIME DI RISCALDAMENTO DEL PANNELLO	49
4.4.1 Riscaldamento del pannello con un faro posizionato ad 1 metro.....	49
4.4.2 Riscaldamento del pannello con un faro posizionato a 0.5 metri.....	50
4.5 REGIME DI RAFFREDDAMENTO DEL PANNELLO	52
4.6 STUDIO DEL FLESSO DELLA TEMPERATURA NEL REGIME DI RAFFREDDAMENTO	56
4.7 CONCLUSIONI PRIMA PARTE ANALISI SPERIMENTALE.....	59
5. ANALISI SPERIMENTALE: SECONDA PARTE.....	61
5.1 TIPOLOGIE DI PROVE.....	61
5.2 CICLO 60 SECONDI ON – 60 SECONDI OFF, CON FARO AD UN METRO	62
5.3 CICLO 60 SECONDI ON – 120 SECONDI OFF, CON FARO AD UN METRO	67
5.4 CICLO 60 SECONDI ON – 180 SECONDI OFF, CON FARO AD UN METRO	72
5.5 CICLO 30 SECONDI ON – 330 SECONDI OFF, CON FARO AD UN METRO	74
5.6 CICLO 30 SECONDI ON – 30 SECONDI OFF, CON FARO AD UN METRO	76
5.7 CICLO 60 SECONDI ON – 60 SECONDI OFF, CON FARO A MEZZO METRO	77
5.8 CICLO 30 SECONDI ON – 60 SECONDI OFF, CON FARO A MEZZO METRO	79
5.9 CICLO 30 SECONDI ON – 120 SECONDI OFF, CON FARO A MEZZO METRO	81
5.10 CICLO 30 SECONDI ON – 30 SECONDI OFF, CON FARO A MEZZO METRO	83
5.11 CONCLUSIONI SECONDA PARTE ANALISI SPERIMENTALE	84
6. ANALISI SPERIMENTALE: TERZA PARTE	87
6.1 PRESSIONE 0.5 BAR, INIZIO CICLO ALLA $T_{AMB}+2^{\circ}C$	87
6.2 PRESSIONE 0.5 BAR, INIZIO CICLO ALLA $T_{AMB}+4^{\circ}C$	89
6.3 PRESSIONE 0.5 BAR, INIZIO CICLO ALLA $T_{AMB}+6^{\circ}C$	90
6.4 PRESSIONE 0.5 BAR, INIZIO CICLO ALLA $T_{AMB}+8^{\circ}C$	92

6.5 CONFRONTO GRAFICO TRA LE PROVE A 0.5 BAR	94
6.6 PRESSIONE 1 BAR, INIZIO CICLO ALLA $T_{AMB}+2^{\circ}C$	95
6.7 PRESSIONE 1 BAR, INIZIO CICLO ALLA $T_{AMB}+4^{\circ}C$	96
6.8 PRESSIONE 1 BAR, INIZIO CICLO ALLA $T_{AMB}+6^{\circ}C$	98
6.9 PRESSIONE 1 BAR, INIZIO CICLO ALLA $T_{AMB}+8^{\circ}C$	99
6.10 CONFRONTO GRAFICO TRA LE PROVE AD 1 BAR	101
6.11 PRESSIONE 1.5 BAR, INIZIO CICLO ALLA $T_{AMB}+2^{\circ}C$	102
6.12 PRESSIONE 1.5 BAR, INIZIO CICLO ALLA $T_{AMB}+4^{\circ}C$	103
6.13 PRESSIONE 1.5 BAR, INIZIO CICLO ALLA $T_{AMB}+6^{\circ}C$	105
6.14 PRESSIONE 1.5 BAR, INIZIO CICLO ALLA $T_{AMB}+8^{\circ}C$	106
6.15 CONFRONTO GRAFICO TRA LE PROVE A 1.5 BAR	108
7. CONCLUSIONI	109
7.1 CONCLUSIONI DELLO STUDIO	109
7.2 MIGLIORAMENTI FUTURI.....	110
BIBLIOGRAFIA	113
RINGRAZIAMENTI	115

Introduzione

Nell'attuale contesto energetico ed ambientale è diventato rilevante e prioritario l'obiettivo di riduzione delle emissioni di gas serra e di sostanze inquinanti. Ciò avviene soprattutto mediante lo sfruttamento di fonti energetiche rinnovabili ed alternative, che si affiancano e riducono l'utilizzo di combustibili fossili. È generalmente definita "rinnovabile" una fonte energetica in grado di rinnovarsi nel tempo, in modo da essere disponibile in maniera ragionevolmente illimitata per l'uomo. Essa inoltre si definisce "sostenibile" se la rigenerazione avviene in tempi inferiori o al più uguali rispetto al suo consumo.

Il sole è certamente una fonte energetica rinnovabile e alla quale si può attingere nel rispetto dell'ambiente. Le principali caratteristiche dell'energia solare sono, infatti, la sua disponibilità diffusa e praticamente illimitata e il fatto di essere un'energia completamente pulita. Tra i diversi sistemi che sfruttano questa energia, il fotovoltaico è tra i più utilizzati per le qualità intrinseche del sistema stesso, poiché ha ridottissimi costi d'esercizio (il combustibile è gratuito) e limitate esigenze di manutenzione, è affidabile, silenzioso e relativamente semplice da installare. Inoltre il fotovoltaico, in alcune applicazioni isolate, è sicuramente conveniente in confronto ad altre fonti energetiche, specie in luoghi in cui sia difficoltoso e non economico giungere con tradizionali linee elettriche. Nel panorama italiano il fotovoltaico ha avuto negli ultimi 10 anni un forte incremento grazie al Conto Energia, un meccanismo di sovvenzione per il settore fotovoltaico che prevede la remunerazione, con incentivi erogati dal GSE (Gestore dei Servizi Elettrici), dell'energia elettrica prodotta da impianti connessi alla rete.

Per tutte queste motivazioni il settore del fotovoltaico è attualmente in continua evoluzione e le diverse imprese che operano nel settore sono in continua competizione per mettere in commercio moduli sempre più efficienti e performanti, investendo così tempo e denaro nella ricerca di sistemi per il miglioramento dell'efficienza, che sfruttino al massimo la radiazione solare quando essa è disponibile. Tuttavia, il problema da affrontare non è per nulla semplice, poiché se da un lato la presenza della radiazione solare è indispensabile, dall'altro essa comporta, in modo assolutamente inevitabile, un aumento della temperatura superficiale di esercizio dei pannelli fotovoltaici, che causa a sua volta una diminuzione pressoché lineare del rendimento. Naturalmente questo effetto si evidenzia soprattutto nei momenti in cui la produzione elettrica dovrebbe essere massima, ovvero nelle ore centrali della giornata, le più calde. Questo problema è già stato analizzato da molteplici studi e aziende che pongono rimedio alla questione del riscaldamento attraverso un sistema di raffreddamento che, generalmente, coinvolge la circolazione di un fluido che asporta calore dal pannello. Nel mercato le soluzioni

proposte sono diverse, ma interessano solamente i nuovi modelli; tali soluzioni, infatti, necessitano di una modifica strutturale del pannello effettuabile solo nella fase di realizzazione dello stesso e non sono pertanto adottabili in pannelli già esistenti e installati.

Con queste premesse, il presente studio si pone come obiettivo lo studio, la realizzazione e la verifica sperimentale di un sistema di raffreddamento per installazioni fotovoltaiche già realizzate, che utilizzi acqua come fluido di scambio facendola fluire sulla superficie frontale del pannello. Le prove sperimentali ai fini dello studio sono state realizzate presso il laboratorio di Macchine Idrauliche del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Padova.

Capitolo 1

Il fotovoltaico

1.1 Funzionamento di una cella fotovoltaica

Per comprendere al meglio i motivi per i quali risulta conveniente il raffreddamento di un modulo fotovoltaico è per prima cosa necessario descrivere brevemente il funzionamento di una cella fotovoltaica, con particolare attenzione all'effetto della temperatura su di essa e sul suo rendimento.

Una cella fotovoltaica, in cui avviene la conversione della radiazione solare in una corrente di elettroni, è costituita da una sottile fetta di materiale semiconduttore, generalmente silicio opportunamente trattato. Il silicio che ha 4 elettroni di valenza (tetraivalente) viene “drogato” mediante l’inserimento su una faccia di atomi trivalenti (drogaggio P), per esempio boro, e sull'altra faccia con piccole quantità di atomi pentavalenti (drogaggio N), per esempio fosforo. In questo modo la regione tipo P ha un eccesso di lacune, mentre la regione tipo N ha un eccesso di elettroni (figura 1.1). Nella zona di contatto tra i due strati a diverso drogaggio, giunzione P-N, gli elettroni tendono a diffondersi dalla regione ad alta densità di elettroni (N) alla regione a bassa densità di elettroni (P) creando pertanto un accumulo di carica negativa nella regione P. Un fenomeno duale avviene per le lacune, con un accumulo di carica positiva nella regione N. Si viene così a creare un campo elettrico interno alla giunzione che si oppone all'ulteriore diffusione di cariche elettriche. Se si applica una tensione dall'esterno, la giunzione permette il passaggio di corrente in un solo senso (funzionamento da diodo). Quando la cella è esposta alla luce, per effetto fotovoltaico, vengono a crearsi delle coppie elettrone-lacuna sia nella zona N che nella zona P. Questo effetto fotovoltaico si realizza quando un elettrone presente nella banda di valenza di un materiale (generalmente semiconduttore) passa nella banda di conduzione a causa dell'assorbimento di un fotone sufficientemente energetico incidente sul materiale. Nei materiali semiconduttori infatti, come per i materiali isolanti, gli elettroni di valenza non sono liberi di muoversi, ma nei semiconduttori rispetto agli isolanti è piccola la differenza energetica tra la banda di valenza e quella di conduzione, così che gli elettroni possono facilmente passare nella banda di conduzione qualora ricevano energia sufficiente dall'esterno. Tale energia può essere fornita dalla radiazione luminosa, da cui effetto fotovoltaico. Il campo elettrico interno permette poi di dividere gli elettroni in eccesso, ottenuti dall'assorbimento dei fotoni da parte del materiale, dalle lacune e li spinge in direzioni opposte gli uni rispetto agli altri. Gli elettroni, una volta superata la zona di svuotamento, non possono quindi più tornare indietro perché il campo impedisce loro di invertire “il senso di marcia”. Connettendo la giunzione con un conduttore esterno, si otterrà un circuito chiuso nel quale la corrente

fluisce dallo strato P, a potenziale maggiore, verso lo strato N, a potenziale minore, fintanto che la cella resta illuminata. La zona di silicio che contribuisce a fornire la corrente è quella circostante la giunzione P-N; nelle zone distanti si formano le cariche elettriche, ma manca il campo elettrico che le mette in movimento e di conseguenza si ricombinano.

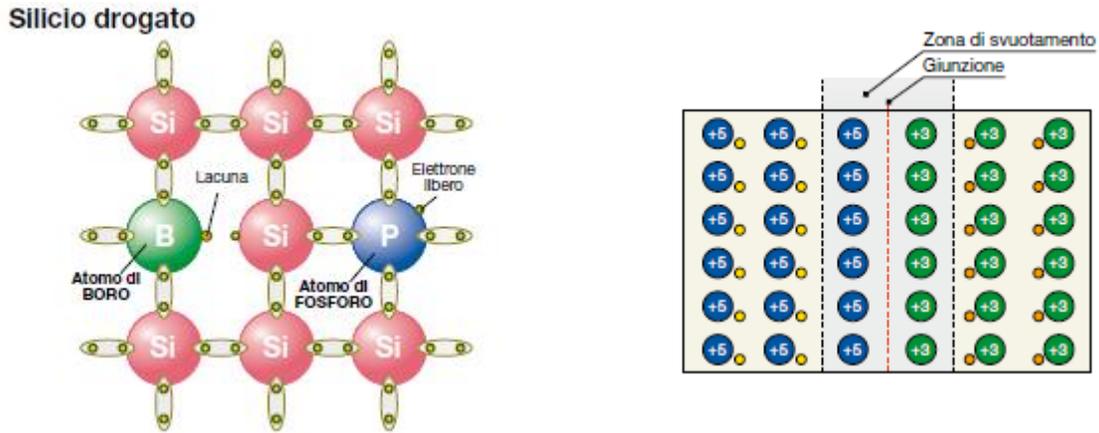


Figura 1.1: struttura del silicio drogato.

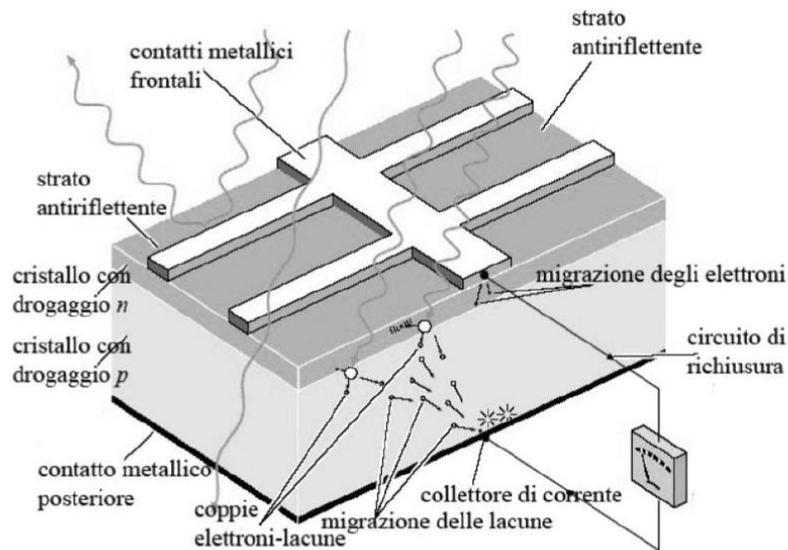


Figura 1.2: schema semplificato di una cella fotovoltaica.

Come descritto sopra, una cella fotovoltaica non illuminata è del tutto assimilabile ad un diodo nel quale la tensione e la corrente sono legate dalla tipica relazione esponenziale valida per la giunzione p-n:

$$I_D = I_0 [\exp(qV/kT) - 1]$$

dove I_D è l'intensità di corrente del diodo, V la tensione elettrica, k è la costante di Boltzmann, q è la carica di un elettrone e T la temperatura assoluta.

Quando la cella solare è illuminata, invece, la caratteristica $I-V$ può essere ottenuta disegnando un circuito equivalente del dispositivo (figura 1.3). La generazione di corrente I_L per effetto della radiazione luminosa è rappresentata da un generatore di corrente in parallelo con un diodo (polarizzato direttamente) che rappresenta la giunzione p-n. La corrente risultante I è quindi uguale alla differenza tra la corrente generata dalla luce I_L e la corrente del diodo I_D :

$$I = I_L - I_D = I - I_0 [\exp(qV/kT) - 1]$$

Nel circuito equivalente di figura 1.3, R_C simboleggia la resistenza di carico, mentre R_S tiene conto della resistenza ohmica nei contatti di metallo e nel materiale semiconduttore e delle perdite elettriche nel collegamento metallo-semiconduttore. Volendo tenere conto di R_S (detta resistenza serie), l'espressione della I diventa:

$$I = I_L - I_D = I - I_0 [\exp(qV + IR_S/kT) - 1]$$

La curva caratteristica $I-V$ e la sua relazione con la caratteristica di un diodo sono date in figura 1.4.

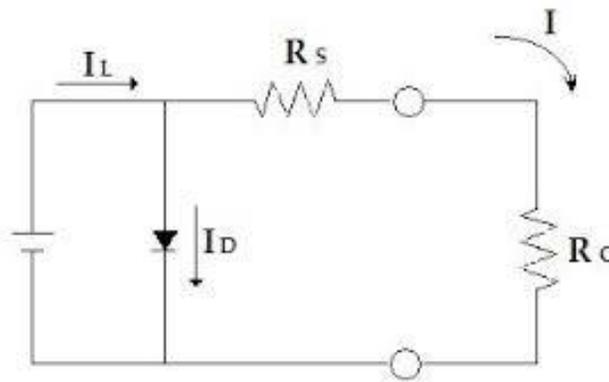


Figura 1.3: circuito equivalente di una cella solare.

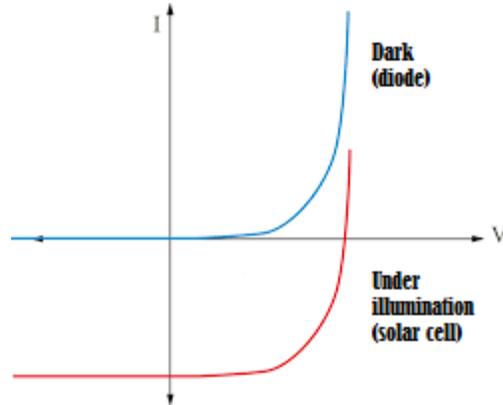


Figura 1.4: curva caratteristica I - V di una cella solare confrontata con quella di un diodo.

Nella figura 1.5 è riportata, per un determinato valore dell'irraggiamento, la caratteristica I - V di una cella fotovoltaica al silicio. La corrente di corto circuito I_{SC} (*short circuit current*) è la massima corrente generata dalla luce; infatti in condizioni di corto circuito il diodo non assorbe corrente e quindi $I_L=I$. A vuoto, invece, si ha la massima tensione V_{OC} (*open circuit voltage*) ai capi della cella, corrispondente a quella tensione per cui la corrente risultante in uscita è nulla.

La condizione di lavoro ottimale della cella è rappresentata dal punto della curva caratteristica di generazione tensione-corrente in corrispondenza del quale il prodotto $I \cdot V$, che esprime la potenza elettrica ottenibile a parità di altre condizioni, risulta massimo ($P_M=V_M \cdot I_M$). Questo punto di massima potenza è un parametro importante per individuare il livello di prestazione della singola cella e varia a seconda del materiale semiconduttore utilizzato e delle caratteristiche del sito.

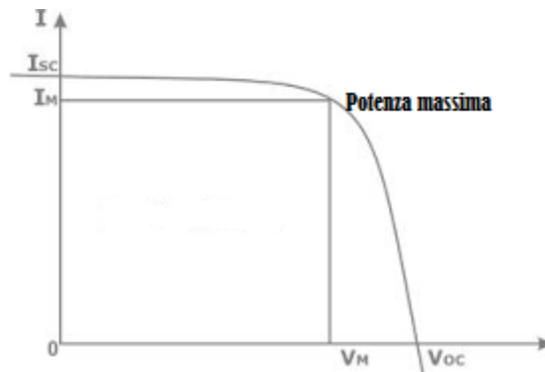


Figura 1.5: curva caratteristica I - V di una cella solare e punto di massima potenza.

Per poter paragonare tra di loro le prestazioni di dispositivi diversi, indipendentemente dalle caratteristiche del sito in cui andranno ad operare, si è convenuto internazionalmente di fissare come condizioni di riferimento, attraverso la norma IEC 61215, una temperatura di giunzione di 25°C , un irraggiamento di $1000\text{W}/\text{m}^2$ ed uno spettro della radiazione solare pari a quello che si ha per $AM1.5$. La potenza nominale del dispositivo P_n , misurata in Watt di picco (Wp), non è altro che il valore della

potenza massima P_M misurata nelle condizioni standard di riferimento. Per esempio, per una comune cella al silicio, il punto di massima potenza nelle condizioni standard di riferimento corrisponde ad una differenza di potenziale di 0.5V.

Anche il rapporto tra la potenza massima $P_M = V_M \cdot I_M$ e il prodotto $V_{OC} \cdot I_{SC}$, detto fattore di riempimento della cella FF (da *fill-factor*), è un ulteriore termine di giudizio sul rendimento della cella. Questo mette in relazione la massima potenza effettivamente estraibile con la massima potenza ideale. Per esempio per una comune cella al silicio cristallino il FF in condizioni standard di riferimento si aggira attorno al 0.80.

1.2 Rendimento di conversione di una cella solare

Si definisce rendimento di conversione il rapporto tra la massima potenza elettrica generata dalla cella e quella della radiazione solare incidente sulla cella stessa:

$$\eta = P_M / P_i = V_M I_M / GA$$

La radiazione solare incidente P_i è pari al prodotto dell'irradianza solare G , misurata in W/m^2 , per l'area A della cella in m^2 . Tuttavia, poiché l'irradianza solare G dipende dalle condizioni al contorno, si definisce l'efficienza nominale della cella, misurata in condizioni standard di riferimento (STC), come:

$$\eta = P_{STC} / (G_{STC} A)$$

dove P_{STC} è la massima potenza in Wp producibile dalla cella in condizioni standard ed è quindi la potenza nominale, G_{STC} indica l'irraggiamento in condizioni standard (espresso in W/m^2) e A rappresenta l'area della cella in m^2 . Per quanto riguarda le applicazioni terrestri, le condizioni standard di riferimento (STC) sono quelle riportate nella già citata norma IEC 61215: irraggiamento pari a $1000W/m^2$, temperatura di $25^\circ C$ e irradiazione con spettro monocromatico definito dalla norma IEC 60904-3 (AM1.5), come in figura 1.6.

Ovviamente anche la scelta del materiale utilizzato (e quindi dell'entità dell'ampiezza della banda proibita E_g) si riflette sul rendimento. Per esempio, nel caso dei semiconduttori, avere E_g elevata significa avere un minor numero di fotoni dello spettro solare con $E > E_g$ e, di conseguenza, una diminuzione della corrente di cortocircuito I_{SC} ; allo stesso tempo, però, al diminuire di E_g diminuisce anche il valore della tensione a vuoto V_{OC} , pari a circa la metà dell'ampiezza della banda proibita. La figura 1.7 mostra l'efficienza ideale di celle fotovoltaiche a giunzioni p-n. L'efficienza ideale è ottenuta supponendo nulle tutte le perdite dipendenti da fattori tecnologici (riflessione, ombreggiatura, ecc) e considerando solo le limitazioni dovute a fattori fisici del processo fotovoltaico. Il valore massimo di questo parametro si riscontra per un'ampiezza della banda proibita compresa tra 1.4 e 1.8 eV e quindi

materiali come l'arseniuro di gallio (GaAs) e il telluro di cadmio (CdTe) sono potenzialmente più promettenti del silicio, ma non vengono comunemente utilizzati perché molto più costosi. Le linee corrispondenti ai vari semiconduttori sono inclinate rispetto alla verticale in quanto E_g varia con la temperatura.

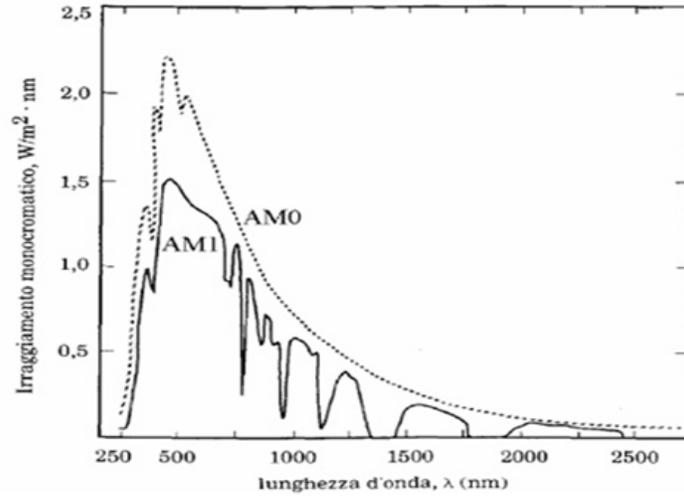


Figura 1.6: irradiazione monocromatica di riferimento per applicazioni terrestri (AM1.5) e applicazioni in orbita terrestre bassa (AM0).

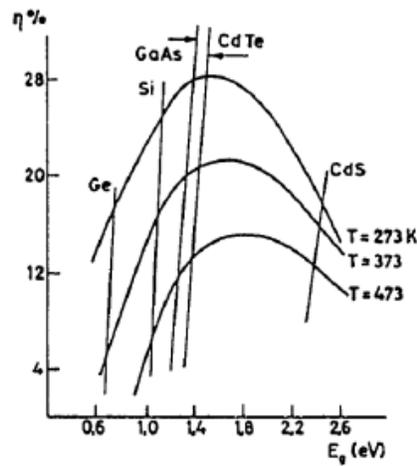


Figura 1.7: rendimento limite di conversione in funzione della banda proibita E_g , per diversi valori della temperatura assoluta.

1.3 Effetti dell'irraggiamento sulle prestazioni

La curva caratteristica $I-V$ di una specifica cella fotovoltaica posta in un particolare contesto dipende, sostanzialmente, da tre variabili fondamentali:

- intensità della radiazione incidente su di essa;
- temperatura alla giunzione;
- area della cella.

Variando le condizioni di irraggiamento solare e mantenendo costanti le altre condizioni di funzionamento, la curva caratteristica di una cella fotovoltaica di silicio cristallino si modifica come in figura 1.8. Si può notare che mentre la corrente I_{SC} (e quindi anche la I_M) è molto sensibile alla radiazione solare essendo proporzionale al numero di fotoni al secondo che incidono sulla superficie della cella, l'unico modo per evitare la presenza di tensione ai morsetti di un generatore fotovoltaico consiste nell'oscurarne totalmente la superficie captante, in quanto V_{OC} (e quindi V_M) presenta valori vicini a quello massimo anche a bassissimi valori di radiazione solare.

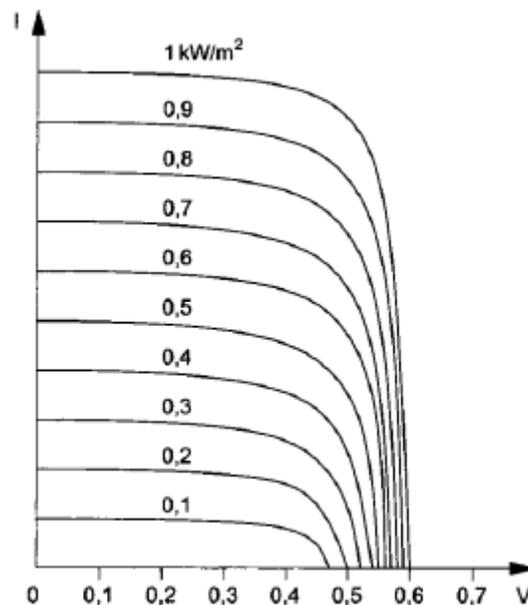


Figura 1.8: variazione della curva caratteristica in funzione della radiazione incidente.

1.4 Effetti della temperatura sulle prestazioni

L'efficienza di conversione dipende anche dalla temperatura della cella T_C . L'effetto principale della temperatura sui moduli fotovoltaici deriva dalla dipendenza da essa della tensione di circuito aperto:

$$V_{OC}(T_C) = V_{OC}(T_{STC}) + [(dV_{OC}/dT)(T_C - T_{STC})]$$

Il parametro T_{STC} corrisponde alla temperatura della cella nelle condizioni standard di riferimento (STC), ovvero nelle condizioni riportate nel paragrafo 1.2.

La figura 1.9 illustra il comportamento della cella al variare dello stato termico. In una cella di 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 $0.07\%/^\circ\text{C}$. Questi due fenomeni, anche se di segno opposto, si traducono in una diminuzione dell'area sottostante la curva caratteristica intorno al $6\div 7\%$ per ogni aumento di 10 gradi della temperatura delle celle. Ciò comporta una diminuzione del rendimento di conversione η dello 0.4% per ogni grado di aumento della T_C . Per esempio se la cella si trova alla temperatura di 35°C si ha una perdita del rendimento di conversione pari al 4% .

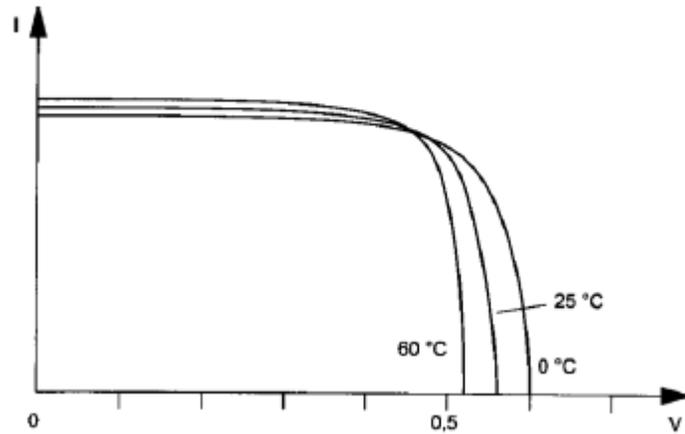


Figura 1.9: variazione della curva caratteristica in funzione della temperatura (stessa irradiazione).

L'andamento del rendimento è dunque principalmente funzione della temperatura, ma come detto in precedenza risente in misura minore anche da altri parametri, come l'intensità di radiazione G [W/m^2] e la sua distribuzione spettrale. Un'espressione che tiene conto dell'andamento del rendimento in funzione di queste grandezze è la seguente:

$$\eta = \eta_{ref} [1 - \beta(T_C - T_{ref}) + \gamma \log_{10} G]$$

Il coefficiente β è detto coefficiente di temperatura della cella. Esso dipende dal materiale con valori di circa 0.004K^{-1} ed è solitamente fornito dal produttore. Il coefficiente γ è detto invece coefficiente di radiazione solare, anch'esso è specifico del materiale e si attesta su valori di circa 0.12 . Quest'ultimo termine tuttavia è poco rilevante e quasi sempre trascurato, pertanto semplificando l'espressione del rendimento si ottiene:

$$\eta = \eta_{ref} [1 - \beta(T_C - T_{ref})]$$

Questa espressione rappresenta il tipico andamento lineare per l'efficienza elettrica delle celle fotovoltaiche. Il coefficiente β può essere assunto generalmente con buona approssimazione pari a $-0.4\%/^{\circ}\text{C}$ in tutto il campo di temperatura. Si riportano in tabella alcuni valori del coefficiente di temperatura tratti da letteratura in merito.

Tabella 1.1: coefficiente di temperatura β per diverse tipologie di cella.

β [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]	Note	Riferimento
0.0041	Mono-Si	Evans and Florschuetz (1977)
0.0038	Average of Sandia cells	OTA (1978)
(0.0032-0.0046)	Commercial cells	OTA (1978)
0.003	Mono-Si	Truncellito and Sattolo (1979)
0.0041	PV/T System	Mertens (1979)
0.004	PV/T System	Hegazy (2000)
0.0026	a-Si	RETScreen (2001)
0.004	Poly-Si	RETScreen (2001)
0.0045	Mono-Si	Chow (2003)

La già citata precedentemente norma IEC 61215 fornisce inoltre, oltre alle condizioni standard di riferimento, la definizione della NOTC (*Normal Operating Temperature Cell*), un parametro riportato in tutti i datasheet forniti dai costruttori. La NOCT è definita come la temperatura di circuito aperto del modulo fotovoltaico sottoposto ad un irraggiamento pari a $800\text{W}/\text{m}^2$, temperatura ambiente di 20°C ed una velocità del vento di $1\text{m}/\text{s}$. Generalmente si può infatti affermare che le condizioni standard di riferimento indicate per i moduli fotovoltaici non rappresentino le condizioni di esercizio sul campo. La temperatura operativa dei moduli può infatti aumentare anche di 30°C rispetto alla temperatura fornita dalla norma (25°C). La NOTC dà quindi una stima migliore della temperatura di esercizio del modulo, anche se, in ogni caso, le condizioni per la velocità del vento e altri parametri ambientali assunti per la NOTC non sono sempre riscontrate sul campo, soggetto ovviamente alla variabilità delle condizioni atmosferiche. La temperatura del modulo può infatti variare tra il più basso valore della temperatura ambiente, all'alba, fino a 30°C in più del valore di temperatura più alto riscontrato nel pomeriggio dei giorni sereni. Questo può comportare una perdita di energia prodotta stimabile nel 25% rispetto ad un modulo mantenuto nelle STC.

1.5 Perdite energetiche

Se si utilizza come semiconduttore il silicio, per liberare una coppia elettrone-lacuna è necessaria un'energia corrispondente ad una lunghezza d'onda massima per la radiazione luminosa di $1,15\ \mu\text{m}$.

La frazione eccedente questo limite (collocata dunque nella banda dell'infrarosso), avente cioè lunghezza d'onda maggiore e quindi energia insufficiente, corrisponde a circa il 25% dell'energia complessivamente contenuta nello spettro solare, viene ovviamente persa. Il rimanente 75% risulta invece in grado di liberare coppie elettrone-lacuna.

Tuttavia, anche i fotoni con troppa energia vengono utilizzati solo parzialmente: in questo caso essi vengono assorbiti, ma la frazione di energia in eccesso rispetto al valore di soglia necessario per l'assorbimento viene convertita in calore e va quindi perduta dal punto di vista elettrico. Questi fotoni corrispondono alla porzione di radiazione solare caratterizzata da lunghezze d'onda inferiori a $0,4 \mu\text{m}$ e collocata, quindi, nella banda dell'ultravioletto. Ne segue che, con semiconduttori in silicio, la percentuale di energia solare che è teoricamente possibile convertire in energia elettrica non supera il 44% circa.

Il rendimento delle celle fotovoltaiche in silicio, anche nelle prove in laboratorio, è tuttavia molto distante da questo valore. Come si vede dalla figura 1.10, intervengono infatti ulteriori inefficienze di carattere tecnologico.

Alcuni fotoni vengono riflessi dalla superficie della cella, altri vengono intercettati dall'elettrodo frontale che deve mediare tra l'esigenza di realizzare un buon contatto e quella di oscurare il meno possibile la superficie della cella esposta alla luce. Il problema della riflessione, che per il silicio interessa il 30-40% dei fotoni, può essere però fortemente limitato dall'utilizzo di film antiriflettenti di SiO_2 o TiO_2 che vengono depositati direttamente sulla superficie. Inoltre la dispersione per riflessione può essere ridotta ulteriormente corrugando la superficie della cella con asperità a forma di tetraedri delle dimensioni da 1 a $5 \mu\text{m}$.

Alcune coppie elettrone-lacuna si ricombinano prima di venir separate dal campo elettrico interno alla giunzione. Queste perdite dipendono principalmente dal grado di purezza del silicio utilizzato. È infatti chiaro che coppie create distanti dalla giunzione in una cella in cui i materiali sono di scarsa qualità hanno una maggiore probabilità di ricombinarsi, piuttosto che di diffondere fino alla giunzione, venir separate dal campo elettrico esistente e rendere, quindi, disponibile ai morsetti una differenza di potenziale che fa circolare la corrente nel circuito esterno.

Infine, parte dell'energia potenziale delle coppie elettrone-lacuna che vengono separate risulta inefficace ai fini della conversione in elettricità e viene persa. Si definisce "efficienza di raccolta delle cariche" il rapporto fra il numero di cariche separate dalla giunzione e il numero di fotoni che colpiscono la cella.

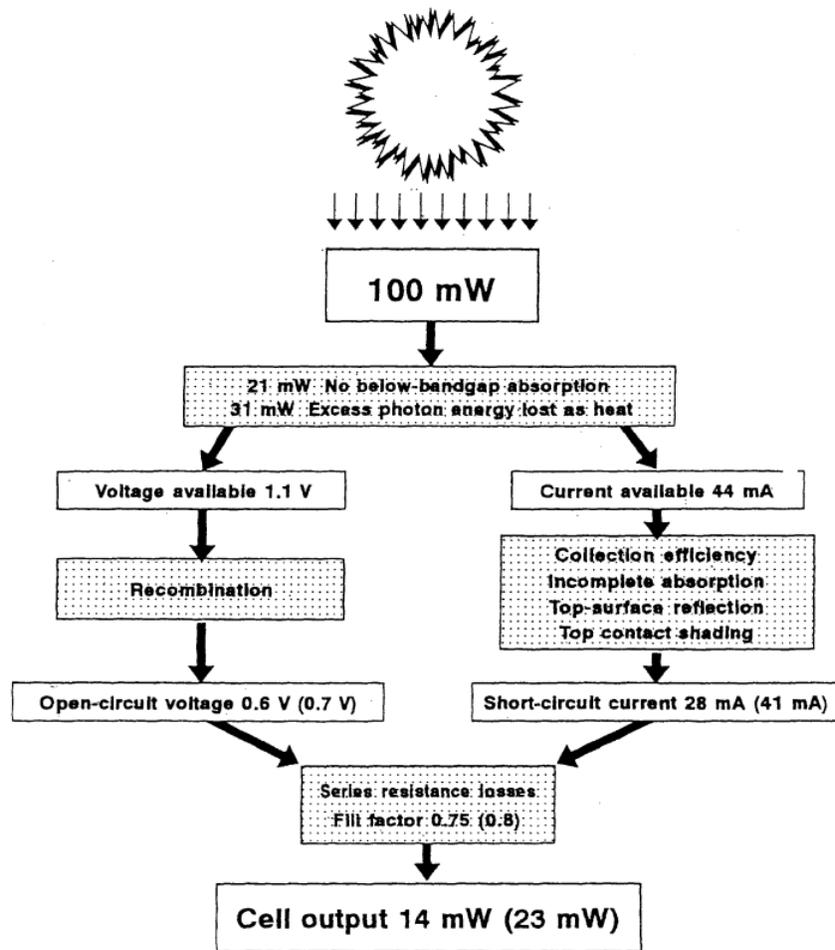


Figura 1.10: perdite di potenza in celle solari al silicio. I valori sono dati per centimetro quadrato di cella già disponibile sul mercato e, tra parentesi, di cella di laboratorio.

Ovviamente per poter raccogliere il maggior numero di cariche generate, la giunzione deve essere posizionata in maniera accurata. Infatti materiali diversi presentano differenti proprietà di assorbimento della luce. Alcuni semiconduttori sono buoni assorbitori di luce e possono assorbire tutta la radiazione con energia superiore all'*energy gap* in uno strato di pochi micron di spessore. Questi conduttori sono detti a gap diretto (ad esempio GaAs). In altri semiconduttori, detti a gap indiretto, come il silicio, il processo di assorbimento è invece più complicato. Si definisce coefficiente di assorbimento di un materiale il valore:

$$\text{coeff. d'assorbimento} = 1 - \exp(-\alpha s)$$

dove s è lo spessore del materiale e α è la costante di assorbimento del materiale in funzione della lunghezza d'onda e si misura in cm^{-1} . Poiché il coefficiente d'assorbimento indica quanta radiazione solare viene assorbita rispetto a quella incidente, si vuole che questo coefficiente sia il più possibile uguale a 1 e quindi un buon materiale semiconduttore deve avere o un'elevata costante d'assorbimento α oppure un elevato spessore s .

Come si vede nella figura 1.11 il silicio presenta una grande variabilità della costante di assorbimento α : nel campo delle lunghezze d'onda dello spettro solare, le cariche sono generate estremamente vicino alla superficie della cella nella regione dell'ultravioletto, mentre risultano a una maggiore profondità nella regione dell'infrarosso. La soluzione di compromesso prevede una giunzione posta molto vicino alla superficie della cella e un materiale sottostante molto puro per poter avere elevati valori della lunghezza di diffusione del materiale e dunque la possibilità di usufruire contemporaneamente anche delle cariche generate nella regione dove la lunghezza d'onda è elevata.

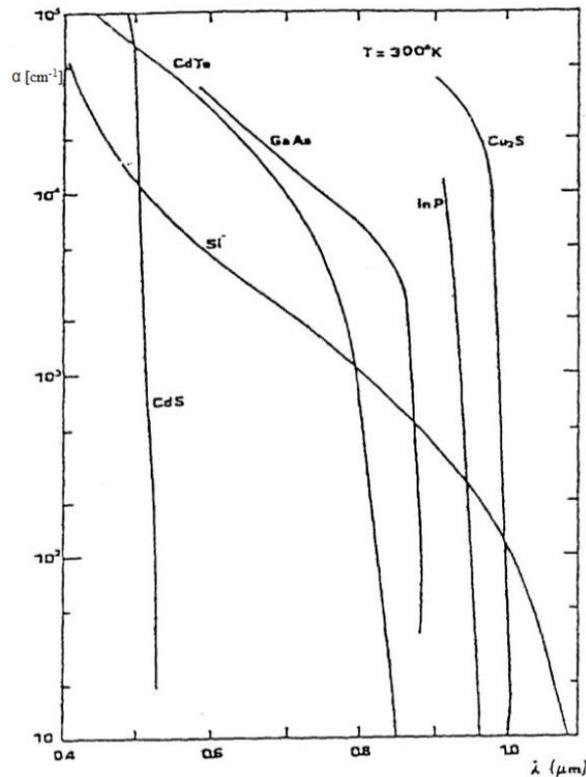


Figura 1.11: costante d'assorbimento per vari materiali semiconduttori.

1.6 Riflessione della radiazione solare

Quando la radiazione solare colpisce il lato superiore di un modulo fotovoltaico viene parzialmente riflessa, in percentuale variabile a seconda delle condizioni. Le perdite per riflessione per un modulo che viene colpito perpendicolarmente dalla radiazione solare si possono stimare intorno al 4÷5%. Tuttavia, poiché per la maggior parte del tempo in un impianto fotovoltaico l'angolo tra la normale alla superficie e la direzione della radiazione è diverso da zero, si ha un incremento di tali perdite rispetto alle condizioni ottimali. La perdita totale di energia in un giorno, per un fissato angolo di inclinazione del modulo, dipende dalla latitudine, dall'indice di trasparenza (rapporto tra la componente diffusa

della radiazione e la componente diretta della radiazione), dal trattamento della superficie e dall'accoppiamento degli indici di rifrazione tra gli strati componenti il modulo. Indicativamente si può affermare che la totale perdita per riflessione accumulata durante il giorno è compresa tra l'8% e il 15% per i sistemi fotovoltaici tradizionali e può assumere valori maggiori per sistemi installati a facciata.

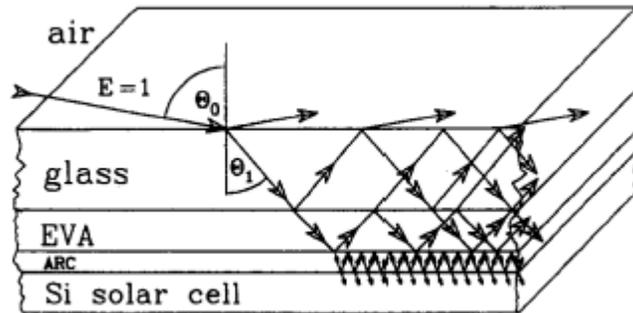


Figura 1.12: percorso della radiazione solare in una cella fotovoltaica costituita da materiali usuali.

1.7 Impianti fotovoltaici

Un impianto fotovoltaico trasforma direttamente ed istantaneamente l'energia solare in energia elettrica senza l'utilizzo di alcun combustibile. I principali vantaggi degli impianti fotovoltaici possono riassumersi in:

- generazione distribuita nei luoghi dove serve;
- assenza di emissioni di sostanze inquinanti;
- risparmio di combustibili fossili;
- affidabilità degli impianti poiché non vi sono parti in movimento (vita utile di norma superiore ai 20 anni);
- ridotti costi di esercizio e manutenzione;
- modularità del sistema (per incrementare la potenza dell'impianto è sufficiente aumentare il numero di pannelli) secondo le reali esigenze dell'utente.

Tuttavia, il costo iniziale per la realizzazione di un impianto fotovoltaico è ancora piuttosto elevato e la produzione di energia è discontinua a causa della variabilità della fonte energetica solare. La produzione elettrica annua di un impianto dipende infatti da diversi fattori, tra cui:

- radiazione solare incidente sul sito di installazione;
- inclinazione ed orientamento dei pannelli;
- presenza o meno di ombreggiamenti;
- prestazioni tecniche dei componenti dell'impianto (principalmente moduli ed inverter).

Le principali applicazioni degli impianti fotovoltaici sono:

1. impianti (con sistemi di accumulo) per utenze isolate dalla rete (*stand alone*);
2. impianti per utenze collegate alla rete di bassa tensione (*grid connected*);
3. centrali di produzione di energia elettrica fotovoltaico, generalmente collegate alla rete in media tensione.

1.7.1 Principali componenti di un impianto fotovoltaico

Un impianto fotovoltaico è essenzialmente costituito da un generatore (pannelli fotovoltaici), da una struttura di sostegno per installare i pannelli sul terreno, su un edificio o una qualsiasi struttura edilizia, da un sistema di controllo e condizionamento della potenza (inverter), da un eventuale accumulatore di energia, da quadri elettrici contenenti le apparecchiature di manovra-protezione e dai cavi di collegamento.

Il componente elementare del generatore è ovviamente la cella fotovoltaica in cui avviene la conversione dell'energia solare in corrente elettrica. In commercio si trovano però i moduli fotovoltaici che sono costituiti da un insieme di celle. Le celle che costituiscono il modulo sono incapsulate con un sistema di assemblaggio (solitamente si utilizza come materiale incapsulante l'EVA) che:

- evita il contatto diretto vetro-cella;
- elimina gli interstizi dovuti alle imperfezioni superficiali delle celle;
- isola elettricamente le celle verso l'esterno;
- protegge le celle dagli agenti atmosferici e dalle sollecitazioni meccaniche;
- resiste ai raggi ultravioletti, alle basse temperature, agli sbalzi di temperatura e all'abrasione;
- smaltisce facilmente il calore, per evitare che l'aumento di temperatura riduca la potenza fornita dal modulo.

Queste proprietà devono permanere per tutta la vita attesa dal modulo. Sopra alle celle viene poi posto un vetro o un altro materiale ad alta trasmissione e minore riflessione possibile, mentre il retro del modulo deve avere bassa resistenza termica ed essere impermeabile ad umidità e polvere. I moduli più diffusi racchiudono solitamente 36 celle disposte su 4 file parallele collegate in serie con una superficie che varia da 0.5 a 1m.

Più moduli collegati tra loro meccanicamente ed elettricamente formano un pannello, ossia una struttura comune ancorabile al suolo o ad un edificio. Più pannelli collegati elettricamente in serie costituiscono una stringa e più stringhe, collegate elettricamente in parallelo per fornire la potenza richiesta, costituiscono il generatore o campo fotovoltaico (figura 1.13).

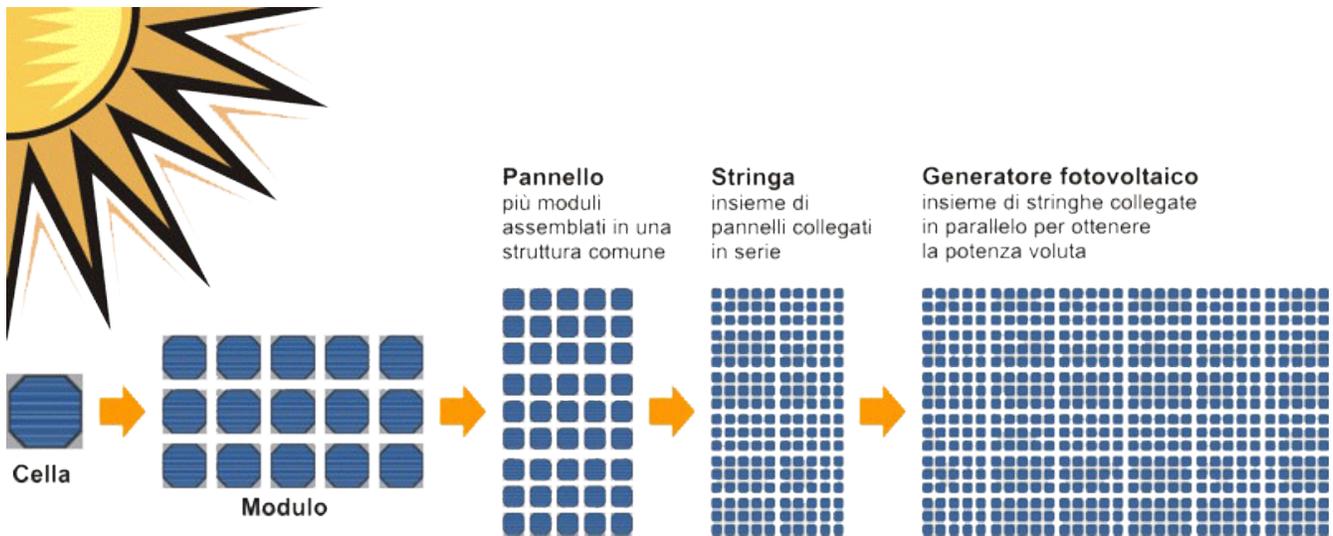


Figura 1.13: generatore fotovoltaico.

Il sistema di condizionamento e controllo della potenza è costituito da un inverter che trasforma la corrente continua in alternata controllando la qualità della potenza in uscita per l'immissione in rete anche attraverso un filtro L-C interno all'inverter stesso. La potenza fornita da un generatore fotovoltaico dipende dal punto in cui esso si trova ad operare. Per ottimizzare l'energia prodotta dall'impianto si deve adeguare il generatore al carico, in modo che il punto di funzionamento corrisponda sempre a quello di massima potenza. A tal fine viene utilizzato nell'inverter un chopper controllato denominato inseguitore del punto di massima potenza (MPPT: *Maximum Power Point Tracking*) che individua istante per istante la coppia di valori tensione-corrente del generatore per la quale la potenza fornita è massima. Partendo dalla curva I-V del generatore fotovoltaico, il punto di massimo trasferimento di potenza corrisponde al punto di tangenza tra la caratteristica I-V per un dato valore di radiazione solare e l'iperbole di equazione $I \cdot V = \text{cost}$ (figura 1.14). I dispositivi MPPT commercialmente utilizzati individuano il punto di massima potenza sulla curva caratteristica del generatore provocando ad intervalli regolari delle piccole variazioni di carico che determinano scostamenti dei valori di tensione e di corrente, valutando se il nuovo prodotto I-V è maggiore o minore del precedente. Se si presenta un aumento si continuano a variare le condizioni di carico nella direzione considerata. Nel caso contrario si modificano le condizioni nel verso opposto. Secondo una normativa europea il rendimento dell'inverter si determina come media pesata dei rendimenti a carico parziale, attribuendo un coefficiente ad ogni carico.

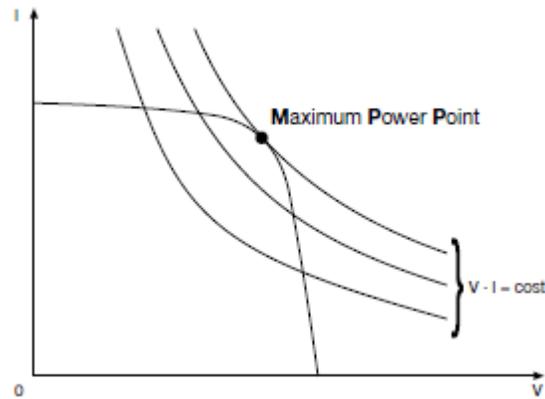


Figura 1.13: punto di massima potenza per un generatore fotovoltaico.

Per effetto delle caratteristiche delle performance richieste, gli inverter per impianti in isola e per impianti collegati alla rete di distribuzione devono avere caratteristiche diverse. Negli impianti funzionanti in isola, gli inverter devono essere in grado di fornire una tensione lato c.a. il più possibile costante al variare della produzione del generatore e della richiesta del carico. Negli impianti connessi alla rete, gli inverter devono riprodurre, il più fedelmente possibile, la tensione di rete, cercando al contempo di ottimizzare e massimizzare la produzione energetica dei pannelli fotovoltaici.

1.7.2 Tipologia di pannelli fotovoltaici

I pannelli fotovoltaici attualmente più utilizzati negli impianti fotovoltaici sono quelli in silicio cristallino. Essi si suddividono in due categorie:

1. pannelli in silicio monocristallino;
2. pannelli in silicio policristallino.

I pannelli fotovoltaici in silicio monocristallino sono prodotti da cristallo di silicio di elevata purezza. Il lingotto di silicio monocristallino è di forma cilindrica del diametro di $13\div 20$ cm e 200cm di lunghezza, ottenuto per accrescimento di un cristallo filiforme in lenta rotazione. Successivamente, tale cilindro viene opportunamente suddiviso in wafer dello spessore di $200-250\mu\text{m}$ e la superficie superiore viene trattata producendo dei microsolchi aventi lo scopo di minimizzare la perdite per riflessione. Il vantaggio principale di queste celle è il rendimento ($14\div 17\%$), cui si associa una durata elevata ed il mantenimento delle caratteristiche nel tempo. Alcuni costruttori garantiscono infatti il pannello per 20 anni con una perdita di efficienza massima del 10% rispetto al valore nominale. Essi sono caratterizzati usualmente da un'omogenea colorazione blu scuro, dovuto al rivestimento antiriflettente di ossido di titanio.

Nei pannelli fotovoltaici in silicio policristallino, invece, i cristalli che compongono le celle si aggregano tra loro con forma ed orientamenti diversi. Le iridescenze tipiche delle celle in silicio policristallino sono infatti dovute al diverso orientamento dei cristalli ed il conseguente diverso

comportamento nei confronti della luce. Il lingotto di silicio policristallino è ottenuto mediante un processo di fusione e colato in un contenitore a forma di parallelepipedo. I wafer che si ottengono presentano forma quadrata e caratteristiche striature. Il rendimento è inferiore al monocristallino (12÷14%), ma anche il prezzo. La durata è comunque elevata (paragonabile al monocristallino) ed anche il mantenimento della prestazioni nel tempo (85% del rendimento iniziale dopo 20 anni). Le celle con tale tecnologia sono riconoscibili dall'aspetto superficiale in cui si intravedono i grani cristallini.

Il mercato è oggi dominato dalla tecnologia al silicio cristallino, che rappresenta circa il 90% del mercato. Tale tecnologia è infatti matura sia in termini di rendimento ottenibile che di costi di produzione e si ritiene che continuerà a dominare il mercato nel breve-medio periodo. Sono solamente previsti miglioramenti contenuti in termini di efficienza ed una possibile riduzione dei costi legata all'introduzione nei processi industriali di wafer più grandi e sottili e all'economia di scala.



Figura 1.14: a sinistra un pannello in silicio monocristallino, al centro uno in silicio policristallino e a destra un modulo a film sottile.

Nonostante i pannelli fotovoltaici in silicio cristallino siano i più diffusi, esistono anche i pannelli in film sottile. Le celle a film sottile sono composte da materiale semiconduttore depositato, generalmente come miscela di gas, su supporti come vetro, polimeri, alluminio che danno consistenza fisica alla miscela. Lo strato del film semiconduttore è di pochi micron, rispetto alla celle a silicio cristallino che hanno uno spessore di centinaia di micron. Pertanto il risparmio di materiale è notevole e la possibilità di avere un supporto flessibile amplifica il campo di applicazione delle celle a film sottile. Il materiale più utilizzato è il silicio amorfo. Questo depositato in film su un supporto (per esempio alluminio) rappresenta l'opportunità di avere il fotovoltaico a costi ridotti rispetto al silicio cristallino, ma le celle hanno rese che tendono decisamente a peggiorare nel tempo. Il silicio amorfo può anche essere "spruzzato" su un sottile foglio in materiale plastico o flessibile. È utilizzato soprattutto quando serve

ridurre al massimo il peso del pannello ed adattarsi alle superfici curve. La resa (5÷6%) è molto bassa a causa delle molteplici resistenze che gli elettroni devono superare nel loro flusso. Anche in tal caso le celle tendono a peggiorare le proprie prestazioni nel tempo.

1.7.3 Ombreggiamento dei moduli

Considerata l'area occupata dai moduli di un impianto fotovoltaico, può accadere che una parte di essi (una o più celle) venga ombreggiata da alberi, foglie che si depositano, camini, nuvole o da pannelli fotovoltaici installati nelle vicinanze. In caso di ombreggiamento, una cella fotovoltaica costituita da una giunzione P-N smette di produrre energia e diventa un carico passivo. Tale cella si comporta come un diodo che blocca la corrente prodotta dalle altre celle collegate in serie con la conseguente compromissione di tutta la produzione del modulo. Inoltre il diodo è soggetto alla tensione delle altre celle che può provocare la perforazione della giunzione con surriscaldamento localizzato (fenomeno dell'*hot spot*) e danni al modulo. Per evitare che una o più celle ombreggiate vanifichino la produzione in un'intera stringa, a livello dei moduli vengono inseriti dei diodi di by-pass che cortocircuitano la parte di modulo in ombra o danneggiata. Così facendo si garantisce il funzionamento del modulo pur con un'efficienza ridotta. Teoricamente occorrerebbe inserire un diodo di by-pass in parallelo ad ogni singola cella, ma ciò sarebbe troppo oneroso nel rapporto costi/benefici. Pertanto solitamente vengono installati 2÷4 diodi di bypass per modulo. Dalla figura 1.15 si può osservare come mettendo un diodo di bypass per ogni singola cella del modulo si riuscirebbe a mantenere la curva caratteristica I-V del modulo circa costante anche in presenza di ombreggiamento.

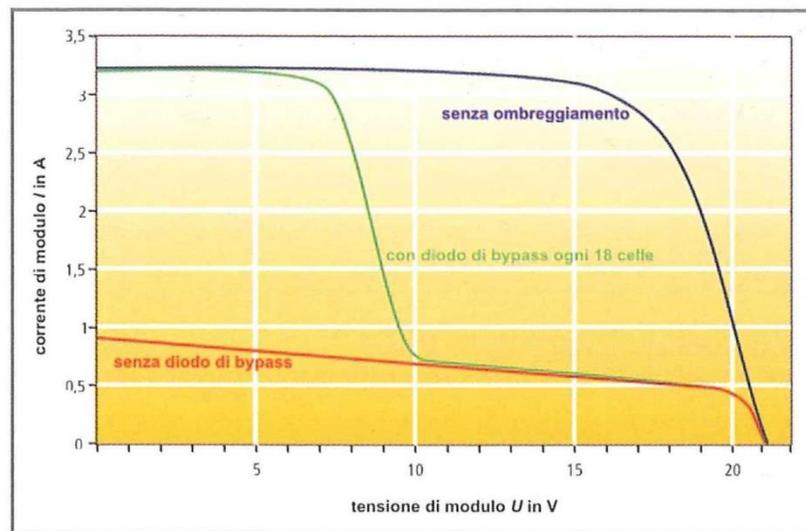


Figura 1.15: curva caratteristica I-V di un modulo fotovoltaico con diodo di bypass e senza.

1.7.4 Tipologia di impianti fotovoltaici

Gli impianti fotovoltaici si possono classificare principalmente in 2 categorie:

1. impianti isolati (*stand alone*);
2. impianti collegati alla rete (*grid-connected*).

Gli impianti isolati sono impianti non collegati alla rete elettrica e sono costituiti da pannelli fotovoltaici e da un sistema di accumulo che garantisce l'erogazione di energia elettrica anche nei momenti di scarsa illuminazione o nelle ore di buio. Essendo la corrente erogata dal generatore fotovoltaico di tipo continuo, se l'impianto utilizzatore necessita di corrente alternata è necessaria l'interposizione dell'inverter. Tali impianti risultano tecnicamente ed economicamente vantaggiosi qualora la rete elettrica sia assente o difficilmente raggiungibile, sostituendo spesso i gruppi elettrogeni. Inoltre, in una configurazione stand-alone, il campo fotovoltaico è sovra-dimensionato al fine di consentire, durante le ore di insolazione, sia l'alimentazione del carico, sia la ricarica delle batterie di accumulo, con un certo margine di sicurezza per tener conto delle giornate di scarsa insolazione. Attualmente le applicazioni più diffuse servono ad alimentare:

- apparecchiature per il pompaggio dell'acqua;
- ripetitori radio, stazioni di rilevamento e trasmissioni dati;
- sistemi di illuminazione;
- segnaletica sulle strade, nei porti e negli aeroporti;
- alimentazione dei servizi nei camper;
- impianti pubblicitari;
- rifugi ad alta quota.

I principali componenti di un impianto isolato sono quindi: il generatore fotovoltaico, il regolatore di carica, che protegge gli accumulatori dai fenomeni di scarica profonda e dai fenomeni di sovraccarico, un inverter, solamente se l'utenza è in corrente alternata, e la batteria di accumulo. Quest'ultima, collegata in parallelo all'utenza, permette di regolare la tensione di lavoro del modulo. In questo modo non si lavora più a carico costante, ma si lavora a tensione costante imposta dalla batteria. Inoltre, per prevenire l'eccessiva scarica della batteria, si fissa un valore di sicurezza per la profondità di scarica (PD_{max}). La capacità dell'accumulatore è quindi inferiore a quella nominale.

Gli impianti collegati permanentemente alla rete elettrica assorbono energia da essa nelle ore in cui il generatore fotovoltaico non è in grado di produrre l'energia necessaria a soddisfare il bisogno dell'impianto utilizzatore. Viceversa, se il sistema fotovoltaico produce energia elettrica in eccesso rispetto al fabbisogno dell'impianto utilizzatore, il surplus viene immesso in rete: sistemi connessi alla rete non necessitano pertanto di batterie di accumulatori. Tali impianti offrono il vantaggio della generazione distribuita, anziché centralizzata, difatti l'energia prodotta nei pressi dell'utilizzazione ha

un valore maggiore di quella fornita dalle grosse centrali tradizionali, perché si limitano le perdite di trasmissione e si riducono gli oneri economici dei grossi sistemi elettrici di trasporto e dispacciamento. Inoltre la produzione di energia nelle ore di sole consente di ridurre la domanda alla rete durante il giorno, proprio quando si verifica la maggiore richiesta.

I principali componenti di un impianto fotovoltaico connesso alla rete sono: il generatore fotovoltaico, un inverter e un contatore dell'energia prodotta e un contatore bidirezionale o altri due diversi contatori. Il contatore bidirezionale misura quanta energia viene assorbita dalla rete e quanta energia viene invece immessa nella rete.

Capitolo 2

Raffreddamento di pannelli fotovoltaici

In questo capitolo sono spiegati i motivi per i quali risulta conveniente raffreddare un pannello fotovoltaico e si descrivono i principali studi ed esperienze, presenti in letteratura, che analizzano le possibilità di raffreddamento di moduli fotovoltaici.

2.1 Convenienza del raffreddamento

L'effetto benefico di una minore temperatura di esercizio consiste in un aumento del rendimento elettrico delle celle fotovoltaiche. Come si è in precedenza descritto, infatti, la prestazione dei generatori fotovoltaici decade pressoché linearmente con l'aumento della temperatura di cella. Ciò comporta che nei momenti in cui ci sarebbe la maggiore disponibilità di energia radiante dal Sole (spesso nelle ore centrali delle calde giornate estive) la conversione elettrica dell'energia avviene con minore efficienza, portando ad una perdita in termini energetici, economici ed in ultima analisi anche ambientali, per la mancata potenziale produzione da energia rinnovabile.

Le tecnologie possibili per il raffreddamento di pannelli fotovoltaici sono molteplici e il mondo industriale propone già pannelli fotovoltaici retro-raffreddati con serpentine d'acqua o fluidi frigoriferi, da associare dove possibile, ad una pompa di calore. Tuttavia quest'ambito, come precisato nell'introduzione, esula dal presente studio in quanto si è voluto approfondire la problematica sui pannelli nei quali non è possibile effettuare modifiche strutturali.

Le soluzioni proposte per raffreddare un pannello senza apportare modifiche strutturali, prevedono invece l'utilizzo di acqua direttamente sulla superficie del pannello, sotto forma di film o spray.

L'azione di un sistema di raffreddamento incrementa infatti la produzione di energia e migliora di conseguenza le prestazioni complessive dell'impianto fotovoltaico, grazie all'aumento del rendimento elettrico dei moduli e, per alcune configurazioni di impianto, alle migliorate caratteristiche ottiche dei pannelli.

2.2 Esperienze documentate

In letteratura esistono molteplici studi che analizzano le possibilità di raffreddamento di moduli fotovoltaici; si riporta in seguito una descrizione di quelli più importanti e che maggiormente hanno fornito spunti di analisi.

2.2.1 Modello di Krauter

Presso i PV-labs di Rio de Janeiro, nel 1999 il prof. S. Krauter ha effettuato una sperimentazione sulle potenzialità del raffreddamento di moduli fotovoltaici tramite un film d'acqua che scorre sul lato superiore (frontale) dei moduli stessi.

Per la prova sono stati utilizzati due moduli uguali, del tipo Siemens M55, di cui uno veniva raffreddato mentre il secondo no. Il film d'acqua era prodotto mediante una linea di 12 ugelli posizionati sulla parte superiore del modulo. L'acqua proveniva da una piccola tanica ($\cong 50L$) collocata sopra il modulo, rifornita a propria volta da un grande serbatoio sottostante da cui l'acqua veniva pompata con una portata approssimativa di $2L/min$. Il flusso d'acqua si spargeva sulla superficie del modulo e creava un film di spessore di circa 1 mm . Con riferimento all'area della superficie del modulo, il consumo specifico d'acqua era di $4.4\text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$. La radiazione era misurata da un piranometro posto sullo stesso piano dei moduli e la temperatura ambiente misurata all'ombra, mentre altri sensori di temperatura (Pt100) erano installati nel retro dei due moduli, dove si stimava le temperature fossero circa 1.5°C superiori rispetto alla superficie frontale. La velocità del vento era misurata 30 cm al di sopra dei moduli ed il pannello veniva fatto lavorare al punto di massima potenza. I dati vennero acquisiti durante la giornata ad intervalli di 15 minuti e sono riportati in figura 2.2; le condizioni meteorologiche della giornata erano di sereno.



Figura 2.1: vista dei due pannelli Siemens M55 utilizzati, su uno dei quali scorre il film d'acqua.

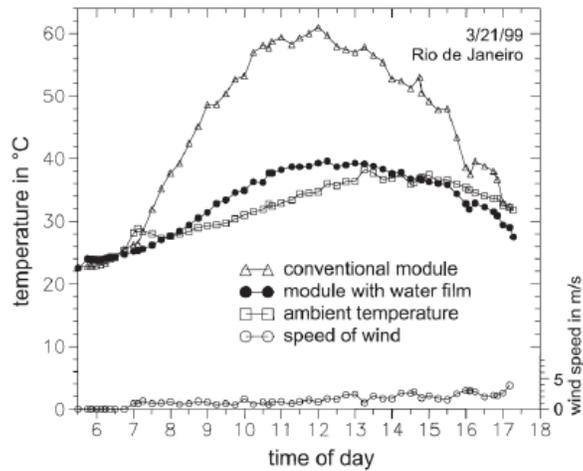


Figura 2.2: andamento nel corso della giornata della velocità del vento, temperatura ambiente e temperatura dei due moduli.

Come lo stesso autore descrive, i risultati principali sono:

- una riduzione significativa della temperatura di esercizio della cella raffreddata rispetto a quella del modulo di riferimento, con un picco di 22°C di differenza tra i due;
- un incremento del rendimento e di conseguenza della potenza (figura 2.3). Si stima una extraproduzione energetica, senza detrarre il consumo elettrico della pompa, di circa il 10.3% per l'intera giornata;

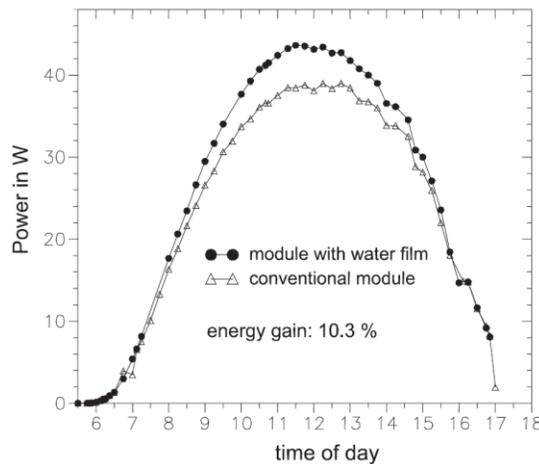


Figura 2.3: andamento nel corso della giornata della potenza in uscita dai due moduli.

- miglioramento delle performance ottiche del 1.5%: valore minore di quello stimato analiticamente dall'autore, pari al 3%. L'autore spiega come tale discrepanza sia da ricercare nella non omogeneità della pellicola di acqua e/o nelle proprietà di assorbimento della luce del fluido stesso;
- miglioramento dell'istanza estetica attraverso la creazione di una visuale piacevole. Secondo l'autore infatti, lo scorrere dinamico del fluido può rendere il sistema fotovoltaico più attraente

dal punto di vista della “*architectural nuance*” e allo stesso tempo coinvolgere maggiormente le persone a riguardo del sistema di produzione fotovoltaico.

Tuttavia, nella sperimentazione sopra descritta, la pompa utilizzata dal prof. S. Krauter era una piccola pompa a basso costo, con efficienza prossima al 15%. L'energia assorbita da questa pompa era quindi tale da non giustificare dal punto di vista energetico l'utilizzo del film d'acqua per incrementare il rendimento e la potenza fornita dal modulo fotovoltaico, dato che il bilancio energetico risultava negativo.

Pertanto sono state analizzate dal prof. Krauter alcune alternative del sistema precedente, in modo da realizzare una migliore prestazione energetica complessiva. Si è realizzato un sistema costituito da 6 moduli Siemens M55, che alimentano una pompa centrifuga ad alta efficienza movimentata da un motore DC del tipo brushless. Questa pompa fornisce una prevalenza di 4m e una portata di 17 m³/h, di cui solo l' 1.4% dell'acqua pompata è utilizzata per il raffreddamento, mentre la restante si ipotizza essere destinata ad un altro uso, per esempio l'irrigazione. I pannelli sono disposti in due file affiancate di tre pannelli ciascuna e l'acqua di raffreddamento fluisce da 24 ugelli sui due moduli posti più in alto, per poi scendere lungo i restanti moduli. Questo sistema realizza un bilancio energetico positivo e il guadagno di energia netto è quantificato in circa l'8% rispetto a un generatore fotovoltaico delle stesse dimensioni, ma non raffreddato. Stando a quanto riportato dall'articolo, un aumento della taglia del generatore a 8 moduli M55 può portare a un bilancio netto di energia del +9%. Nello studio non sono riportate purtroppo valutazioni di tipo economico che prendano in considerazione i costi di investimento e di esercizio dell'impianto raffrontati alle maggiori entrate garantite.

2.2.2 Modello di Moharram et al.

Molto interessante è anche il lavoro di Moharram et al., i quali hanno realizzato una configurazione per testare i risultati e le prestazioni di pannelli fotovoltaici raffreddati con film d'acqua, con particolare attenzione al consumo della stessa.

L'impianto in questione si trova presso la *German University in Cairo (GUC)*, in Egitto, ed è costituito da sei moduli fotovoltaici da 185W, prodotti dalla Bp Solar e per le cui caratteristiche si rimanda all'articolo, raffreddati tramite il sistema di figura 2.4. In particolare, le componenti più importanti sono:

- un serbatoio di alluminio di capacità pari a 0.3m³ installato nel terreno per evitare il surriscaldamento causato dalle radiazioni solari e dall'ambiente esterno;
- una pompa centrifuga di potenza 1hp;
- 120 fori per distribuire l'acqua sul pannello;

- una grondaia per recuperare l'acqua e convogliarla nuovamente nel serbatoio. La differenza di quantità tra l'acqua in ingresso nel serbatoio e quella accumulata è tale che la temperatura maggiore della prima non influisca in alcun modo sull'esperimento. La temperatura fu misurata e fissata a 25°C.



Figura 2.4: configurazione dell'esperimento di Moharram et al.: 1) modulo fotovoltaico; 2) serbatoio; 3) pompa; 4) filtro; 5) fori; 6) grondaia.

L'esperimento è stato condotto in due giornate diverse, primo giugno 2012 e primo luglio 2012, e aveva come scopo anche quello di trovare la migliore frequenza di accensione del sistema di raffreddamento, in modo da ottimizzare l'utilizzo dell'acqua e della pompa. In figura 2.5 sono riportati i risultati sperimentali delle prove in cui si lasciò riscaldare il pannello fino alla temperatura massima consentita ($MAT = \text{Maximum Allowable Temperature}$), momento in cui si attivò il sistema di raffreddamento fino a riportare il pannello alla temperatura normale di esercizio (35°C). La massima temperatura consentita è una temperatura di compromesso tra l'energia prodotta dai pannello fotovoltaico e quella necessaria per il raffreddamento. La potenza è stata calcolata tenendo in considerazione che alla temperatura normale di esercizio il sistema produce 790W. In figura 2.6 è invece rappresentato l'andamento dell'energia, al netto di quella spesa per l'alimentazione della pompa durante il periodo di esercizio, in funzione della temperatura massima consentita.

L'esperimento permise di concludere che la temperatura ottimale di lavoro del sistema di pannelli fotovoltaici è 45°C. Si osservò inoltre che a 40°C l'energia netta era di poco superiore a quella che si

otteneva per 65°C, ma molto inferiore di quella massima che si otteneva per 45°C, solamente 5°C maggiore.

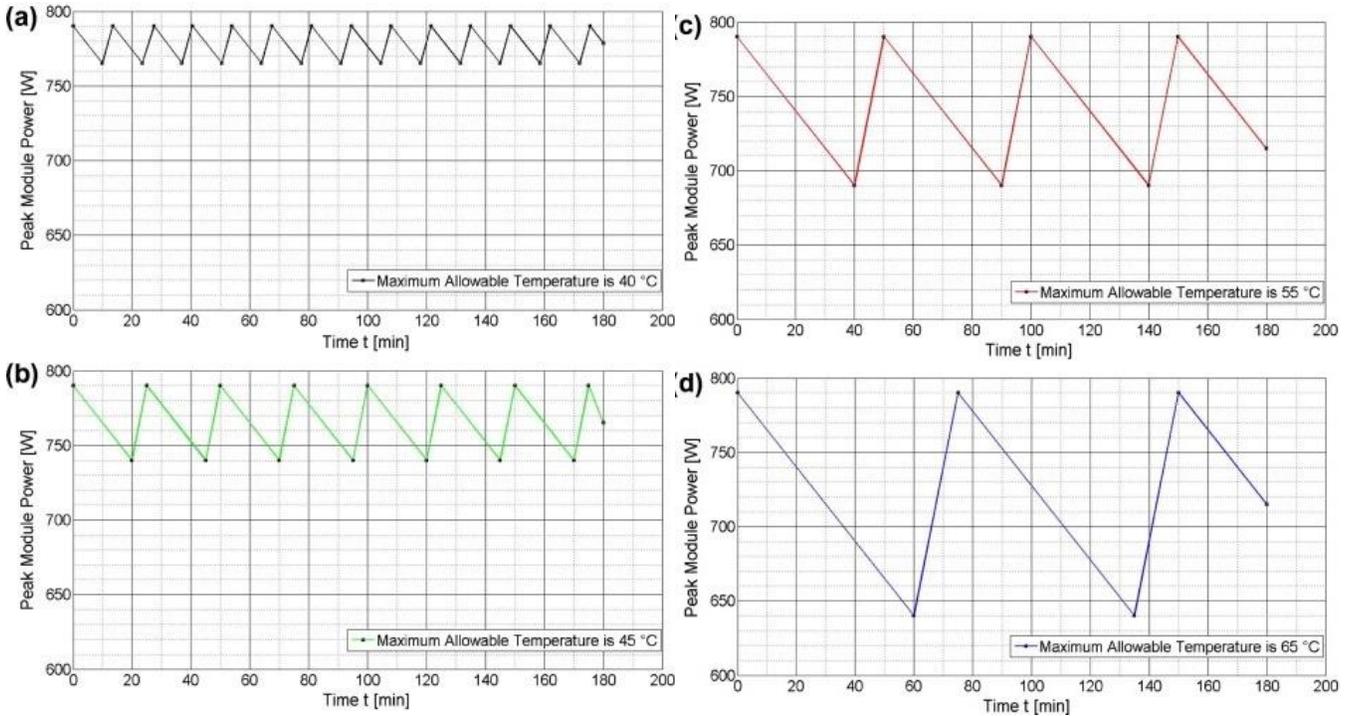


Figura 2.5: potenza ottenuta in condizioni di raffreddamento diverse:
 a) MAT=40°C; b) MAT=45°C; c) MAT=55°C; d) MAT=65°C.

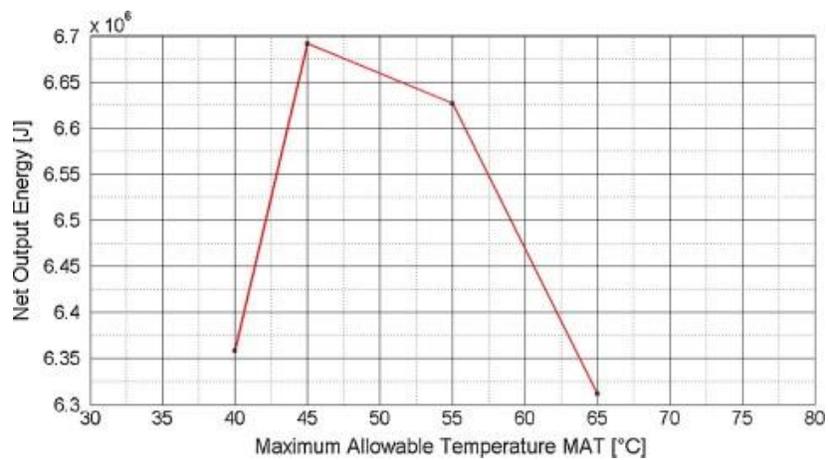


Figura 2.6: energia netta prodotta in funzione della temperatura massima consentita prima dell'attivazione del sistema di raffreddamento.

2.2.3 Modello di Wilson

Per quanto riguarda un sistema alternativo di raffreddamento a fluido, E. Wilson della School of Engineering University of Technology, Jamaica, ha pubblicato uno studio in cui l'acqua è fatta scorrere sul retro di una cella fotovoltaica e nel quale compara i risultati di un modello numerico con sperimentazioni sul campo. L'acqua è fatta circolare senza l'ausilio di una pompa, sfruttando una differenza di altezza tra sorgente e scarico, come si può avere derivando la portata d'acqua da un fiume oppure accumulando l'acqua piovana su un serbatoio elevato.

Questo sistema, pur avendo un'applicazione naturalmente limitata alle situazioni in cui si dispone di una sorgente o di stoccaggio di acqua sufficientemente elevata rispetto al campo, presenta il vantaggio di eliminare completamente le spese di energia legate al pompaggio del fluido. L'apparato sperimentale è costituito da un serbatoio d'acqua situato ad altezza superiore rispetto al modulo; l'acqua è prelevata da tale stoccaggio e fatta fluire per gravità attraverso il moduli e infine scaricata. Il retro del modulo è stato chiuso in maniera da poter far circolare l'acqua in una cavità di spessore 1.5cm e i terminali protetti dal contatto con il fluido tramite sigillante siliconico. Non essendo previsto ricircolo, ma lo scarico diretto o la reimmissione nel corso d'acqua, la temperatura d'ingresso del fluido nel modulo si può ritenere costante. Il modulo è stato installato all'aperto in una posizione priva di qualsiasi ombreggiamento e l'acqua di raffreddamento è stata fatta scorrere non appena il modulo ha raggiunto la massima temperatura, corrispondente a $62\div 68^{\circ}\text{C}$ nelle condizioni locali. Questa operazione è stata ripetuta più volte ed i risultati mostrano (figura 2.7) che è possibile mantenere il modulo ad una temperatura molto prossima (entro 2°C) alla temperatura del fluido di raffreddamento, realizzando un salto di temperatura che può spingersi a 32°C .

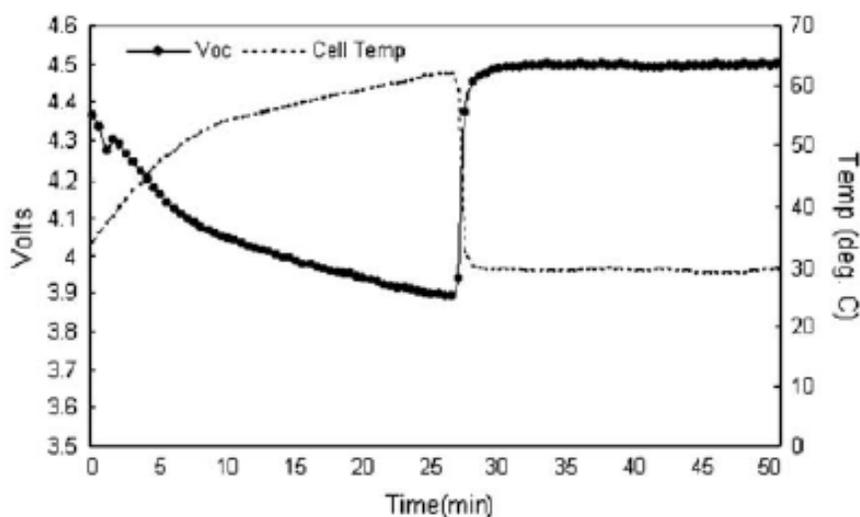


Figura 2.7: andamento della temperatura e della tensione in uscita del modulo in funzione del tempo, il raffreddamento parte al minuto 25.5.

A seconda della portata adottata il tempo in cui il modulo si porta a regime stazionario raffreddato è variabile, ma comunque piuttosto breve (compreso tra circa 30 secondi e 3 minuti). Lo studio riporta inoltre che la portata specifica ottimale, nelle ipotesi di modulo esposto alla massima insolazione e trasformazione integrale dell'energia solare in calore, risulta essere di $7.2 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$.

Infine, l'incremento di energia prodotta ottenuto grazie al raffreddamento del modulo si stima intorno al 12.8% rispetto al caso senza raffreddamento; è opportuno notare che questa percentuale costituisce un guadagno netto di energia, non essendoci spese per il pompaggio. L'autore in conclusione sottolinea come la semplicità sia uno dei punti di forza del sistema, che trova applicazione nelle località dove ci sia disponibilità d'acqua a quota superiore all'impianto; non è invece presente una analisi dei costi che determini la fattibilità economica dell'installazione descritta.

2.2.4 Raffreddamento frontale del pannello con ground water tunneling del fluido

Uno studio a cura di Ponnappalli Chaitanya Sai e Potuganti Prudhvi prende in esame un sistema di raffreddamento con film d'acqua che scorre frontalmente sul pannello. Dopo aver raffreddato il pannello, l'acqua calda viene fatta poi circolare in un circuito chiuso nel quale scambia calore con il terreno ad una certa profondità in modo da poter raffreddare nuovamente il pannello; tale sistema viene chiamato *ground water tunneling*. Le tubazioni sotterranee sono costituite di materiale ad alta conduttività termica, per incrementare lo scambio di calore, e sono poste ad una profondità per la quale la temperatura resta pressoché costante durante l'anno, ovvero $2\div 3\text{m}$ sotto la superficie, a seconda delle caratteristiche del sottosuolo. Le sonde sono progettate in maniera da ottenere il massimo trasferimento termico per unità di lunghezza ed il percorso delle stesse è studiato al fine di ottimizzarne le prestazioni.

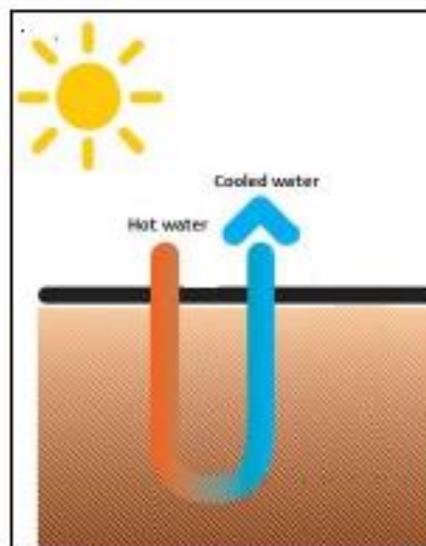


Figura 2.8: scambio termico dell'acqua con il sottosuolo.

Con questo metodo l'incremento della produzione di energia può essere consistente e l'unica spesa energetica è quella legata alla pompa di circolazione del fluido di raffreddamento. Gli autori effettuano delle valutazioni sulla convenienza del sistema riferendosi ad un generatore fotovoltaico composto di 32 pannelli del tipo FS-380 da 80W della First Solar, per una potenza complessiva di 2.56kW di picco. Per i tubi viene assunto un diametro pari a 0.05m e per le sonde una profondità di 4 m, la potenza della pompa risulta essere invece di 36W. La stima dell'incremento della produzione energetica tiene poi conto che i pannelli possano raggiungere la temperatura di 66°C, mentre il fluido di raffreddamento si mantiene alla temperatura di 25°C. Si considera che lo stato stazionario termico venga raggiunto e i pannelli si mantengano alla temperatura costante di 35°C, garantendo così una potenza addizionale di 200W rispetto al caso in cui non ci sia raffreddamento. Un'ulteriore potenza addizionale di 25W è associata alla diminuzione delle perdite per riflessione consentita dalla presenza del film d'acqua; si raggiunge così una potenza addizionale complessiva di 225W, a fronte di un consumo elettrico della pompa di 36W. Si è quindi stimato un incremento netto del 7.5% della produzione di energia.

Una nota riguarda la disposizione dei pannelli in relazione al mantenimento del film d'acqua: se la dimensione del generatore PV, in parallelo con la velocità del fluido, è incrementata ponendo più pannelli in successione, sarà richiesta meno energia di pompaggio perché l'acqua pompata per il pannello superiore scorrerà anche su quello inferiore, ma saranno negativamente influenzate l'uniformità del film e la temperatura del fluido, che subisce un maggiore incremento. In questo caso la configurazione geometrica del nuovo sistema andrebbe dunque opportunamente valutata.

Infine lo studio si conclude con una valutazione economica dell'installazione per un impianto da 1MW, per il quale si stima che l'investimento possa rientrare economicamente in un tempo di circa 6 mesi; pertanto gli autori auspicano possa essere svolta una più approfondita ricerca sul tema, in maniera da poter ottimizzare il sistema e realizzare delle installazioni sugli impianti fotovoltaici.

2.2.5 Sistemi di raffreddamento ad aria

Un'ulteriore possibilità per il raffreddamento di moduli fotovoltaici è costituita dal raffreddamento ad aria, con circolazione naturale o forzata.

Uno studio di B.J. Brinkworth e M. Sandberg (2006) affronta l'ottimizzazione di sistemi per il raffreddamento ad aria di installazioni fotovoltaiche su edifici: una intercapedine sottostante il pannello permette all'aria di fluire, sotto la spinta del vento e dell'effetto del riscaldamento subito dal fluido nel suo percorso. Nello studio sono esposti risultati numerici e sperimentali ottenuti per il sistema, ed è discussa l'ottimizzazione della geometria dello stesso, con la valutazione dell'introduzione di strutture alettate nei corpi sede di scambio termico; si rimanda al riferimento in bibliografia per ulteriori dettagli.

Non sono presenti considerazioni di natura economica riguardo i costi della realizzazione e le maggiori entrate assicurate; tuttavia, lo studio in oggetto ha come principale obiettivo l'indagine delle prestazioni di un sistema così configurato, in vista della possibile integrazione architettonica nelle strutture edilizie.

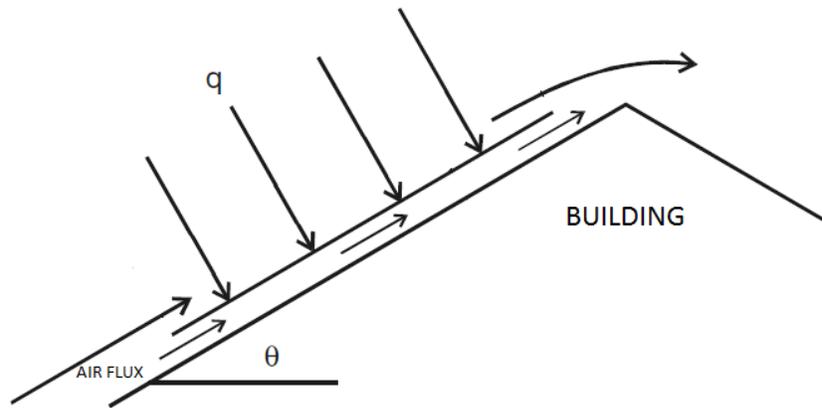


Figura 2.9: schema di installazione su tetto di un impianto fotovoltaico con intercapedine d'aria sottostante.

Una diversa applicazione del raffreddamento ad aria è presentata in una pubblicazione di Z. Farhana *et al.* (2012) nella quale si descrivono l'apparato sperimentale realizzato presso il *Centre of Excellent University Malaysia Perlis* e i risultati ottenuti. In questa applicazione sono stati impiegati due moduli in silicio policristallino dalla potenza di picco di 130W, prodotti da Sharp Solar; in uno dei due è stata applicata posteriormente una lastra di alluminio, sulla quale sono state installate due piccole ventole DC brushless (12V, 0.2A). Una batteria accumula l'energia prodotta dal pannello raffreddato e allo stesso tempo alimenta le ventole. Durante le sperimentazioni, effettuate nel mese di novembre 2011, le temperature e i parametri prestazionali dei pannelli sono stati misurati e registrati da una apposita apparecchiatura di acquisizione, mentre i parametri ambientali sono stati monitorati tramite una stazione meteorologica. Si è osservato come la temperatura del modulo fotovoltaico può essere più elevata del 70% rispetto alla temperatura ambiente nel caso non raffreddato, mentre del 30% nel caso raffreddato. La massima differenza di temperatura registrata tra i due moduli è invece pari a 12°C, e la massima differenza tra le potenze è pari a 8.6W.

2.3 Test di affidabilità dei moduli fotovoltaici

È lecito domandarsi se la presenza di un film continuo d'acqua che scorre sulla superficie del pannello possa danneggiare in qualche modo la struttura del pannello stesso. Normalmente i pannelli sono soggetti a intemperie, come per esempio la pioggia, il vento o la grandine, ma le quantità e i modi con cui l'acqua si riversa sul pannello non sono paragonabili a queste.

Si riporta dunque una serie di test che i moduli fotovoltaici devono superare prima di venire messi in commercio, analizzando così il livello di resistenza ai fenomeni sopra citati:

- *accessibility test*: resistenza sempre superiore a 1 M Ω tra apparecchiatura di prova e parti del modulo in esame;
- *cut susceptibility*: soddisfacimento dei requisiti di prova di isolamento dopo un taglio netto sul film posteriore del modulo;
- *impulse voltage test*: resistenza ad un impulso ad alta tensione, definita a seconda delle caratteristiche del modulo;
- *dielectric withstand test*: resistenza alla tensione di prova di 2000 V DC + 4 x max. tensione del sistema a STC per 1 minuto;
- *wet leakage test*: prova del modulo contro la penetrazione dell'umidità in condizioni operative di bagnato (pioggia, rugiada, nebbia, neve sciolta), per evitare corrosione, dispersioni a terra e rischio di folgorazione. Il modulo è immerso in una vasca poco profonda in maniera tale siano coperte tutte le superfici ad eccezione dei contatti e delle scatole di derivazione, che non sono progettati all'immersione. Una tensione di prova viene applicata tra i connettori in cortocircuito e il fluido fino alla tensione massima di sistema del modulo per 2 minuti. Si misura la resistenza di isolamento che dev'essere superiore a un valore stabilito;
- *hot-spot test*: esposizione di 5 ore a una radiazione maggiore di 700 W/m² nella peggiore condizione di temperatura;
- *reverse current overload test*: resistenza a una corrente inversa pari al 135 % della sovracorrente massima del modulo per 2 ore;
- *module breakage test*: impatto di un corpo del peso di 45.5kg (limite sui frammenti, A minore di 6.5 cm²);
- *thermal cycling test*: 200 cicli tra le temperature di -40°C e +85°C, con escursioni rapide e soste di circa dieci minuti alle temperature estreme;
- *humidity freeze test*: 10 cicli da -40°C a +85°C, con RH 85%;
- *damp heat*: 1000 ore alla temperatura di +85°C, con RH 85%.

I test elencati non rappresentano la totalità dei test eseguiti sui pannelli fotovoltaici, ma solamente una parte. Tutti i test si possono però trovare descritti nella normativa di settore.

Come detto in precedenza l'impiego dei sistemi di raffreddamento oggetti di studio, ovvero quelli nei quali il liquido è a contatto con la superficie frontale del pannello, sottopone il pannello a condizioni nettamente diverse rispetto a quelle alle quali sarebbe sottoposto nelle normali installazioni.

Innanzitutto nel caso del film d'acqua il contatto acqua-pannello è più frequente rispetto a quanto si

verificherebbe in assenza dell'impianto di raffreddamento (cioè solo per la pioggia) ed inoltre è imposta una oscillazione tra la temperatura stazionaria di regime raffreddato e stazionaria di regime non raffreddato per un elevato numero di volte. In letteratura non sono presenti specifici studi che documentino se ciò possa avere implicazioni negative sulla resistenza o sulle prestazioni del modulo a lungo termine, tuttavia, almeno sul breve termine, si ritiene ragionevole poter escludere tale eventualità. Si può infatti notare i come il superamento di alcuni test come ad esempio “*thermal cycling test*” o il “*wet leakage test*” garantiscano la resistenza del modulo in condizioni ben peggiori di quelle che si potrebbero verificare durante l'esercizio dell'impianto di raffreddamento, per quanto concerne stress termici ed isolamento elettrico.

È importante inoltre evidenziare come l'evaporazione dell'acqua di raffreddamento possa portare alla deposizione di sali disciolti con formazione di residui sulla superficie e quindi sporcamento del pannello; in contrapposizione però lo scorrere del fluido può contribuire alla rimozione della polvere e quindi alla pulizia del pannello, con effetto simile a quello della pioggia.

Infine, sarebbe interessante studiare l'effetto della permanenza sulla superficie vetrata del pannello di gocce d'acqua in evaporazione. Queste infatti potrebbero agire da concentratore della radiazione solare (effetto “lente”) e sottoporre a sollecitazione le celle. È infatti lecito ritenere che la situazione sia simile a quella successiva alla cessazione di una pioggia, per quanto riguarda la presenza dei residui di liquido. Tuttavia ciò che differenzia i due casi è la radiazione solare: infatti nel caso di pioggia la radiazione solare è molto bassa poiché il cielo è solitamente nuvoloso, a differenza del caso invece di raffreddamento dei pannelli, dove la radiazione si può mantenere costante ed elevata durante tutto il periodo. Questo fenomeno costituisce dunque una potenziale sollecitazione non prevista dai test riportati.

In questa sede, tuttavia, non è possibile procedere a ulteriori valutazioni riguardo a quanto esposto in questo paragrafo; si fa però notare, in ogni caso, come gli studi esistenti in letteratura non associno alcuna criticità a quanto sopra discusso.

Capitolo 3

Set up sperimentale

L'obiettivo del presente studio è analizzare e testare un sistema di raffreddamento a film d'acqua per un pannello fotovoltaico. Questo perché, come descritto nel capitolo precedente, una delle tecniche più efficaci e semplici per raffreddare un pannello fotovoltaico è fare scorrere sulla sua superficie frontale un flusso d'acqua. In questo capitolo si descrive l'apparato sperimentale allestito presso il laboratorio di Macchine Idrauliche del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Padova e utilizzato per svolgere le prove che verranno descritte nei capitoli successivi. Questo è stato realizzato partendo da zero, ma prendendo come riferimento l'apparato sperimentale utilizzato da alcuni precedenti tesisti negli anni addietro e sfruttando gli stessi componenti quando possibile. I paragrafi che seguono descrivono quindi tutti i componenti utilizzati, illustrando specifiche e quant'altro sia stato utile ai fini dello studio. Le prove sperimentali sono state condotte nel periodo compreso tra luglio-novembre 2017.

3.1 Il pannello fotovoltaico

Il pannello utilizzato per le prove è stato messo a disposizione dell'Università di Padova da ForGreen S.p.A. alcuni anni fa per un precedente lavoro di tesi. Il pannello è prodotto da X GROUP S.p.A., modello XG60P; è composto da 60 celle di silicio policristallino, l'area complessiva del modulo è circa $1,6\text{m}^2$ e la potenza di picco corrisponde a 220W. Le specifiche del pannello sono riportate in figura 3.1 ed ulteriori caratteristiche elettriche sono riportate nei datasheet reperibili nel sito internet della ditta produttrice. Prima dell'inizio delle prove e periodicamente durante queste, il pannello è stato adeguatamente pulito e spolverato.

3.2 Installazione del pannello

Il pannello è stato posto sopra un banco da disegno tecnico già presente in laboratorio e adeguatamente fissato e stabilizzato ad un angolo di 30° rispetto all'orizzontale. Il pannello poggia sulla superficie del banco solamente con il telaio di alluminio di cui è composto ed è fissato al banco tramite un'asta di legno e due viti passanti che sfruttano i fori superiori già presenti nel telaio. Questo è stato poi posizionato su una grata al di sopra della vasca d'acqua utilizzata per le prove idrauliche di laboratorio

e posto sotto ad un trabattello in acciaio, sul quale è stato fissato successivamente il faro. Infine nei pressi dell'intera struttura è presente un rubinetto d'acqua al quale collegare il sistema di raffreddamento.



Figura 3.1: specifiche del pannello utilizzato.



Figura 3.2: installazione del pannello.

3.3 Sistema di raffreddamento

Per il sistema di raffreddamento sono stati scelti, quando possibile, componenti già presenti in laboratorio ed impiegati per altre prove in passato. Quando invece i componenti non erano già disponibili, si è scelto di utilizzare componenti comunque economici e comunemente utilizzati e reperibili nel settore del giardinaggio. L'economicità e i bassi costi di installazione sono infatti le caratteristiche fondamentali che devono possedere i sistemi di raffreddamento per pannelli fotovoltaici già esistenti ed installati per essere proposti sul mercato. Si riportano in seguito le caratteristiche tecniche dei principali componenti.

3.3.1 Tubo collettore

Tubo in polietilene, flessibile, antialghe, resistente agli sbalzi termici e alla radiazione solare, di diametro interno (ϕ_{int}) 14mm e diametro esterno (ϕ_{est}) 16mm. Questo viene ancorato a un asse di legno fissato parallelamente al pannello tramite delle fascette serranti di plastica e fissato al bordo superiore del pannello fotovoltaico a mezzo di fissa tubo utilizzati in ambito di impiantistica elettrica: il costo irrisorio, la compatibilità con il tubo collettore utilizzato e la comprovata resistenza ai fenomeni atmosferici hanno contribuito alla scelta. Sono presenti due curve di plastica con cui si devia il flusso di

90° in modo da rendere il posizionamento più stabile e sicuro. Nella parte superiore sono presenti, dal basso verso l'alto, un comune rubinetto in plastica da giardinaggio non temporizzato, un manometro per la misura della pressione della condotta con un proprio sistema di sfiato in modo da evitare il formarsi di un cuscinetto d'aria tra lo strumento di misura e l'acqua, cosa che impedirebbe la rilevazione del corretto valore di pressione. Esso ha una sensibilità di 0.2 bar e un fondoscala di 6 bar. Lungo il bordo superiore del pannello vengono realizzati i fori sui quali innestare gli ugelli per le prove. All'estremità vi è infine un altro sistema di misura della pressione, strutturalmente uguale a quello sopra descritto, ma con un manometro di sensibilità di 0.1 bar, fondoscala pari a 4 bar e utilizzare per valutare le perdite di pressione lungo il tubo.

3.3.2 Ugelli

Per le prove sperimentali descritte in seguito sono stati utilizzati tre microirrigatori da 90°, modello 91254, prodotti dall'azienda Claber. Questi sono stati posizionati sul tubo fissato al bordo superiore del pannello, in modo tale che un ugello spruzzi nella zona centrale del pannello, uno nella zona di destra e un altro in quella di sinistra. Sono ugelli da avvitare direttamente al tubo previa foratura con specifica fustella foratubo di precisione. Sono resistenti ad ogni condizione atmosferica. La tenuta idraulica si è dimostrata molto buona essendo commercializzati per pressioni fino a 2.5 bar. Si è scelto di utilizzare ugelli di questo tipo in quanto l'angolo di apertura di 90° risulta il più efficace per bagnare una superficie limitata ad un singolo pannello. Nel corso delle prime prove qualitative è infatti emerso che l'impiego di un microirrigatore da 180° non è adatto per una configurazione a singolo pannello a causa dell'elevata dispersione di acqua ai lati. Tuttavia, quest'ultimo potrebbe trovare applicazione in un'ipotetica installazione in un campo fotovoltaico, dove un'eventuale dispersione laterale del singolo potrebbe essere sfruttata positivamente dal pannello adiacente.

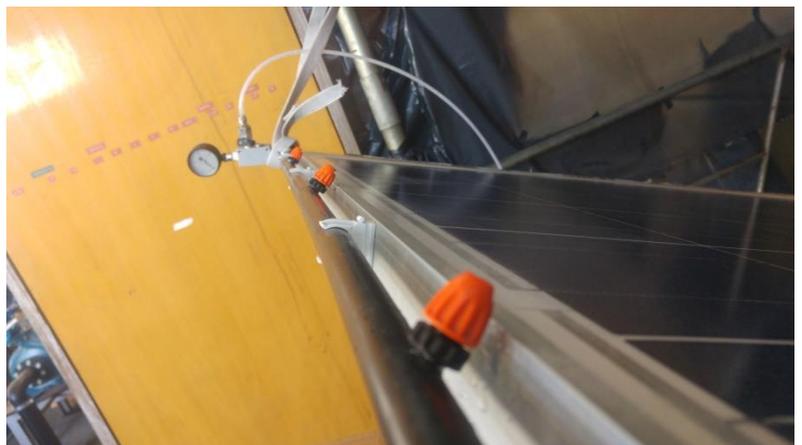


Figura 3.3: a sinistra il dettaglio di un ugello con angolo d'apertura da 90° utilizzato, a destra l'installazione dei 3 ugelli utilizzati durante le prove.

3.3.3 Sistema di recupero dell'acqua

Poiché il sistema di raffreddamento utilizzato sfrutta una portata d'acqua, che in parte evapora e in parte lambisce tutta la superficie del pannello per poi cadere dal bordo inferiore, si è studiato un sistema di recupero dell'acqua da porre alla base del pannello, in modo da recuperare così l'acqua che in altre condizioni andrebbe persa. Questo sistema è costituito da una porzione di grondaia, opportunamente posizionata alla base del pannello tramite dei supporti metallici solidali alla grata del pavimento. L'inclinazione laterale è tale che l'acqua fluisca verso un solo lato presso cui viene posizionato un contenitore utile al raccoglimento del fluido e alla misura della portata a valle del sistema. Il sistema è rappresentato in figura 3.4.



Figura 3.4: sistema di recupero dell'acqua e suo dettaglio.

3.4 Faro alogeno

Come detto in precedenza, le prove sperimentali sono state effettuate nel periodo compreso tra luglio e novembre. Poiché in un periodo temporale così ampio le condizioni climatiche sono ovviamente molto variabili, si è preferito svolgere le simulazioni all'interno del laboratorio. Per simulare una radiazione solare costante ed indipendente si è quindi deciso di impiegare una lampada alogena. Poiché in laboratorio erano già presenti 4 fari alogeni della Osram, modello SLV1000, potenza assorbita 1000W, flusso luminoso pari a 33000 lumen e temperatura di colore pari a 3400K, utilizzati per un precedente lavoro di ricerca, si è utilizzato uno di questi. Il vetro frontale, di cui la lampada era dotata, è stato subito rimosso per garantire l'intero spettro luminoso. La lampada alogena è alloggiata in una cavità di materiale plastico riflettente e irradia uniformemente negli 80° di apertura massima del faro. Posizionando una singola lampada, al centro del pannello, a una distanza perpendicolare alla superficie di circa 1m, si ottiene un irraggiamento di circa 500W/m². Durante le prove il faro è stato posizionato

sia ad una altezza di 1m appunto sia di 0.5m rispetto alla perpendicolare condotta dal centro assoluto del pannello.



Figura 3.5: faro alogeno Osram, modello SLV1000, utilizzato nelle prove.

Il faro è appeso al trabattello in acciaio grazie ad un asticella metallica fissata al manico del faro e che passa in un foro praticato sulla tavola centrale del piano rialzato del trabattello, come in figura 3.6. L'asticella metallica permette di variare in maniera molto semplice l'altezza della lampada, ovvero la distanza tra la lampada ed il pannello, svitando ed avvitando due bulloni posti in prossimità del foro.



Figura 3.6: a sinistra la vista laterale del faro e di come esso sia appeso al trabattello, a destra la vista frontale.

3.5 Sistema di rilevamento delle temperature

La rilevazione della temperatura è stata effettuata attraverso tre termocoppie NI USB-TC01 (figura 3.8) della National Instruments fissate tramite del nastro adesivo americano sul retro del pannello fotovoltaico. Una termocoppia è stata posizionata esattamente al centro del pannello, mentre le altre due sono state poste sempre alla stessa altezza, ma una alla sua destra e l'altra alla sua sinistra (figura 3.7). In questo modo durante tutte le prove scorreva sempre sopra ad ogni termocoppia un film continuo di acqua. La termocoppia al centro del pannello verrà in seguito chiamata “termocoppia centrale”, mentre guardando il pannello frontalmente la termocoppia più a destra verrà chiamata “termocoppia di destra” e quella più a sinistra “termocoppia di sinistra”.

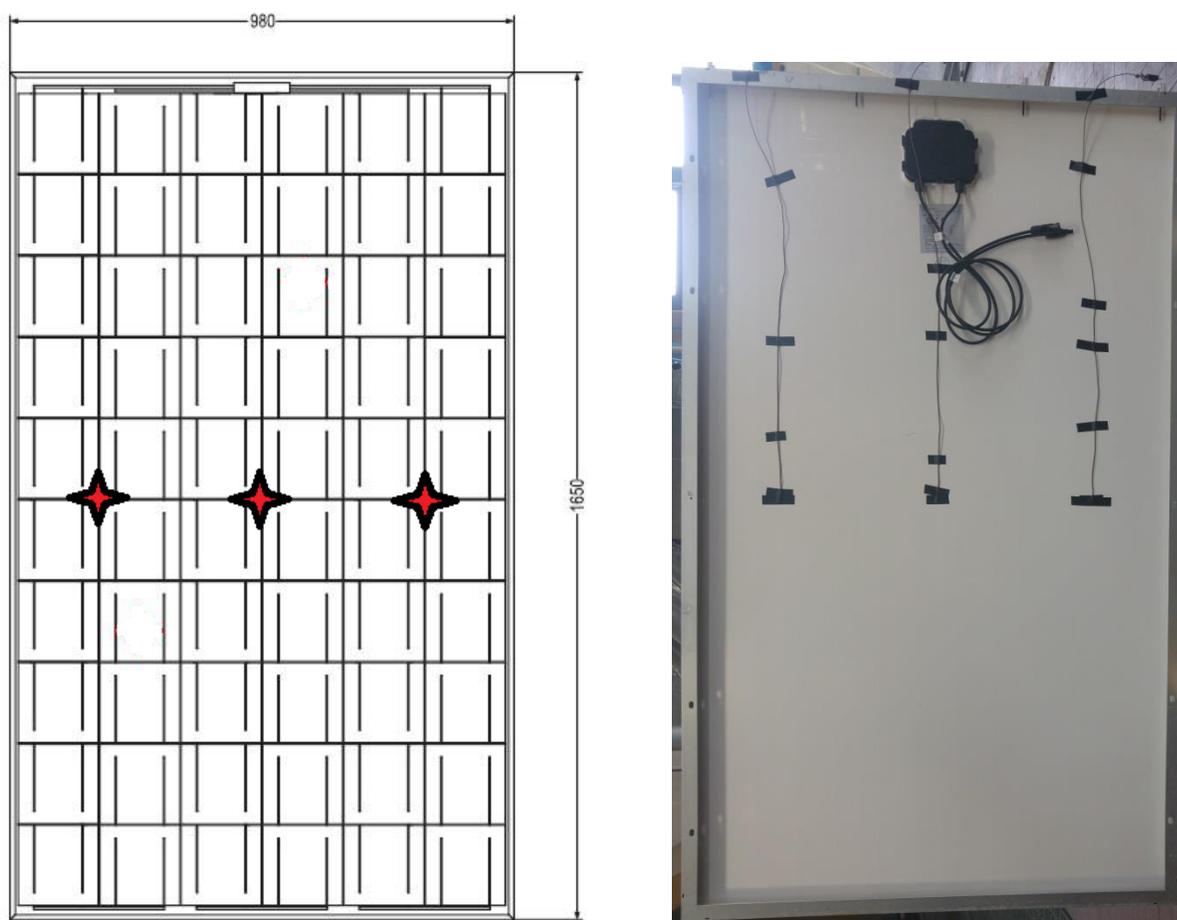


Figura 3.7: a sinistra la vista frontale schematizzata del pannello con indicati in rosso i punti dove sono state applicate le termocoppie nel retro, a destra una fotografia del retro del pannello.



Figura 3.8: sistema di rilevamento della temperatura NI USB-TC01.

Una constatazione risultata al termine delle prove è che, in generale, la termocoppia di destra registra sempre un valore di temperatura lievemente diverso rispetto alle altre. Si pensa che questo possa dipendere da come essa è stata installata. Nel fissaggio della termocoppia con del nastro adesivo sul retro del pannello potrebbe infatti essere entrata dell'aria tra il sensore della termocoppia ed il nastro adesivo, aggiungendo così allo scambio termico per conduzione tra il sensore ed il pannello un ulteriore scambio termico per convezione tra il sensore e l'aria. Tuttavia, anche le altre due termocoppie sono state installate allo stesso modo e non presentano particolari alterazioni delle misure ed inoltre, non appena ci si è accorti dell'andamento della temperatura lievemente diverso per una termocoppia, tutte e tre le termocoppie sono state nuovamente fissate con estrema attenzione sul retro del pannello e gli andamenti sono rimasti gli stessi. Pertanto questo fenomeno potrebbe anche solo dipendere da una taratura diversa della termocoppia di destra rispetto alle altre.

3.6 Apparato sperimentale completo



Figura 3.9: in alto la vista frontale dell'apparato sperimentale completo, in basso il dettaglio del bordo superiore del pannello, si riconoscono i 3 ugelli e i 2 manometri.

Capitolo 4

Analisi sperimentale: prima parte

In questo capitolo viene descritta la prima parte delle prove effettuate sull'apparato sperimentale descritto nel capitolo precedente. Questa prima parte di prove ha come scopo valutare la portata d'acqua in uscita dagli ugelli e quella a valle del pannello fotovoltaico, calcolare le perdite di portata e cercare di spiegarne i motivi. Inoltre si è cercato di analizzare il tempo di reazione del pannello per portarsi a regime quando questo è riscaldato da un faro posto ad 1m o a 0.5m rispetto alla perpendicolare condotta dal centro del pannello e, analogamente, il tempo di reazione del pannello per portarsi a regime quando questo è raffreddato da un flusso d'acqua continuo.

4.1 Assunzioni fatte

Di seguito vengono riportate le assunzioni che sono state fatte durante le prove:

- la temperatura dell'acqua utilizzata durante le prove si può ritenere costante a un valore prossimo ai 14°C, essendo prelevata dall'acquedotto cittadino di Padova;
- l'irraggiamento si considera sempre costante e provocato solamente dal faro utilizzato per effettuare le prove. Non è stato possibile misurare la radiazione solare indiretta proveniente dalle finestre del laboratorio, né tantomeno schermare il sistema da esse. Il pannello non è però stato sicuramente esposto a radiazione diretta;
- inclinazione del pannello pari a 30° costante per tutte le prove;
- pressione dell'acqua costante durante tutte le prove. Ciò non è puntualmente vero perché si notava una leggera variazione della pressione, soprattutto alle pressioni più elevate, a seconda delle altre attività del laboratorio. Comunque questa variazione era minima e pertanto nella maggiore parte dei casi trascurabile;
- perdite di acqua agli ugelli e lungo la tubazione non calcolate precisamente. Non è infatti stata calcolata specificatamente la lieve perdita d'acqua a livello degli ugelli, fattore che dipende dall'innesto dell'ugello stesso nel tubo tramite foro teflonato. Trattandosi di uno sporadico gocciolio, questo si è ritenuto trascurabile;
- misura della temperatura localizzata nella zona centrale del pannello, dove sono state posizionate le tre termocoppie. Inoltre si considera che la misura di questa si riferisca soltanto

alla temperatura posteriore del pannello, trascurando l'eventuale presenza di aria fraposta tra il sensore della termocoppia ed il retro del pannello.

4.2 Misure delle portate d'acqua

Sono state misurate, al variare della pressione, le portate d'acqua sia a monte che a valle del pannello, nei casi con tre ed un ugello.

4.2.1 Portate a monte del pannello

Le misure della portata d'acqua a monte del pannello sono state effettuate nel seguente modo: il tubo fissato al lato superiore del pannello è stato scollegato e posizionato sopra ad un recipiente per la raccolta dell'acqua. Il recipiente è stato poi pesato con una bilancia presente in laboratorio e dal peso si è ricavata la portata. Sono state eseguite tre misurazioni della portata per ogni valore della pressione ad intervalli temporali diversi, i cui valori sono riportati in tabella 4.1.

Tabella 4.1: misure della portata a monte del pannello per 3 ugelli.

pressione	tempo di misura	portata netta per 3 ugelli			valore medio	portata netta per ugello	valore medio per ugello
		kg	kg/min	l/h			
bar	min	kg	kg/min	l/h	l/h	l/h	l/h
0.5	1	1.40	1.40	84.17	80.86	28.06	26.95
	2	2.65	1.33	79.66		26.55	
	5	6.55	1.31	78.76		26.25	
1	1	1.95	1.95	117.23	114.63	39.08	38.21
	2	3.80	1.90	114.23		38.08	
	5	9.35	1.87	112.42		37.47	
1.4	1	2.40	2.40	144.29	138.88	48.10	46.29
	2	4.50	2.25	135.27		45.09	
	5	11.40	2.28	137.07		45.69	
2	1	2.80	2.80	168.34	163.93	56.11	54.64
	2	5.40	2.70	162.32		54.11	
	5	13.40	2.68	161.12		53.71	

4.2.2 Portate a valle del pannello

Le misure della portata d'acqua a valle del pannello sono state effettuate raccogliendo l'acqua nello stesso recipiente utilizzato per le misure della portata a monte, posizionato questa volta sotto la grondaia posta sul bordo inferiore del pannello. Come si vede in tabella 4.2, è stata misurata la portata per diversi valori della pressione e i valori ottenuti sono stati confrontati con quelli ricavati a monte del pannello. La colonna "perdite per ugello" è calcolata sottraendo al valore medio della portata di un singolo ugello a monte, tabella 4.1, quello a valle, calcolato alla medesima pressione. Essa indica, perciò, la differenza tra quanto registrato prima e dopo il flusso d'acqua sul pannello, ovvero le perdite di varia natura che sono state osservate. In tabella 4.3 sono invece riportate le portate nominali di un singolo ugello fornite dal produttore.

Tabella 4.2: misure della portata a valle del pannello per un ugello.

pressione	portata misurata		perdite per ugello	
	kg/min	l/h	l/h	%
0.5	0.427	25.67	1.28	4.74
1	0.600	36.07	2.14	5.60
1.4	0.725	43.59	2.70	5.84
2	0.880	52.91	1.73	3.17

Tabella 4.3: portata nominale di un ugello fornita dal produttore.

pressione	portata
bar	l/h
0.5	17
1	33
1.5	45
2	59
2.5	61

La figura 4.1 rappresenta un confronto grafico al variare della pressione tra la portata d'acqua di un ugello a monte del pannello, la portata d'acqua di un ugello a valle del pannello e la portata nominale di un ugello fornita dal produttore. Sia le misure di portata a monte ed a valle del pannello e sia i valori forniti dal produttore sono stati interpolati con una funzione polinomiale di ordine 3. Come si può vedere esiste una certa differenza tra i valori sperimentali ottenuti e quelli nominali forniti dal produttore. In particolare, risulta che i dati forniti per gli ugelli sottostimino la portata alle basse pressioni, sovrastimandola invece per pressione maggiori di circa 1.5 bar.

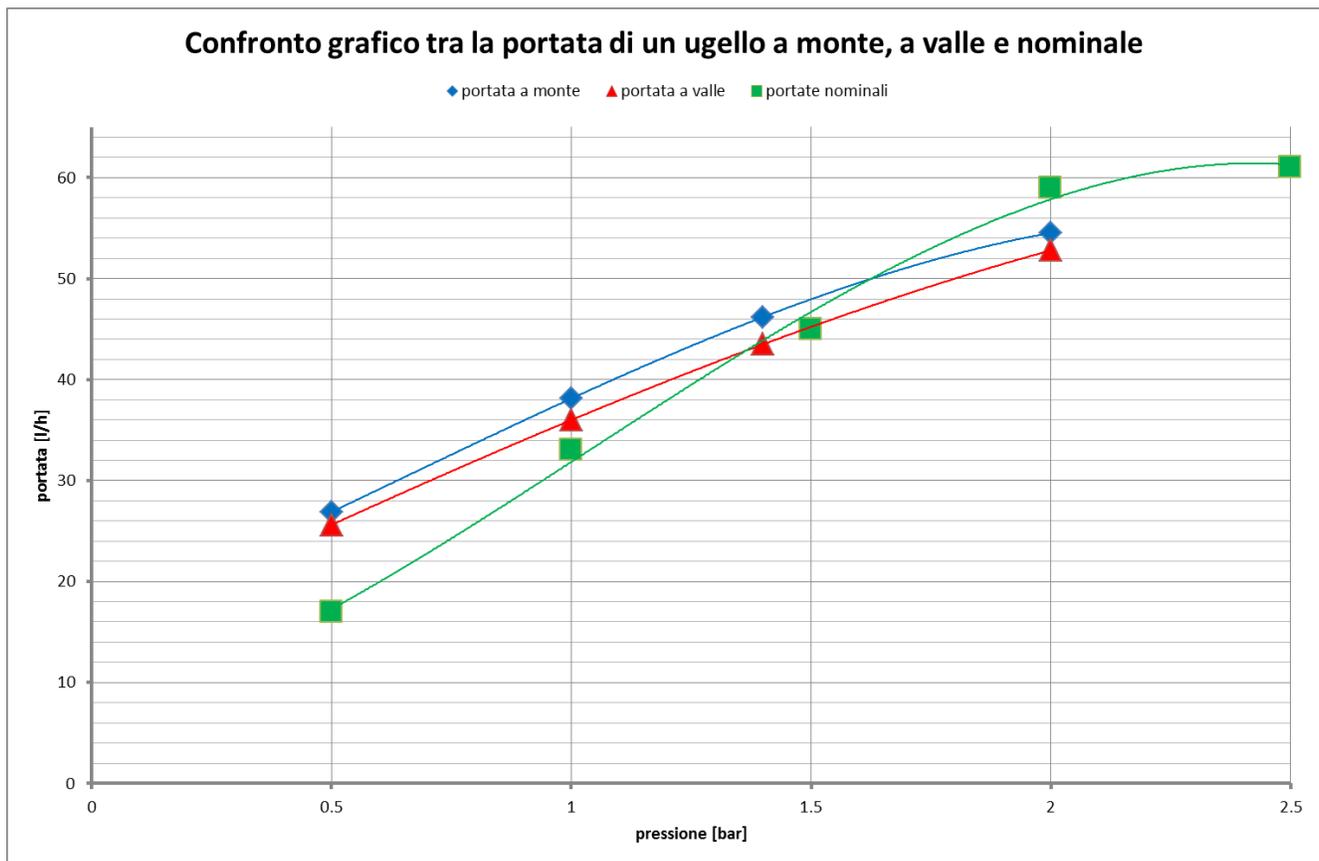


Figura 4.1: confronto grafico al variare della pressione tra la misura della portata a monte, a valle e la portata nominale.

4.2.3 Perdite di portata

Come già accennato nel sottoparagrafo precedente, per perdita di portata si intende la quota di acqua fornita al pannello che non viene raccolta a valle dello stesso, risultando perciò dispersa per vari fattori. Durante le prove si è osservato che i fattori che causano una perdita di portata tra monte e valle del pannello fotovoltaico sono:

- perdite laterali: è inevitabile che una parte dell'acqua erogata dagli ugelli venga dispersa lateralmente al pannello. Poiché le prove sperimentali sono state effettuate con un unico pannello, questa parte di acqua rappresenta una vera e propria perdita, in quanto non concorre al raffreddamento del pannello stesso. Tuttavia, se invece che di un unico pannello si avesse a disposizione una serie di pannelli, questa quantità di fluido andrebbe semplicemente a partecipare al raffreddamento del pannello adiacente. In questo secondo caso, il concetto di perdita non sarebbe da associare a qualcosa di negativo per il rendimento del sistema;
- gocciolio agli ugelli e lungo la tubazione: come già descritto nel paragrafo 4.1, questo fattore è un fenomeno sporadico e pertanto contribuisce molto poco alle perdite di acqua;
- perdite di pressione: durante alcune prove a pressione elevata si è riscontrata una perdita di pressione abbastanza significativa, probabilmente causata dalla concomitanza di altre attività

all'interno del laboratorio. Questa non è ovviamente una vera e propria perdita di portata poiché l'acqua non viene dispersa, ma risulta comunque come tale in quanto a valle si pesa meno acqua rispetto a quella che ci si aspetterebbe di pesare per una data pressione;

- evaporazione: da alcuni studi presenti in letteratura risulta che il vento che lambisce il pannello sia il parametro che maggiormente influenza l'evaporazione di acqua mentre questa fluisce sulla superficie del pannello stesso. In assenza di vento invece, come nelle prove effettuate, si ritiene che l'evaporazione influisca molto poco alle perdite di fluido, che dunque, in prima approssimazione, possono essere trascurate.

Ne consegue quindi che la differenza di acqua tra monte e valle è principalmente causata dalle perdite laterali al pannello. Queste perdite sono massime alle pressioni più elevate (1.5÷2 bar), mentre sono minime a bassa pressione. In tabella 4.5 si fa un confronto tra i valori della pressione a monte ed a valle del pannello, evidenziano la perdita assoluta in litri all'ora ed in percentuale.

Tabella 4.5: confronto tra le portate a monte ed a valle di un singolo ugello.

pressione	portata a monte	portata a valle	differenza	perdite
bar	l/h	l/h	l/h	%
0.5	26.95	25.67	1.28	4.75
1	38.21	36.07	2.14	5.60
1.4	46.29	43.59	2.7	5.83
2	54.64	52.91	1.73	3.17

Cercando di stimare una relazione tra la perdita d'acqua e la pressione, si può notare che all'aumentare della pressione aumentano le perdite. Ciò è vero tranne che per 2 bar, in cui inaspettatamente si è registrato un livello di perdite basso.

4.3 Calcolo teorico della portata

Si è cercata in letteratura una relazione per calcolare la portata d'acqua consumata che legghi i principali parametri idraulici coinvolti nell'analisi sperimentale con la pressione, unica grandezza variabile nelle prove. L'equazione di Hazen-Williams è una relazione empirica tra la portata di fluido in una condotta, le proprietà fisiche di questa e la perdita di pressione causata dagli attriti del fluido. La sua equazione, nella forma più adatta a questo lavoro, è la seguente:

$$Q = \left(\frac{10p \cdot C^{1,852} \cdot d^{4,8704}}{10,67 \cdot L} \right)^{\frac{1}{1,852}} \cdot 1000 \cdot 3600 = B \cdot p^{\frac{1}{1,852}}$$

dove:

- p è la pressione in bar della condotta, ipotizzando che 1 bar equivalga ad una colonna d'acqua di dislivello pari a 10 metri;
- Q è la portata in L/h;
- C è il coefficiente di scabrezza. Poiché esso non è funzione del numero di Reynolds, l'equazione è valida solo per l'acqua, di cui non si considera né temperatura né viscosità. Siccome il tubo è in materiale plastico C si è assunto pari a 150;
- d è il diametro interno della condotta in metri, nel nostro caso pari a 0.014m;
- L è la lunghezza della condotta in metri. Questo valore è stato però calcolato a ritroso. Utilizzando le portate calcolate sperimentalmente a monte del pannello, indicate in tabella 4.1, si è calcolata la lunghezza equivalente della condotta per i diversi valori della pressione. Essa non coincide con la lunghezza del tubo del sistema costituito in laboratorio, poiché si dovrebbe tenere conto anche della vasca per il recupero dell'acqua sottostante all'apparato sperimentale. Il valore finale è stato assunto pari alla media di quelli ottenuti, cioè 15489.972m.

In tabella 4.5 sono riportati i valori delle portate misurate sperimentalmente a monte del pannello e di quelle valutate con la formula di Hazen-Williams. Il confronto tra queste dimostra che la formula di Hazen-Williams fornisce un ottimo livello di accuratezza.

Tabella 4.5: confronto tra la portata a monte determinata sperimentalmente e calcolata con la formula di Hazen-Williams.

pressione	portata misurata a monte	portata secondo la formula di HW	precisione
bar	l/h	l/h	%
0.5	26.95	26.11	96.90
1	38.21	37.97	99.37
1.4	46.29	45.53	98.36
2	54.64	55.20	98.98

Pertanto, una volta calcolato $B = 37.97$, si può concludere che:

$$Q = f(p) = B p^{\frac{1}{1,852}} = B p^{0,54} \cong B p^{\frac{1}{2}} = B \sqrt{p}$$

cioè la portata cresce con circa la radice quadrata della pressione e ciò è tanto più vero quanto più la pressione è ridotta.

4.4 Regime di riscaldamento del pannello

Nelle prime prove effettuate sull'apparato sperimentale a disposizione si è cercato di studiare i tempi di reazione con i quali un pannello fotovoltaico si porta a regime quando questo è riscaldato da una lampada posizionata ad un metro o a mezzo metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello. Lo scopo delle prove è quindi valutare il tempo necessario affinché il pannello assuma una temperatura indotta, dalla lampada, di regime, cioè costante da un certo punto in poi.

4.4.1 Riscaldamento del pannello con un faro posizionato ad 1 metro

In figura 4.2 è riportato il grafico di una prova di riscaldamento del pannello con lampada posizionata ad un metro da esso. Per sicurezza, prima di accendere il faro, si è voluto aspettare un'ora per lasciare il tempo alle termocoppie di andare a regime e raggiungere la temperatura ambiente. Una volta acceso il faro, si è lasciato che questo riscaldasse il pannello per due ore, per fare stabilizzare il pannello alla massima temperatura raggiungibile. Infine, spento il faro, si sono aspettate altre due ore circa, in modo tale da lasciare raffreddare il pannello e fare sì che questo si portasse nuovamente alla temperatura ambiente.

Dal grafico si possono osservare diverse cose. Innanzitutto, si può dire che le termocoppie vadano a regime e raggiungano la temperatura ambiente molto prima di un'ora. Pertanto, nelle prove successive si è aspettato sempre di meno, fino a capire poi che sono sufficienti anche soli 5÷10 minuti.

Inoltre, dopo due ore di riscaldamento, la temperatura massima raggiunta dal pannello si è da poco stabilizzata. Quando infatti il faro viene spento (minuto 188), sembra che le curve realizzate dalle tre termocoppie siano orizzontali e quindi la temperatura non debba più aumentare. Tuttavia, per essere sicuri che il pannello fotovoltaico si sia veramente stabilizzato alla massima temperatura raggiungibile, conviene aspettare per un tempo maggiore di due ore.

Il tempo di raffreddamento è invece sufficiente. Dopo quasi due ore, infatti, la temperatura non cala più e si stabilizza così alla temperatura ambiente. Ovviamente, la temperatura ambiente tra l'inizio e la fine della prova non è la stessa, poiché durante le cinque ore di durata della prova (cominciata alle 11 circa e finita alle 16 circa) la temperatura ambiente cresce. Di questo si terrà conto nelle prove successive, anche durante il raffreddamento del pannello tramite film d'acqua.

Infine, si può notare come il faro posto ad un metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello ne abbia aumentato la temperatura di al massimo quasi 8°C. Quando infatti il faro è stato acceso la temperatura ambiente era di 20.8°C, mentre quando è stato spento la termocoppia centrale indicava 28.5°C. Alla fine della prova la temperatura ambiente era invece di 22.2°C. Giustamente la temperatura della termocoppia centrale è sempre leggermente più alta delle altre due termocoppie, avendo il faro che punta direttamente su di essa.

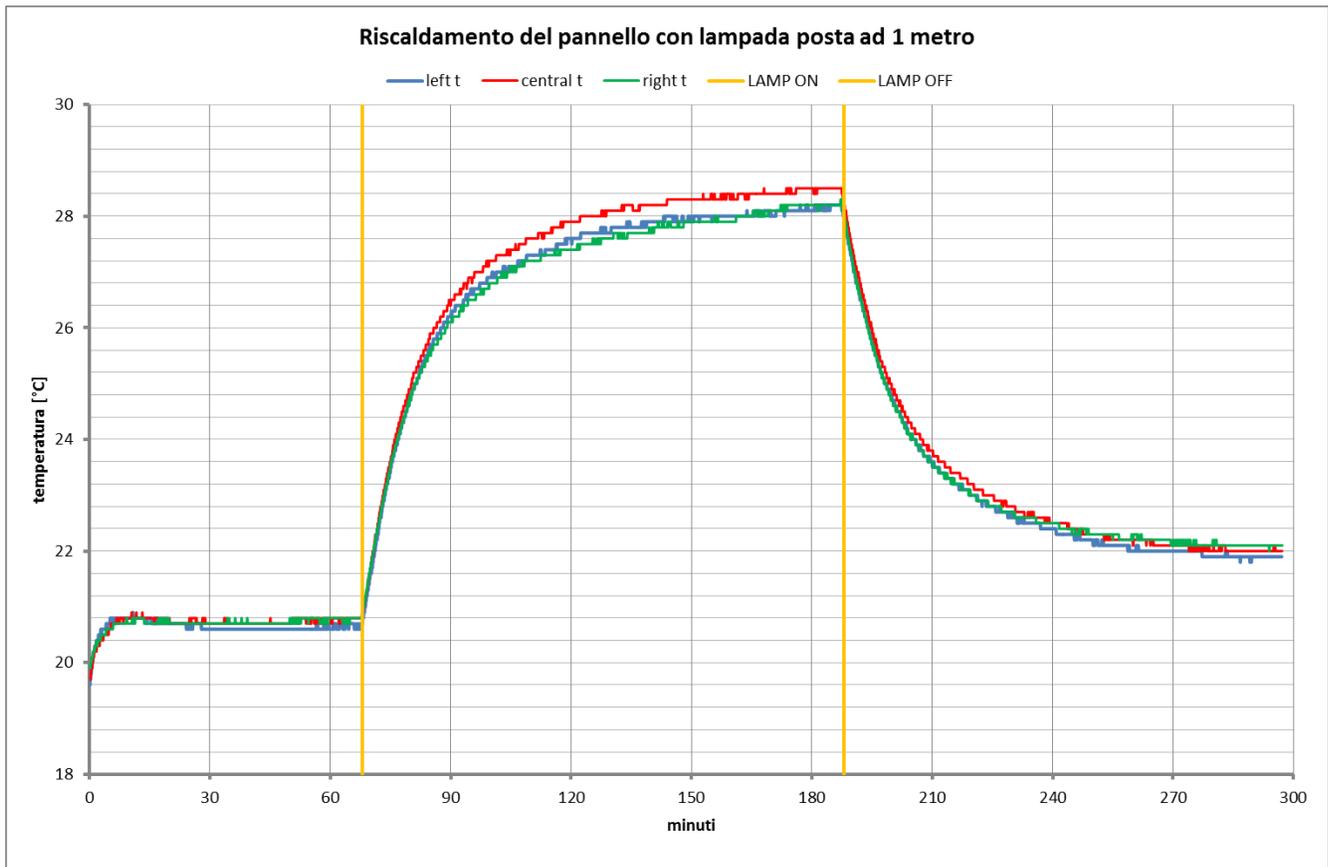


Figura 4.2: riscaldamento del pannello con faro posto ad 1m rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello.

4.4.2 Riscaldamento del pannello con un faro posizionato a 0.5 metri

In figura 4.3 è riportato il grafico di una prova di riscaldamento del pannello con lampada posizionata a mezzo metro da esso. Questa prova è del tutto analoga alla prova precedente, ma i tempi di riscaldamento e raffreddamento del pannello sono stati ulteriormente allungati. Anche in questo caso, prima di accendere il faro, si è voluto aspettare mezz'ora per lasciare il tempo alle termocoppie di andare a regime e raggiungere la temperatura ambiente. Una volta acceso il faro, si è lasciato che questo riscaldasse il pannello per tre ore, così da essere sicuri che il pannello si stabilizzasse alla massima temperatura raggiungibile. Infine, spento il faro, si sono aspettate altre due ore e mezza in modo tale che il pannello tornasse nuovamente alla temperatura ambiente.

Rispetto alla prova precedente, in questa prova risulta subito evidente dal grafico la differenza di temperatura registrata dalle tre termocoppie. Se, come ci si aspetta, la termocoppia centrale rileva sempre una temperatura maggiore rispetto alle altre due, è invece difficile spiegare la differenza di temperatura misurata tra la termocoppia di destra e la termocoppia di sinistra. Inoltre, questa differenza di temperatura è stata riscontrata in molte prove, nelle quali la termocoppia di destra indicava sempre $1\div 2^{\circ}\text{C}$ in meno di quella sinistra, nonostante entrambe misurassero sempre la stessa temperatura ambiente all'inizio e alla fine di ogni prova. Le possibili cause di questo fenomeno sono già state

descritte nel capitolo precedente e possono essere essenzialmente due. In primo luogo, nel fissaggio della termocoppia con del nastro adesivo sul retro del pannello potrebbe essere entrata dell'aria tra il sensore della termocoppia ed il nastro adesivo, aggiungendo così allo scambio termico per conduzione tra il sensore ed il pannello un ulteriore scambio termico per convezione tra il sensore e l'aria. Tuttavia, anche le altre due termocoppie sono state installate allo stesso modo e non presentano particolari alterazioni delle misure. Inoltre, in ogni caso, non appena ci si è accorti dell'andamento della temperatura lievemente diverso per questa termocoppia, tutte e tre le termocoppie sono state nuovamente fissate con estrema attenzione sul retro del pannello e, nonostante ciò, gli andamenti sono rimasti gli stessi. Pertanto, in secondo luogo, questa differenza di temperatura potrebbe dipendere da una taratura diversa della termocoppia di destra rispetto alle altre.

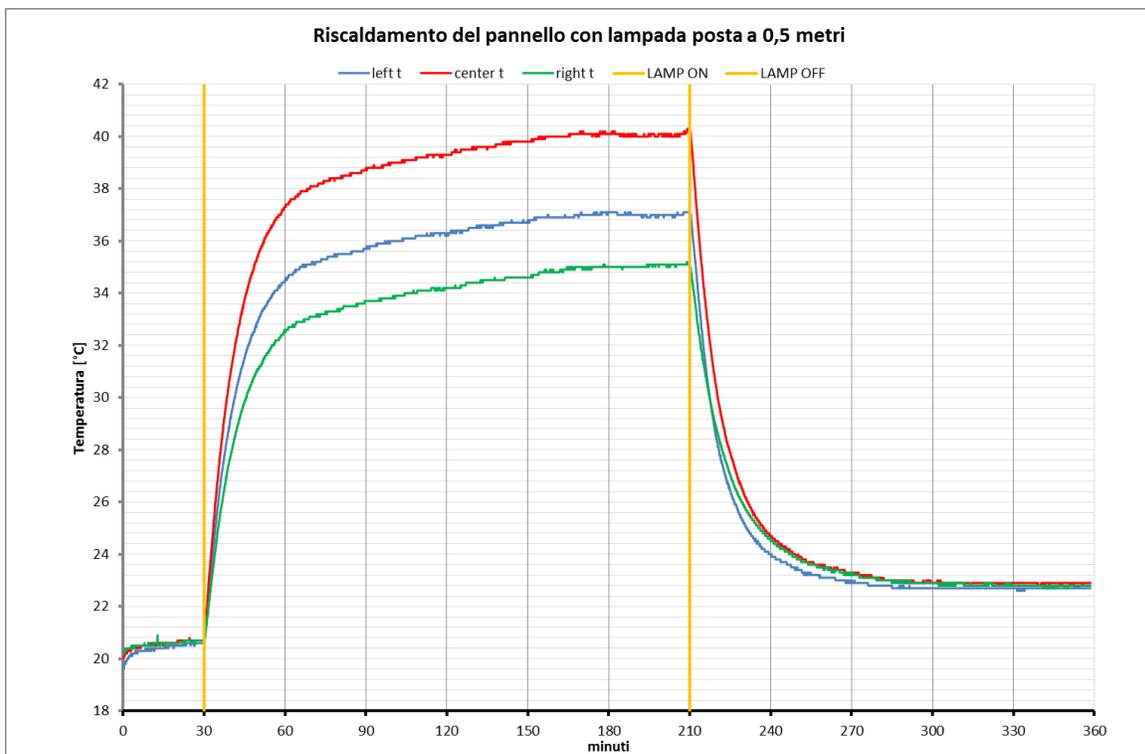


Figura 4.3: riscaldamento del pannello con faro posto a 0.5m rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello.

Dal grafico si vede inoltre che tre ore di riscaldamento sono sicuramente sufficienti affinché la temperatura massima raggiungibile dal pannello si stabilizzi. Quando infatti il faro viene spento (minuto 210) le curve realizzate dalle tre termocoppie sono orizzontali e quindi la temperatura non aumenta più. Tra l'altro, si può notare come il pannello si fosse probabilmente già stabilizzato alla temperatura massima al minuto 180, quindi dopo due ore e mezza di riscaldamento.

Infine, si può osservare come il faro posto a mezzo metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello ne abbia aumentato la temperatura di al massimo quasi 20°C. Quando infatti il faro è stato acceso la temperatura ambiente era di 20.7°C (la stessa della prova precedente), mentre quando è stato

spento la termocoppia centrale indicava 40.2°C. Come ci si aspettava, questo aumento di temperatura è ovviamente molto maggiore rispetto a quello ottenuto con il faro posizionato ad un metro dal pannello ed è più del doppio.

4.5 Regime di raffreddamento del pannello

Analogamente a quanto fatto per le prove di riscaldamento, le prove di raffreddamento del pannello hanno come intento principale quello di cercare di capire i tempi di reazione con i quali un pannello fotovoltaico si porta a regime quando questo è raffreddato da un flusso d'acqua continuo che scorre sulla sua superficie frontale. Lo scopo delle prove è quindi valutare il tempo necessario affinché il pannello assuma una temperatura indotta, dal flusso d'acqua, di regime, cioè costante da un certo punto in poi.

Per effettuare una prova di raffreddamento è però prima necessario riscaldare il pannello e fare sì che esso si stabilizzi alla massima temperatura raggiungibile, come fatto nelle prove di riscaldamento sopra descritte.

In figura 4.4 è riportato il grafico di una prova completa, composta dal riscaldamento del pannello con lampada posizionata a mezzo metro da esso e dal successivo raffreddamento del pannello con un flusso d'acqua continuo alla pressione di 1.5 bar. Dopo i primi venti minuti, nei quali come sempre si è aspettato che le termocoppie andassero a regime portandosi alla temperatura ambiente, si è acceso il faro e si è aspettato per quasi tre ore che questo riscaldasse il pannello, così da essere sicuri di stabilizzarlo alla massima temperatura raggiungibile. Dopo di che, lasciando il faro acceso, si è aperta l'acqua alla pressione di 1.5 bar e si è lasciato per quasi due ore che questa raffreddasse il pannello. L'acqua, infatti, uscendo dai 3 ugelli posizionati sul tubo fissato al bordo superiore del pannello, crea un film che tende a distribuirsi più o meno omogeneamente nella zona in cui le termocoppie sono posizionate e, più in generale, su tutto il pannello.

Dal grafico si può vedere che, dopo un primo quarto d'ora di flusso continuo d'acqua, si ha un primo flesso della temperatura, dove quest'ultima si stabilizza apparentemente intorno ai 29.5°C circa. Tuttavia, successivamente, essa riprende a diminuire per assumere un valore costante intorno ai 24.5°C dopo circa settanta minuti dall'apertura dell'acqua. Questo andamento molto strano della temperatura si è visto anche in altre prove, soprattutto in quelle in cui si è raffreddato il pannello con elevate portate d'acqua e per tempi molto elevati, e sarà indagato in una prova a parte. In ogni caso, nonostante lo strano profilo del raffreddamento, risulta comunque evidente come il pannello impieghi molto meno tempo a raffreddarsi che a scaldarsi. Infatti, se per essere sicuri che il pannello si stabilizzi alla massima temperatura raggiungibile è necessario lasciarlo scaldare per circa tre ore consecutive, affinché il

pannello si porti a regime di raffreddamento, e quindi ad una temperatura costante, sono sufficienti 75÷90 minuti.

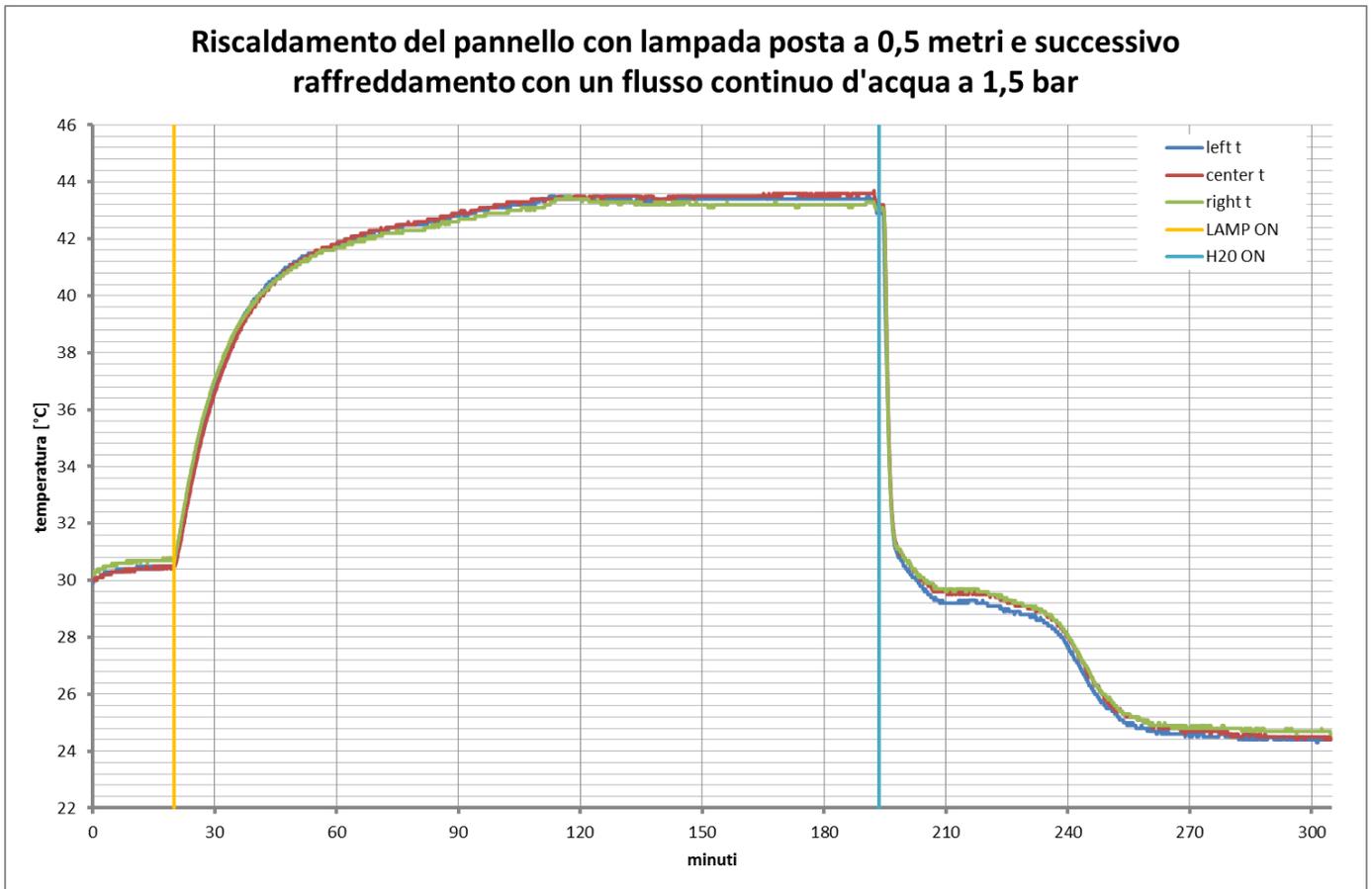


Figura 4.4: prova di riscaldamento, con faro posto a mezzo metro dal pannello, e di raffreddamento, con flusso d'acqua continuo alla pressione di 1.5 bar.

Infine, se si confrontano la fase di riscaldamento della prova riportata in figura 4.4 con quella di figura 4.3, risultano evidenti due cose.

La prima è che, nonostante entrambe le prove siano state effettuate con la lampada posta a mezzo metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello, lo sbalzo termico provocato dalla lampada nella prova di figura 4.4 è nettamente inferiore rispetto a quello provocato nella prova di figura 4.3. Questo è imputabile alla differenza tra le temperature ambiente alle quali si è acceso il faro. Infatti, mentre la prova di figura 4.3 è stata effettuata il 27 settembre e la temperatura ambiente alla quale si è accesa la lampada era di 20.7°C, la prova di figura 4.4 è stata effettuata il 3 agosto e la temperatura ambiente alla quale si è accesa la lampada era di quasi 31°C. Da questo ne deriva che, come ci si aspettava, minore è la temperatura alla quale si accende il faro, maggiore è lo sbalzo termico di

riscaldamento (inteso come la differenza tra la massima temperatura raggiungibile dal pannello e la temperatura di accensione del faro) che si ottiene.

La seconda è invece che, nella prova di figura 4.4, a differenza di quanto accade in quella di figura 4.3, non si vedono differenze tra i valori di temperatura misurati dalle tre termocoppie.

In figura 4.5 è invece riportato il grafico di un'altra prova completa, composta dal riscaldamento e dal raffreddamento del pannello, dove però, questa volta, il riscaldamento avviene con lampada posizionata ad un metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello.

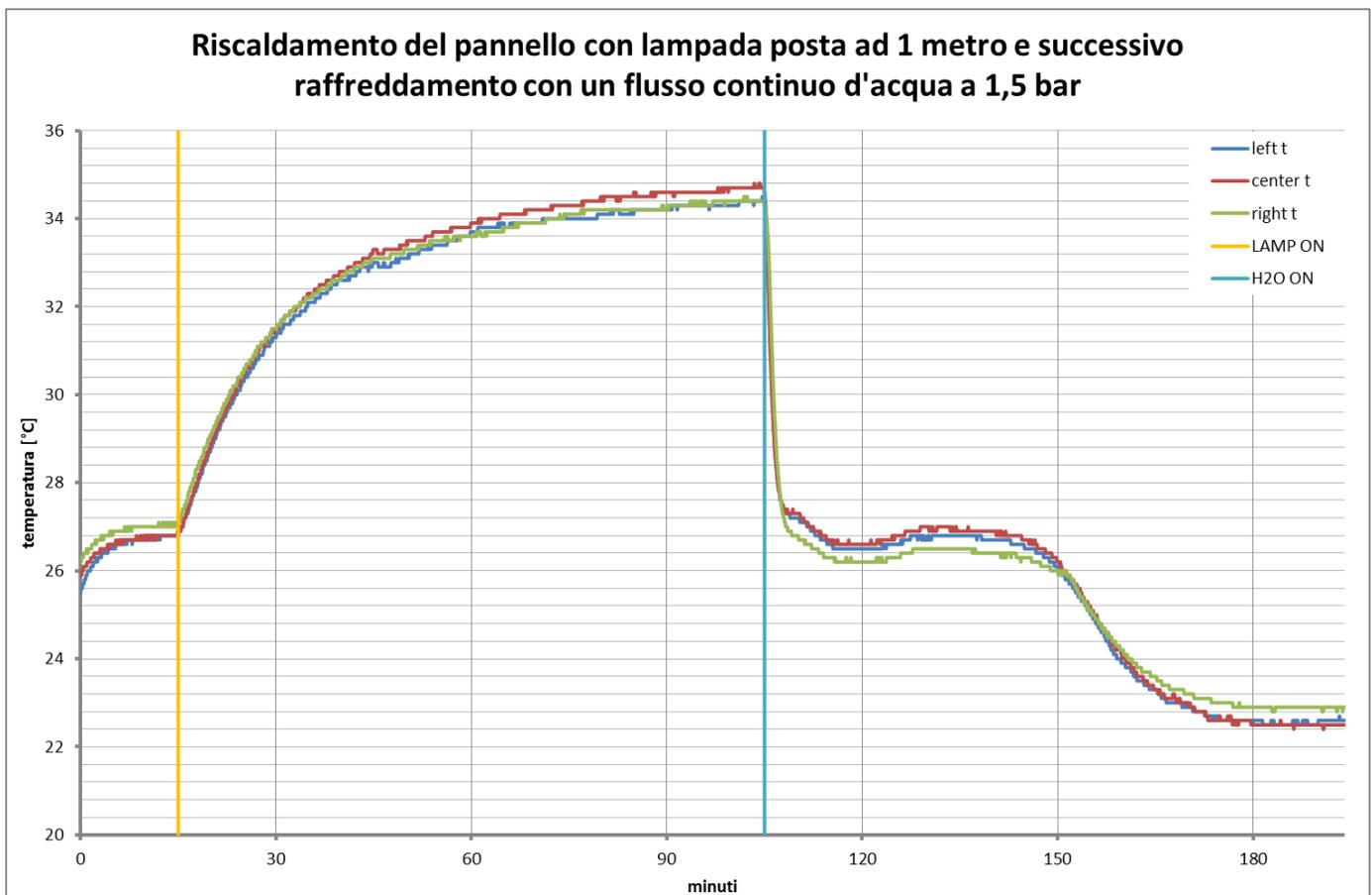


Figura 4.5: prova di riscaldamento, con faro posto ad un metro dal pannello, e di raffreddamento, con flusso d'acqua continuo alla pressione di 1.5 bar.

Anche in questa prova si nota subito lo strano profilo del raffreddamento. Dopo un primo quarto d'ora di flusso continuo d'acqua, si ha infatti un primo flesso della temperatura, dove quest'ultima si stabilizza apparentemente intorno ai 27°C circa. Tuttavia, successivamente, essa riprende a diminuire per assumere un valore costante intorno ai 22.5°C dopo circa settanta minuti dall'apertura dell'acqua. Dal grafico si può inoltre osservare come un'ora e mezza di riscaldamento del pannello non sia sufficiente per stabilizzarlo alla massima temperatura raggiungibile. Allo spegnimento del faro (minuto

105), infatti, i profili di temperatura registrati dalle termocoppie stanno ancora crescendo. Ciò è dunque coerente con quanto detto nel paragrafo precedente.

Infine, in figura 4.6 è riportato l'andamento delle temperature di una prova nella quale sono stati effettuati due cicli completi, composti dal riscaldamento del pannello, con lampada posizionata a mezzo metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello, e successivo raffreddamento, con flusso d'acqua continuo alla pressione di 1 bar.

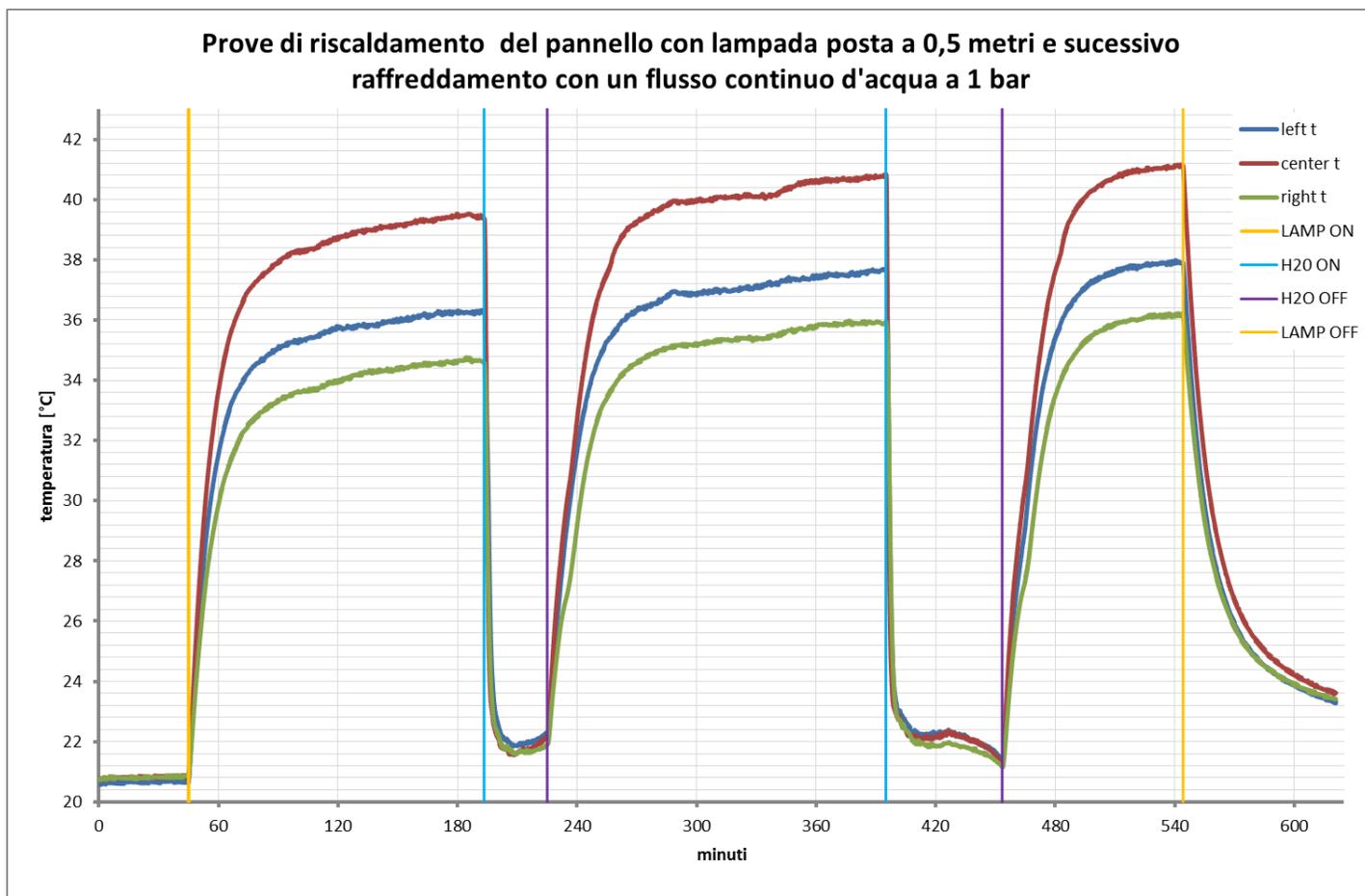


Figura 4.6: due prove complete di riscaldamento, con faro posto a mezzo metro dal pannello, e di raffreddamento, con flusso d'acqua continuo alla pressione di 1 bar.

Dopo 45 minuti, nei quali le termocoppie si sono portate alla temperatura ambiente, si è acceso il faro e si è lasciato riscaldare il pannello per due ore e mezza. Dopo questo tempo, lasciando il faro acceso, si è aperta l'acqua alla pressione di 1 bar e si è lasciato raffreddare il pannello per mezz'ora. Come si vede dal grafico e coerentemente con quanto detto nei paragrafi precedenti, mentre le due ore e mezzo di riscaldamento del pannello sono appena sufficienti per stabilizzare la temperatura del pannello alla massima temperatura raggiungibile, mezz'ora di raffreddamento non lo è. Nel momento in cui l'acqua viene chiusa (minuto 225), infatti, il profilo della temperatura sta salendo per poi probabilmente

scendere nuovamente e formare il flesso visto nelle prove precedenti. Una volta chiusa l'acqua si è aspettato poi per quasi tre ore che la lampada riscaldasse nuovamente il pannello, dopo le quali si è di nuovo aperto l'acqua, raffreddando il pannello per un'ora. Anche in questo caso, un'ora di raffreddamento non è stata sufficiente per stabilizzare la temperatura. Dal grafico si vede infatti che, quando l'acqua viene chiusa (minuto 453), la temperatura sta ancora calando. Questo perché, a differenza di quanto visto nelle prove precedenti, nelle quali l'acqua era erogata alla pressione di 1.5 bar e in circa 70 minuti la temperatura si stabilizzava, in questa prova la pressione dell'acqua è minore e pertanto è minore la portata che raffredda il pannello, dilatando così i tempi per stabilizzare la temperatura. È però ben visibile lo stesso flesso della temperatura che si vedeva nelle prove già descritte e che si sarebbe formato anche nel raffreddamento precedente. Infine, dopo un'ulteriore ora e mezza di riscaldamento del pannello, si è spento il faro e lasciato che il pannello si raffreddasse normalmente, senza utilizzare acqua.

Infine, un'ultima cosa che si può notare dal grafico è come la massima temperatura raggiungibile dal pannello durante i tre regimi di riscaldamento non sia costante, ma aumenti sempre di un minimo all'aumentare delle ore di prova. Questo è dovuto all'aumentare della temperatura ambiente nel corso della giornata e pertanto è ben visibile in una prova di durata di 10 ore.

4.6 Studio del flesso della temperatura nel regime di raffreddamento

Come descritto nel paragrafo precedente, durante il raffreddamento del pannello si è riscontrato più volte uno strano andamento della temperatura. Questa, infatti, dopo una prima diminuzione, sembra apparentemente stabilizzarsi ad una certa temperatura, ma successivamente, man mano che il flusso continuo d'acqua scorre sul pannello, cala ulteriormente, fino poi a stabilizzarsi definitivamente ad una temperatura più bassa della precedente e formando così quello che nel grafico sembra un flesso. Si è inoltre visto che questo flesso si crea soprattutto con elevate portate d'acqua e pertanto per tempi molto elevati.

In figura 4.7 è riportato l'andamento delle temperature di una prova lunga 24 ore, comprensive di 5 ore di riscaldamento del pannello, con faro posizionato a mezzo metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello, e 5 ore di raffreddamento, con un flusso continuo di acqua alla pressione di 1 bar. Scopo di questa prova era appunto capire l'andamento del flesso e verificare se il pannello si portasse alla temperatura dell'acqua (14°C), scendendo così al di sotto della temperatura dell'aria, ovvero della temperatura ambiente.

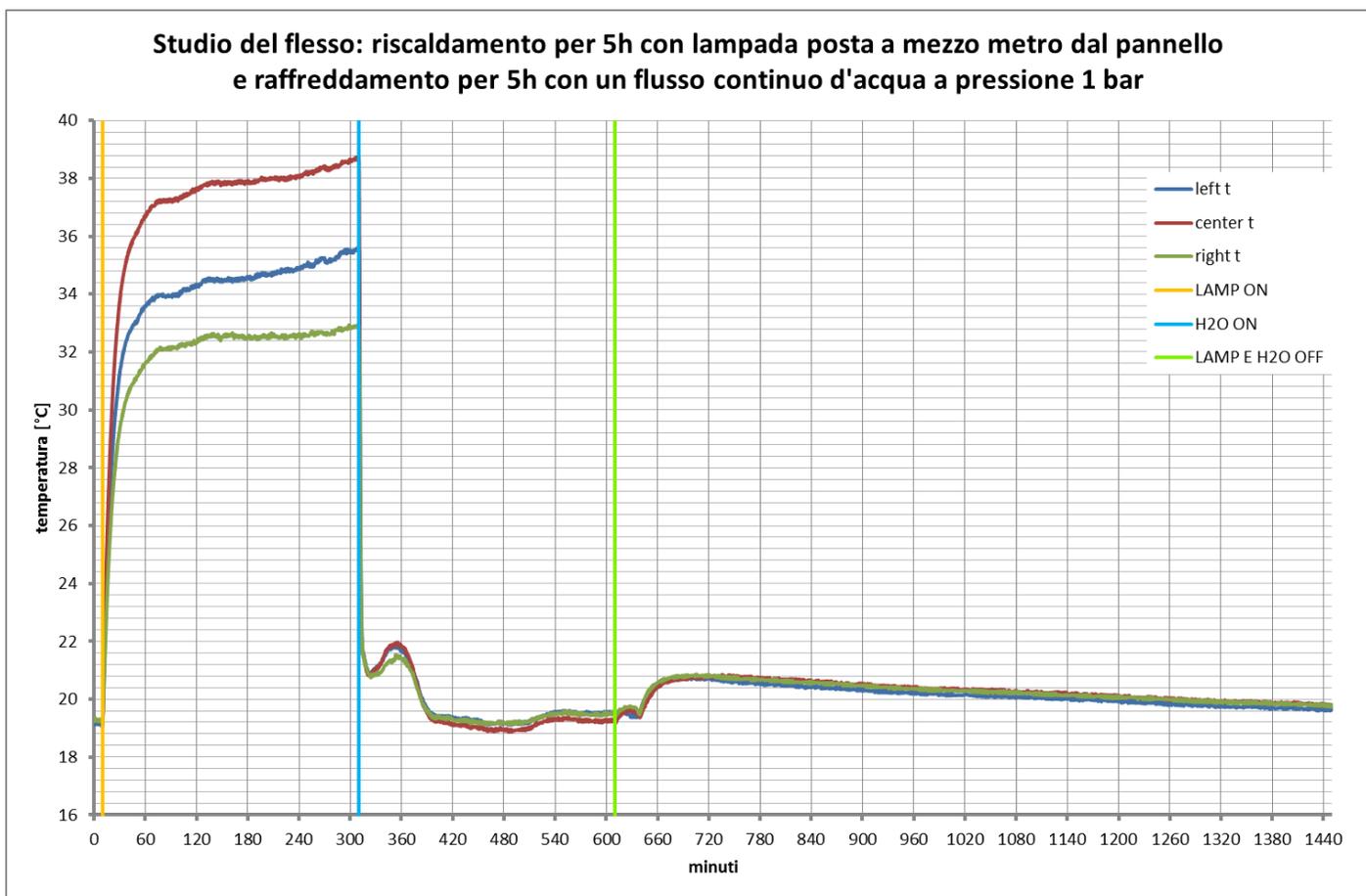


Figura 4.7: prova dalla durata di 24h, comprensive di 5h di riscaldamento del pannello, con lampada posta a 0.5m da esso, e 5h di raffreddamento, con flusso continuo d'acqua ad 1 bar.

Dal grafico si vede chiaramente il flesso di temperatura che si forma poco dopo l'apertura dell'acqua (minuto 310). Zoomando su questa zona, figura 4.8, si osserva che dopo 15 minuti di flusso continuo d'acqua, si ha una prima significativa diminuzione della temperatura, dove quest'ultima si stabilizza apparentemente intorno ai 21°C circa. Tuttavia, successivamente, essa sale di 1°C per poi riprendere nuovamente a diminuire ed assumere un valore costante intorno ai 19°C dopo circa due ore e mezza dall'apertura dell'acqua. Inoltre, intorno al minuto 500, dopo più di 3 ore di raffreddamento continuo del pannello, la temperatura sembra riprendere a salire, probabilmente a causa dell'aumento della temperatura ambiente. Quando l'acqua ed il faro vengono infine spenti (minuto 610), la temperatura del pannello riprende a salire e si attesta alla temperatura ambiente. Questa poi, essendo notte, torna a diminuire.

Una possibile spiegazione alla formazione di questo flesso di temperatura visibile subito dopo il raffreddamento è la seguente. Partendo dalla massima temperatura raggiungibile dal pannello e inondandolo con un flusso continuo d'acqua fredda, la temperatura del pannello scende molto velocemente e presto (15 minuti) si attesta alla temperatura ambiente. Tuttavia, continuando a raffreddare il pannello con un'elevata portata d'acqua fredda, la temperatura del pannello cala ulteriormente, per stabilizzarsi quindi ad una temperatura intermedia tra quella dell'acqua fredda di

raffreddamento (14°C) con cui il pannello è direttamente a contatto e scambia calore per conduzione, e quella dell'aria, ovvero la temperatura ambiente di quel momento, con cui il pannello scambia per convezione.

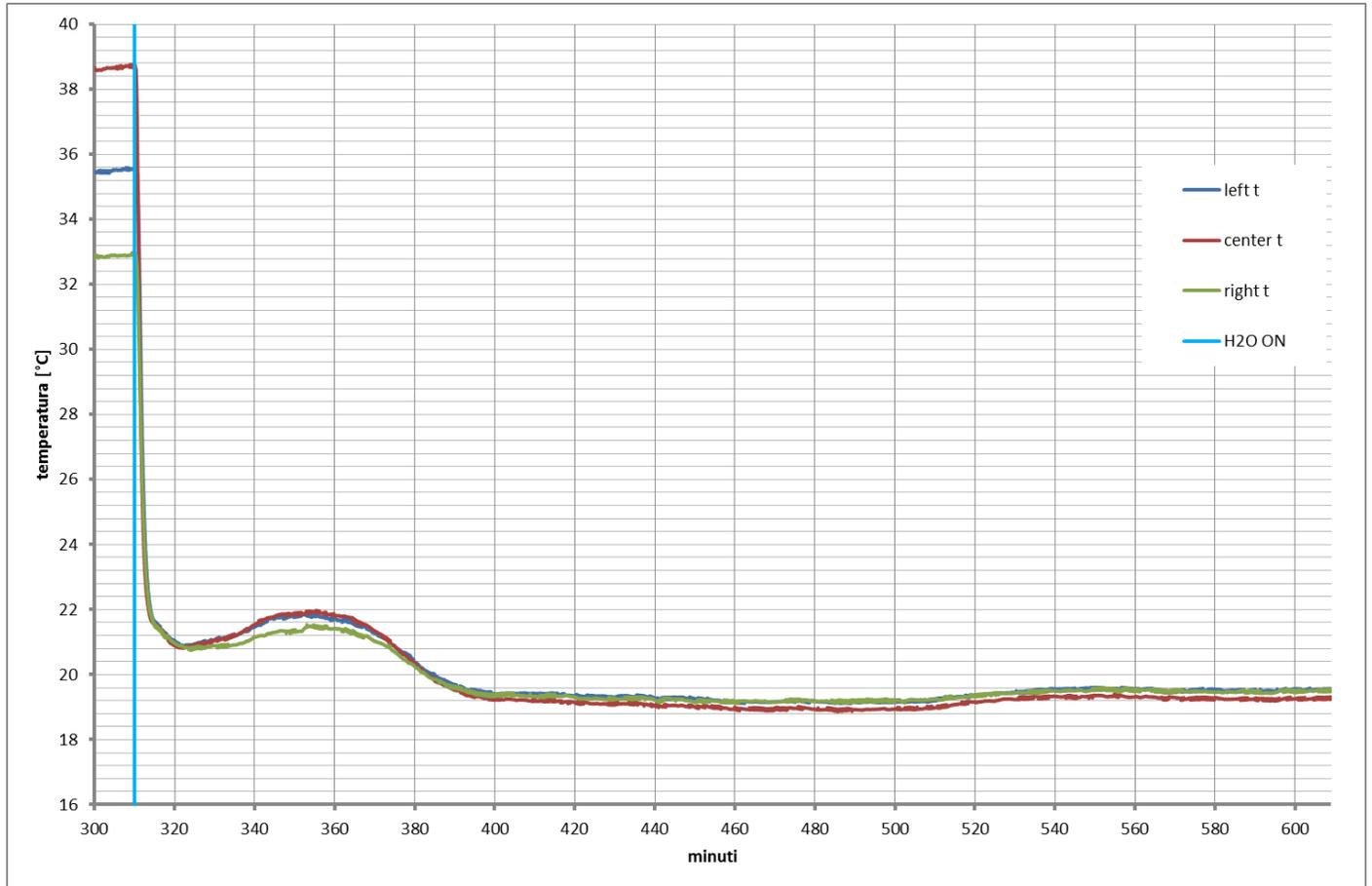


Figura 4.8: zoom della zona del flesso della temperatura di figura 4.7.

L'influenza della temperatura ambiente sull'andamento della temperatura del pannello si può vedere anche guardando al regime di riscaldamento della prova. Infatti, durante le cinque ore di riscaldamento continuo, la temperatura del pannello sembra prima stabilizzarsi alla massima temperatura raggiungibile, ma poi continua ad aumentare. Questo successivo aumento della temperatura durante il riscaldamento è dovuto al contemporaneo aumento della temperatura ambiente.

4.7 Conclusioni prima parte analisi sperimentale

In questo paragrafo si riassumono le conclusioni ottenute nei paragrafi precedenti, a seguito delle misure di portata a monte ed a valle del pannello, delle prove di riscaldamento, con faro posizionato ad un metro oppure a mezzo metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello, e di quelle di raffreddamento, con flusso d'acqua continuo a diverse pressione:

- per perdita di portata si intende la quota di acqua fornita al pannello che non viene raccolta a valle dello stesso, risultando perciò dispersa per vari fattori. Tra questi, il principale è la perdita di portata lateralmente al pannello. Tuttavia, se invece che di un unico pannello si avesse a disposizione una serie di pannelli, questa quantità di fluido andrebbe semplicemente a partecipare al raffreddamento del pannello adiacente, aiutando così ad abbassarne la temperatura;
- il tempo necessario affinché il pannello assuma una temperatura indotta di regime, ovvero costante nel tempo e pari alla massima temperatura raggiungibile, quando questo è riscaldato da un faro posizionato ad un metro rispetto la perpendicolare condotta dal suo centro, è di almeno due ore;
- anche il tempo necessario affinché il pannello assuma una temperatura indotta di regime, ovvero costante nel tempo e pari alla massima temperatura raggiungibile, quando questo è riscaldato da un faro posizionato a mezzo metro rispetto la perpendicolare condotta dal suo centro, è di almeno due ore;
- il pannello impiega sicuramente molto meno tempo a raffreddarsi che a scaldarsi. Tuttavia, il tempo affinché questo si porti a regime di raffreddamento, ovvero si stabilizzi ad una temperatura costante, dipende dalla portata d'acqua utilizzata e quindi dalla sua pressione;
- durante il raffreddamento del pannello si è riscontrato più volte uno strano andamento della temperatura. Questa, infatti, dopo una prima diminuzione, sembra apparentemente stabilizzarsi ad una certa temperatura, ma successivamente, man mano che il flusso continuo d'acqua scorre sul pannello, cala ulteriormente, fino poi a stabilizzarsi definitivamente ad una temperatura più bassa della precedente e formando così quello che nel grafico sembra un flesso. Una possibile spiegazione a questo fenomeno è riportata nel paragrafo 4.6;
- l'andamento della temperatura del pannello è fortemente influenzato dalla temperatura ambiente. Riscaldando e raffreddando il pannello per tempi molto lunghi, infatti, la sua temperatura risente del contemporaneo aumento o riduzione della temperatura ambiente. Questo rende ancora più difficile stabilizzare il pannello ad una certa temperatura e portarlo a regime. Inoltre, maggiore è la temperatura ambiente e minore è lo sbalzo termico (inteso come la differenza di temperatura tra la massima temperatura raggiungibile dal pannello e la temperatura ambiente stessa) che si riesce ad ottenere riscaldando il pannello.

Capitolo 5

Analisi sperimentale: seconda parte

In questo capitolo viene descritta la seconda parte delle prove effettuate. Come determinato nella prima parte dell'analisi sperimentale, mentre il riscaldamento del pannello presenta tempi lunghi, il suo raffreddamento è un processo più veloce. Questa seconda parte di prove ha dunque come scopo determinare un intervallo di tempo che ottimizzi la temperatura del pannello, evitandone valori elevati, e che garantisca un consumo d'acqua sostenibile e giustificato dall'incremento di rendimento che il raffreddamento comporta. Sono stati pertanto effettuati, al variare della pressione, diversi cicli di raffreddamento-riscaldamento del pannello, aprendo (ON) e chiudendo (OFF), a diversi intervalli temporali, il flusso d'acqua uscente dai tre ugelli.

5.1 Tipologie di prove

Ogni prova di questa seconda parte dell'analisi sperimentale è costituita da un ciclo di on/off. Per ciclo di on/off si intende una successione ciclica di aperture e di chiusure del rubinetto che regola il flusso d'acqua che bagna il pannello. Il flusso d'acqua è quindi aperto per un determinato intervallo di tempo e poi chiuso per un altro intervallo, che non è necessariamente uguale al precedente. Questo singolo ciclo di raffreddamento-riscaldamento del pannello viene poi ripetuto costante per n volte.

Mantenendo sempre costanti il numero di ugelli che bagna la superficie del pannello, l'inclinazione del pannello stesso e la temperatura dell'acqua di raffreddamento, le possibili variabili tra un ciclo di on/off ed un altro sono:

- l'altezza del faro, posizionato ad un metro o a mezzo metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello;
- il momento in cui iniziare il ciclo. Il ciclo può infatti cominciare quando il pannello si trova alla massima temperatura raggiungibile, ovvero a regime, oppure nel momento stesso in cui si accende il faro;
- il tempo di apertura dell'acqua (tempo di H_2O on);
- il tempo di chiusura dell'acqua (tempo di H_2O off);
- la pressione alla quale viene erogata l'acqua;
- il numero totale di cicli effettuati.

Visto l'elevato numero di variabili in gioco, sono state effettuate numerose prove diverse tra di loro. Molte di queste sono servite a correggere e migliorare le prove precedenti. Per ogni prova effettuata è stata inoltre raccolta l'acqua utilizzata per raffreddare il pannello e pesata su una bilancia presente in laboratorio. Dal peso dell'acqua si è ricavata la portata e quindi il consumo di acqua.

Nei paragrafi successivi sono dunque descritte le prove effettuate. Queste potevano essere classificate in diversi modi: a seconda dell'altezza a cui è posizionato il faro, a seconda della pressione dell'acqua oppure a seconda del numero di cicli. Si è scelto di classificarle a seconda del tempo di apertura e di chiusura dell'acqua e della posizione del faro.

5.2 Ciclo 60 secondi on - 60 secondi off, con faro ad un metro

In figura 5.1 è riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova di ciclo 60 secondi H₂O on – 60 secondi H₂O off, con faro posizionato ad un metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello e acqua di raffreddamento alla pressione di 1 bar.

Dopo aver aspettato che il faro portasse il pannello ad una temperatura di regime costante, sono state accese le termocoppie. Dopo dieci minuti di rilevamento, si è fatto partire il primo ciclo: viene mantenuto aperto il flusso d'acqua sulla superficie del pannello per 60 secondi e alla pressione di 1 bar, trascorsi i quali viene chiuso il rubinetto (mantenendo costante la pressione) per altri 60 secondi. Sono stati compiuti complessivamente 16 cicli, numero inizialmente ritenuto sufficiente per stabilizzare il pannello alla temperatura minima raggiungibile. Finiti i 16 cicli, si è lasciato poi che per un'ora il faro riscaldasse nuovamente il pannello. Alla fine della prova è stata poi pesata l'acqua impiegata nel raffreddamento, risultante pari a 29.5 kg, ovvero 1.84 kg/min, equivalenti ad una portata di 36.9 l/h per ugello. Questa è coerente, con un minimo margine di errore, a quanto determinato nel capitolo precedente (portata a valle del pannello misurata per 1 bar pari a 36.07 l/h per ugello).

Zoomando il grafico nella zona dei cicli, figura 5.2, si può facilmente osservare come i primi tre cicli di on/off siano sufficienti per abbassare notevolmente la temperatura del pannello. Se, infatti, prima dell'inizio del primo ciclo (minuto 10) la temperatura misurata dalla termocoppia centrale era di 32.3°C, pari alla massima temperatura raggiungibile dal pannello, dopo soli tre cicli di 60 secondi di apertura dell'acqua alla pressione di 1 bar e 60 secondi di chiusura dell'acqua, la temperatura del pannello è scesa a circa 25°C. Nei successivi cicli di raffreddamento-riscaldamento la temperatura cala ulteriormente, ma molto più lentamente e soprattutto non significativamente come nei primi 3. Mentre con i primi 3 cicli si ottiene infatti un abbassamento della temperatura del pannello di circa 7°C, dal quarto al sedicesimo ciclo la temperatura diminuisce solo di 1°C. Tuttavia, dopo 16 cicli di on/off, la temperatura del pannello non si è ancora stabilizzata ad un valore ben preciso, ma sembra poter diminuire ulteriormente se si aumenta il numero di cicli.

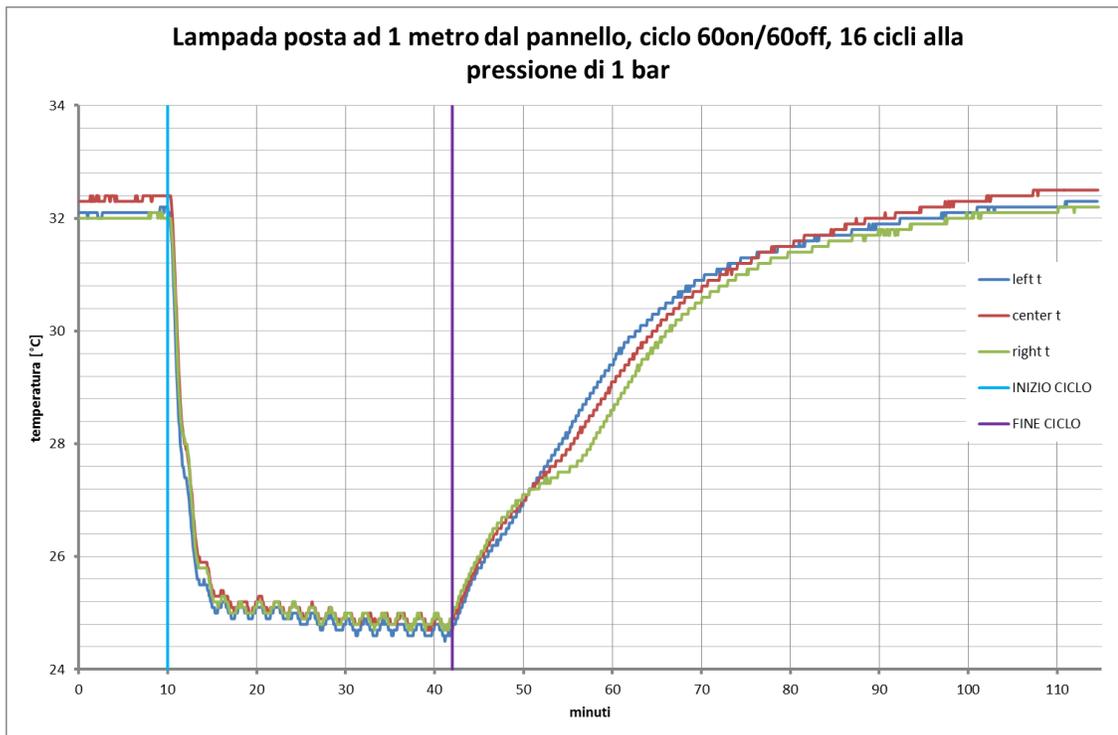


Figura 5.1: 16 cicli di 60 secondi H₂O on – 60 secondi H₂O off , con lampada posta ad 1 metro dal pannello e pressione pari a 1 bar.

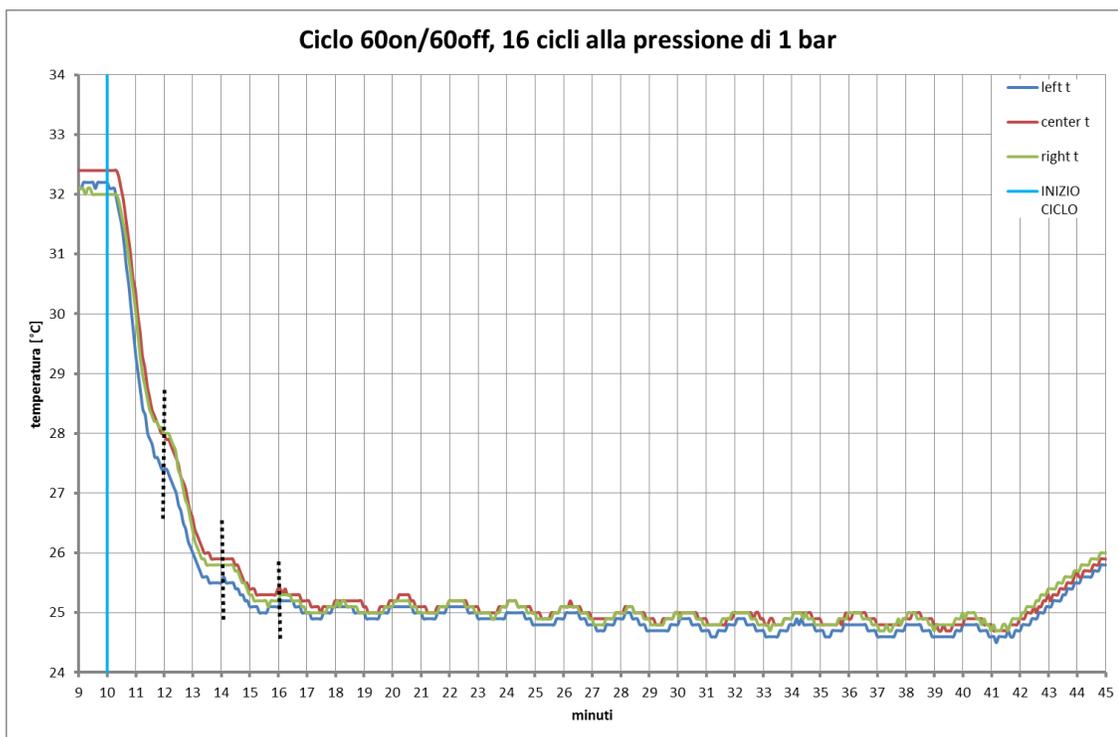


Figura 5.2: zoom della zona dei cicli di figura 5.1. Le linee tratteggiate indicano la fine del I, II e III ciclo rispettivamente.

Dalla figura 5.2 si può infine notare come, mentre per i primi tre cicli la fase di riscaldamento del pannello non sia visibile e sembra che il ciclo sia composto solamente dal raffreddamento del pannello, dal quarto al sedicesimo ciclo sono invece visibili sia la fase di raffreddamento che quella di

riscaldamento del pannello e si vede chiaramente diminuire ed aumentare di mezzo grado la temperatura.

In figura 5.3 è invece riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova di ciclo 60 secondi H₂O on – 60 secondi H₂O off del tutto analoga a quella precedente, ma nella quale l'acqua di raffreddamento non viene più erogata alla pressione di 1 bar, ma a 1.5 bar.

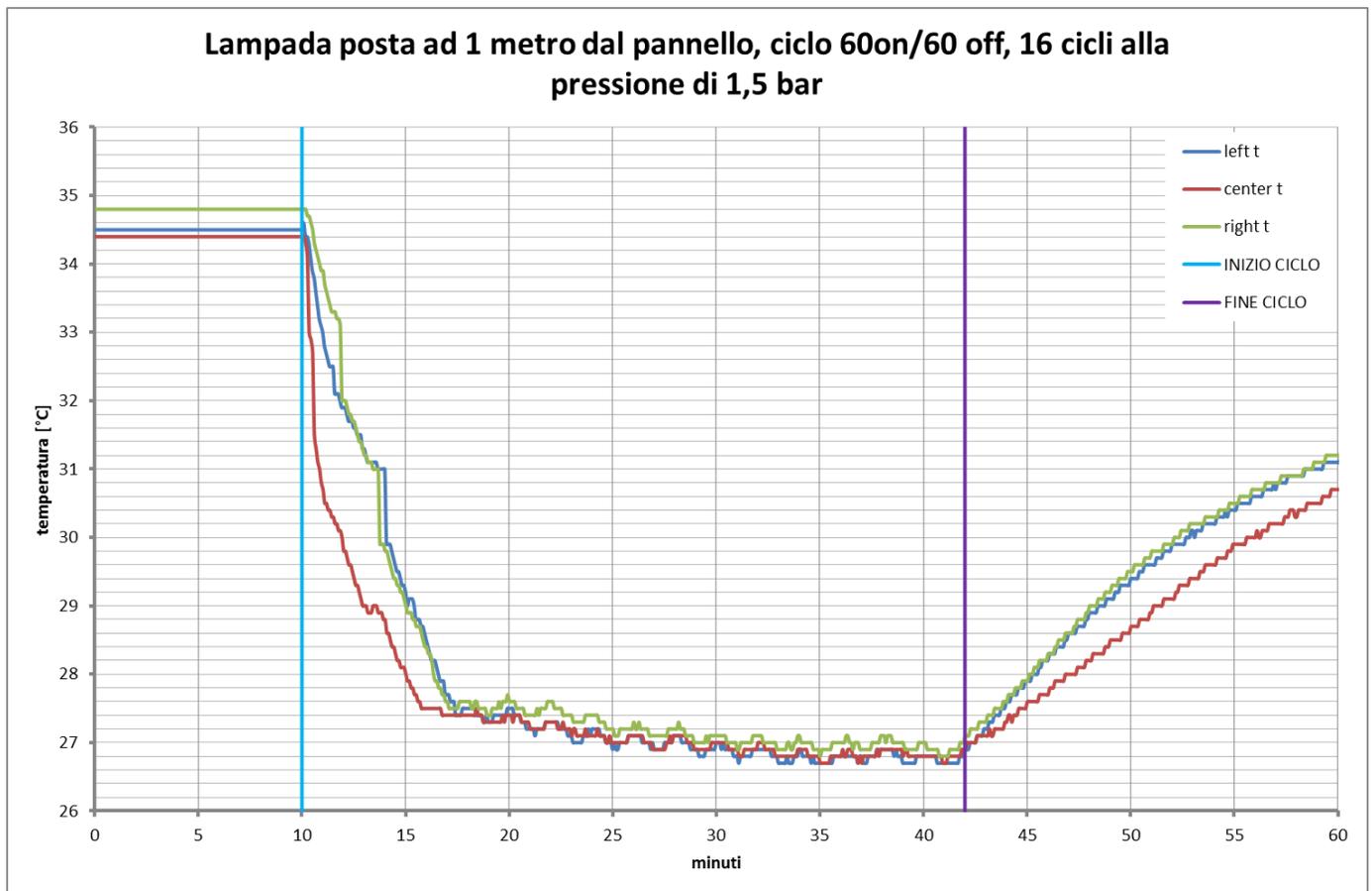


Figura 5.3: 16 cicli di 60 secondi H₂O on – 60 secondi H₂O off , con lampada posta ad 1 metro dal pannello e pressione pari a 1.5 bar.

Nonostante in questa prova il campionamento della temperatura avvenga ogni 5 secondi e non ogni secondo come nella prova precedente e pertanto il numero di rilevamenti sia molto inferiore, si può comunque vedere come, anche in questo caso, il salto termico maggiore avvenga durante i primi tre cicli di on/off. Se, infatti, nel momento dell'apertura dell'acqua la temperatura del pannello è di circa 34.5°C, pari alla massima temperatura raggiungibile, dopo soli tre cicli questa è scesa a 27.5°C, effettuando dunque un salto termico di circa 7°C. Dal quarto al sedicesimo ciclo, invece, si ha uno sbalzo termico minore di 1°C.

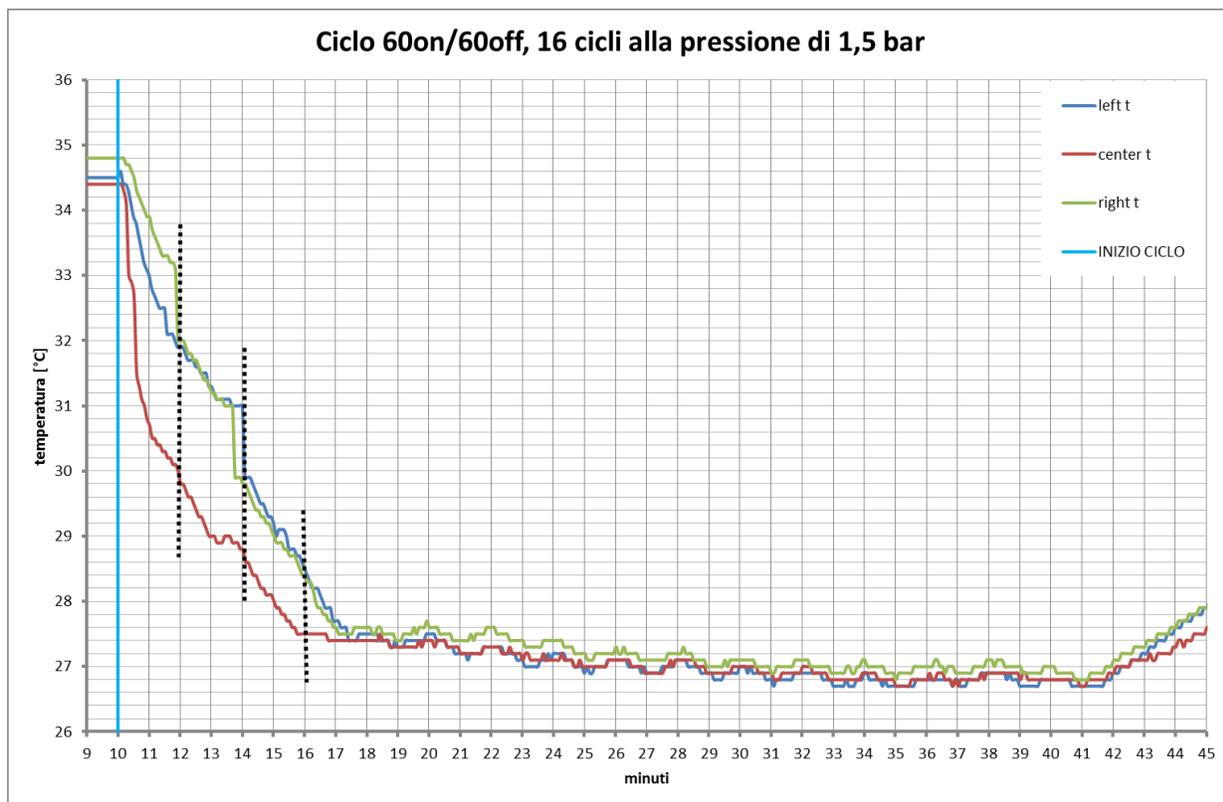


Figura 5.4: zoom della zona dei cicli di figura 5.3. Le linee tratteggiate indicano la fine rispettivamente del I, II e III ciclo.

Anche in questa prova, come in tutte quelle che verranno descritte in questo capitolo, è stata pesata l'acqua impiegata nel raffreddamento, pari a 39 kg, corrispondenti a 2.43 kg/min, equivalenti ad una portata di 48.8 l/h per ugello. Come nella prova precedente, la portata misurata è coerente con quella che era stata misurata nel capitolo 4 a valle del pannello e alla stessa pressione.

Infine, in figura 5.5 è riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova di ciclo 60 secondi H₂O on – 60 secondi H₂O off, nella quale l'acqua di raffreddamento viene erogata alla pressione di 2 bar.

Anche questa prova conferma quanto detto nelle due prove precedenti. In figura 5.6 si può infatti osservare come dopo i primi tre cicli di raffreddamento-riscaldamento la temperatura del pannello sia scesa da 31.5°C, massima temperatura di regime raggiungibile, a quasi 25°C. Dal quarto al sedicesimo ciclo di on/off, invece, la diminuzione della temperatura è solamente di 1°C. Inoltre, come previsto, dopo 16 cicli la temperatura del pannello non si è ancora stabilizzata ad un valore ben preciso, ma sembra poter diminuire ulteriormente se si aumenta il numero di cicli.

Alla fine di questa prova il peso dell'acqua utilizzata per il raffreddamento del pannello è risultato essere di 41.4 kg, ovvero 2.58 kg/min, equivalenti ad una portata di 51.9 l/h per ugello. Anche in questo caso la portata d'acqua è coerente con quella determinata nelle prove di portata a valle del pannello per 2 bar, che risultava essere di 52.91 l/h per ugello.

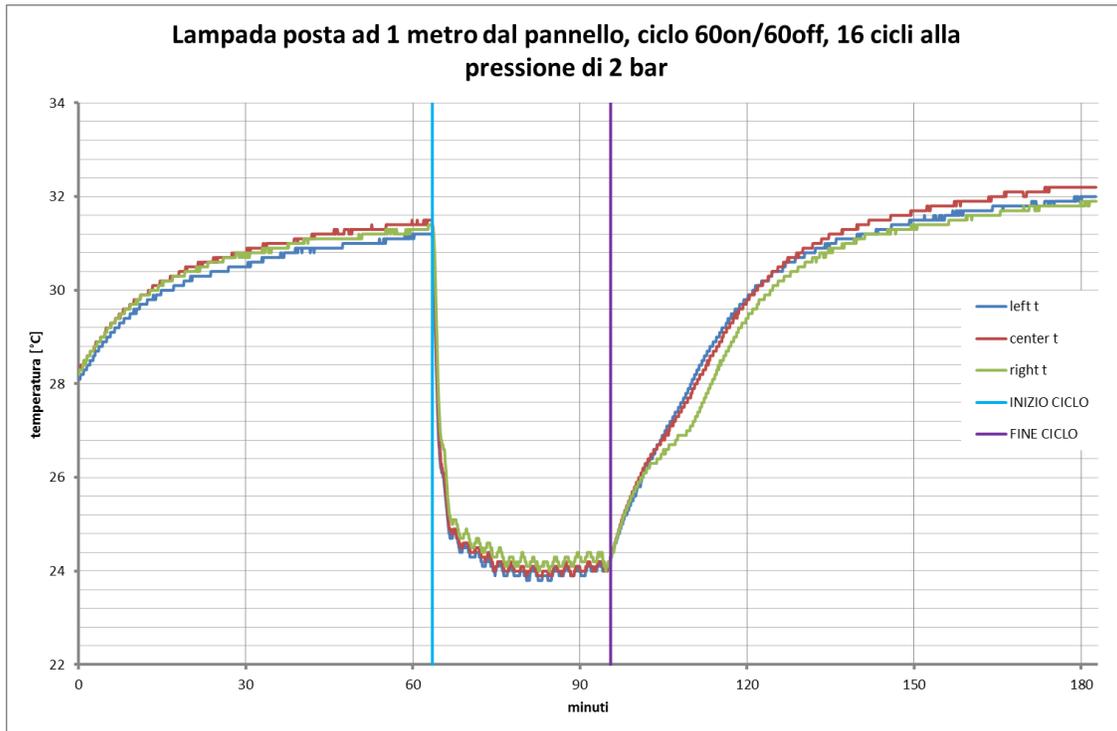


Figura 5.5: 16 cicli di 60 secondi H₂O on – 60 secondi H₂O off , con lampada posta ad 1 metro dal pannello e pressione pari a 2 bar.

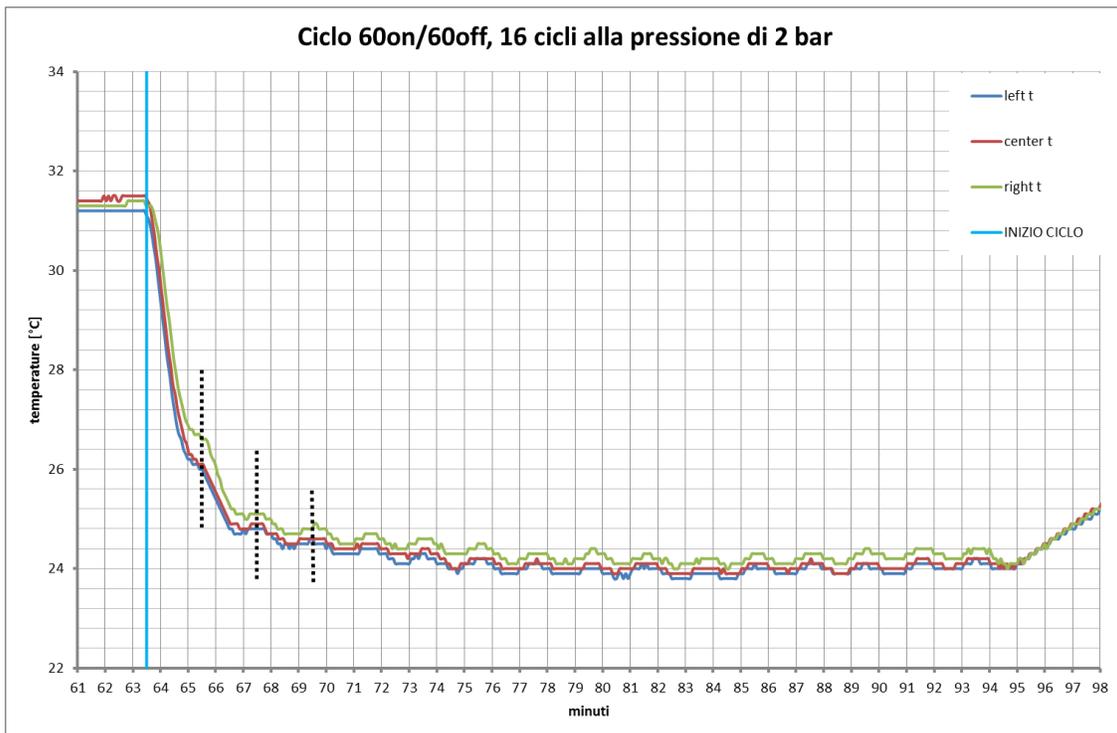


Figura 5.6: zoom della zona dei cicli di figura 5.5. Le linee tratteggiate indicano la fine del I, II e III ciclo rispettivamente.

Come si può vedere confrontando l'andamento delle temperature per le tre prove di 60 secondi H₂O on – 60 secondi H₂O off effettuate con una lampada posizionata ad un metro rispetto la perpendicolare

condotta dal centro del pannello, ma con acqua di raffreddamento erogata a pressioni diverse, il salto termico ottenuto tra la massima temperatura di regime raggiungibile dal pannello e la temperatura alla fine dei cicli è circa lo stesso per ogni prova, cioè $7\div 8^{\circ}\text{C}$. Pertanto, si può dire che all'aumentare della pressione dell'acqua di raffreddamento, e quindi della sua portata, non aumenta la differenza di temperatura ottenibile. Di conseguenza conviene erogare l'acqua di raffreddamento alla pressione più bassa, in modo da consumare meno acqua possibile. Inoltre, ad una diminuzione della temperatura superficiale del pannello di $7\div 8^{\circ}\text{C}$ corrisponde un miglioramento attendibile delle prestazioni di circa il 3%.

5.3 Ciclo 60 secondi on – 120 secondi off, con faro ad un metro

In figura 5.7 è riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova di ciclo 60 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off, con faro posizionato ad un metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello e acqua di raffreddamento alla pressione di 1 bar.

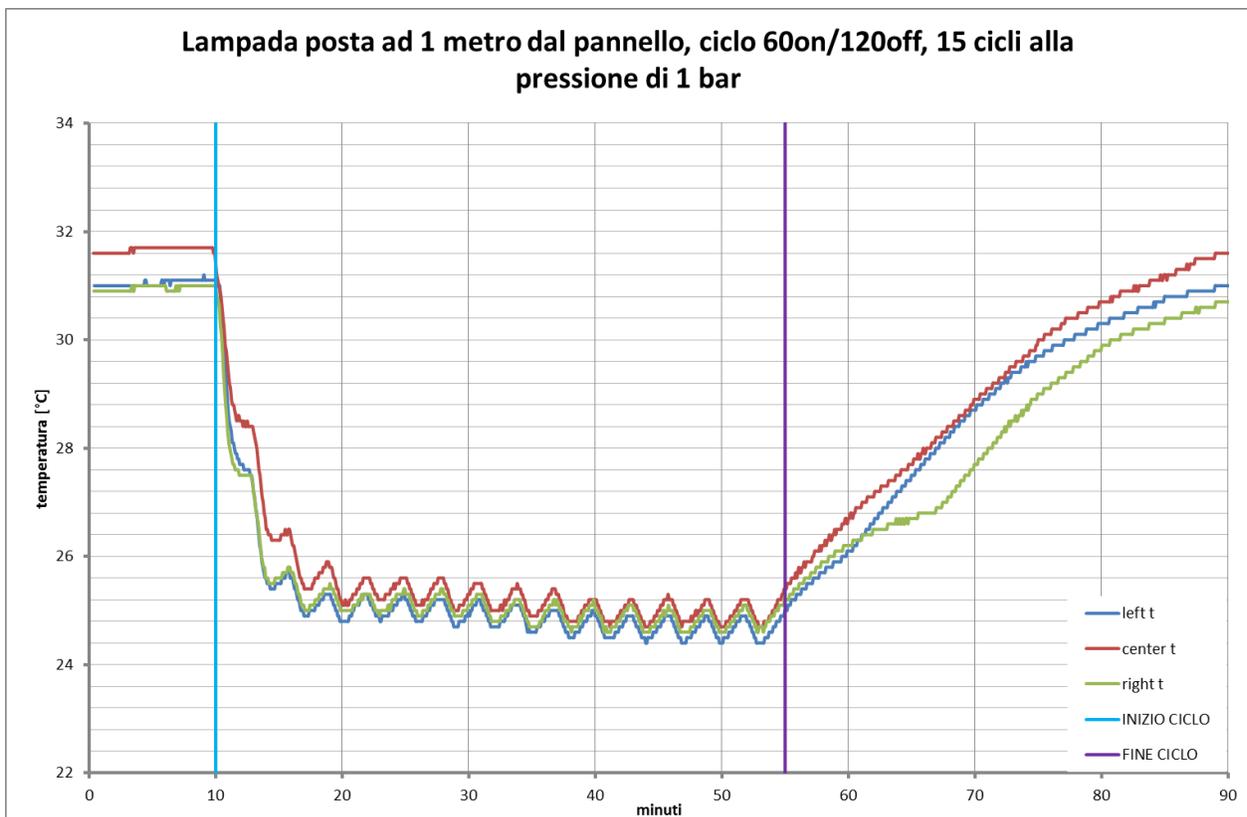


Figura 5.7: 15 cicli di 60 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off , con lampada posta ad 1 metro dal pannello e pressione pari a 1 bar.

Dopo aver aspettato che il faro portasse il pannello ad una temperatura di regime costante, sono state accese le termocoppie. Dopo dieci minuti di rilevamento, si è fatto partire il primo ciclo: viene

mantenuto aperto il flusso d'acqua sulla superficie del pannello per 60 secondi e alla pressione di 1 bar, trascorsi i quali viene chiuso il rubinetto (mantenendo costante la pressione) per 120 secondi. Sono stati compiuti complessivamente 15 cicli.

Anche in questa prova, zoomando il grafico nella zona dei cicli, figura 5.8, si può facilmente osservare come dopo i primi 3 cicli di on/off la temperatura del pannello sia notevolmente diminuita. Se, infatti, prima dell'inizio del primo ciclo (minuto 10) il pannello si trovava alla temperatura di circa 31°C, pari alla massima temperatura raggiungibile, dopo soli tre cicli di 60 secondi di apertura dell'acqua alla pressione di 1 bar e 120 secondi di chiusura dell'acqua, la temperatura è scesa a circa 25°C, compiendo così un salto termico di quasi 6°C. Nei successivi cicli di raffreddamento-riscaldamento la temperatura cala ulteriormente, ma molto più lentamente e soprattutto non significativamente come nei primi tre cicli.

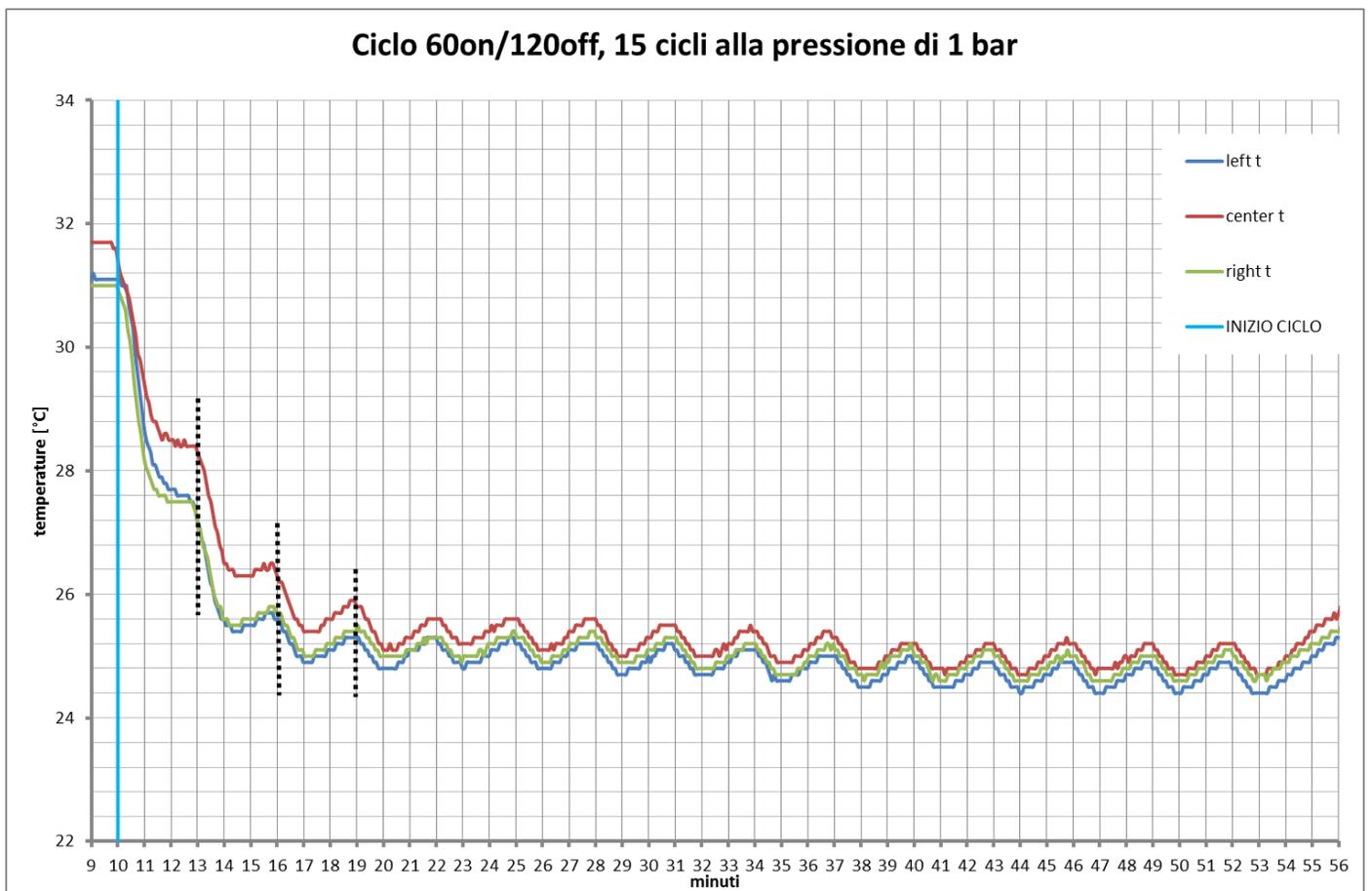


Figura 5.8: zoom della zona dei cicli di figura 5.7. Le linee tratteggiate indicano la fine del I, II e III ciclo rispettivamente.

Un'ultima cosa che si può notare dal grafico è come dal terzo ciclo (compreso) in poi siano ben visibili sia la fase di raffreddamento che quella di riscaldamento di ogni singolo ciclo. Al contrario delle prove del paragrafo precedente, nelle quali il tempo di chiusura dell'acqua era di 60 secondi e non di 120, la temperatura del pannello ha un tempo maggiore per risalire e quindi i salti termici compiuti durante ogni singolo ciclo sono più marcati e si distinguono chiaramente. Questo maggior tempo di risalita della temperatura ha però un minimo effetto anche sui primi tre cicli di on/off: se, infatti, nella prova di figura 5.2 il salto termico provocato dai primi tre cicli era di 7°C, ora esso è di soli 6°C.

Alla fine della prova è stata poi pesata l'acqua utilizzata, pari a 27.7 kg, ovvero 1.84 kg/min, equivalenti ad una portata di 37 l/h per ugello. Questa è praticamente uguale a quella misurata nella prova ad 1 bar descritta nel paragrafo precedente e quindi anche coerente con quella misurata a valle del pannello nel capitolo 4.

In figura 5.9 è invece riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova di ciclo 60 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off, con faro posizionato ad un metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello e acqua di raffreddamento alla pressione di 1.5 bar.

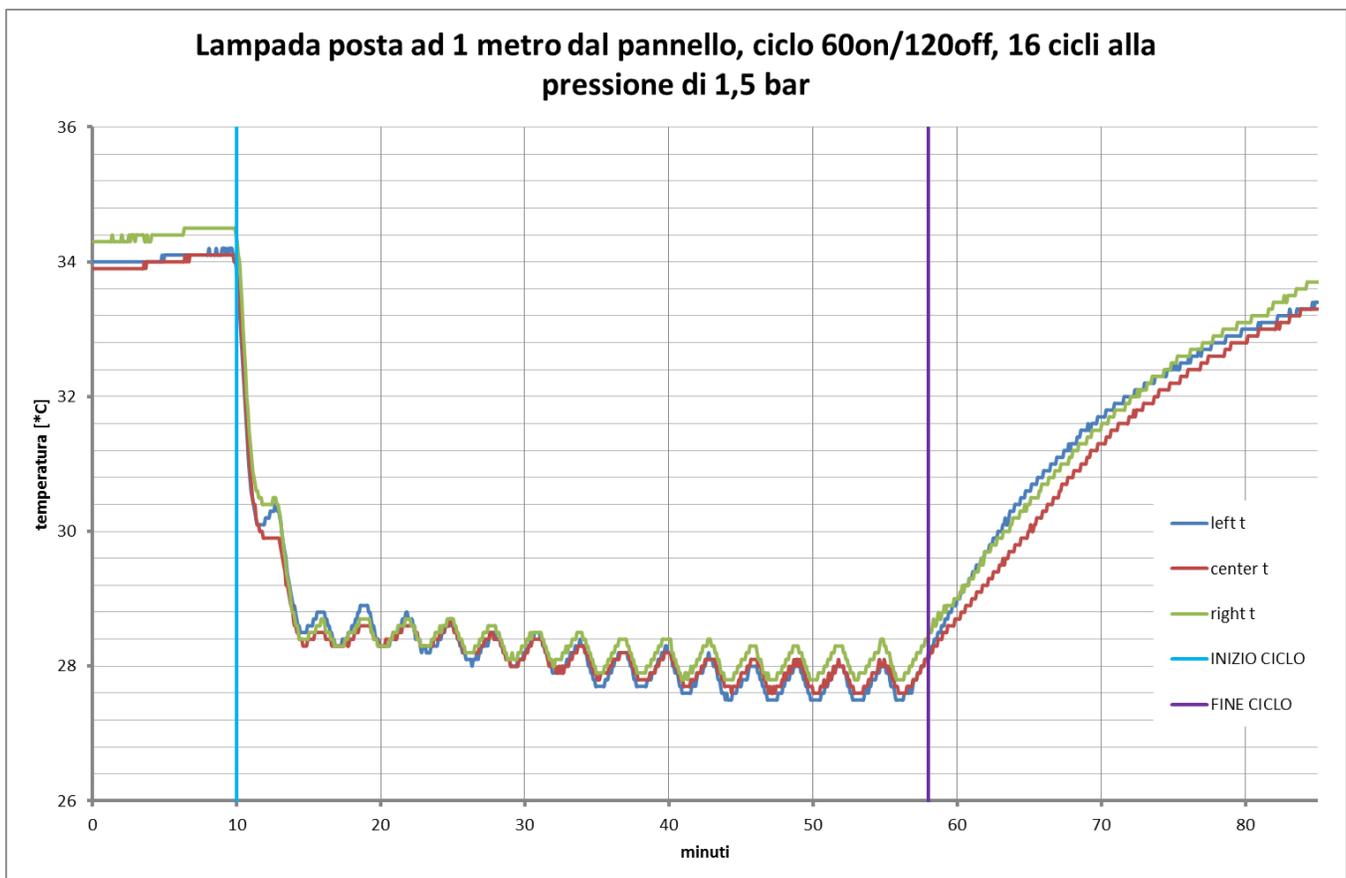


Figura 5.9: 16 cicli di 60 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off , con lampada posta ad 1 metro dal pannello e pressione pari a 1.5 bar.

Come si è visto nelle prove precedenti, anche in quest'ultima sono sufficienti 2 cicli di on/off per abbassare significativamente la temperatura del pannello e portarla da circa 34°C, massima temperatura raggiungibile, a 28.5°C, con un salto termico dunque di 5÷6°C. Questa prova, pertanto, conferma che un maggiore tempo di risalita della temperatura causa un salto termico minore. Inoltre, anche in questo caso, 16 cicli non sono sufficienti per stabilizzare la temperatura del pannello ad un valore ben preciso; anzi, sembra che questa possa diminuire ulteriormente aumentando il numero di cicli.

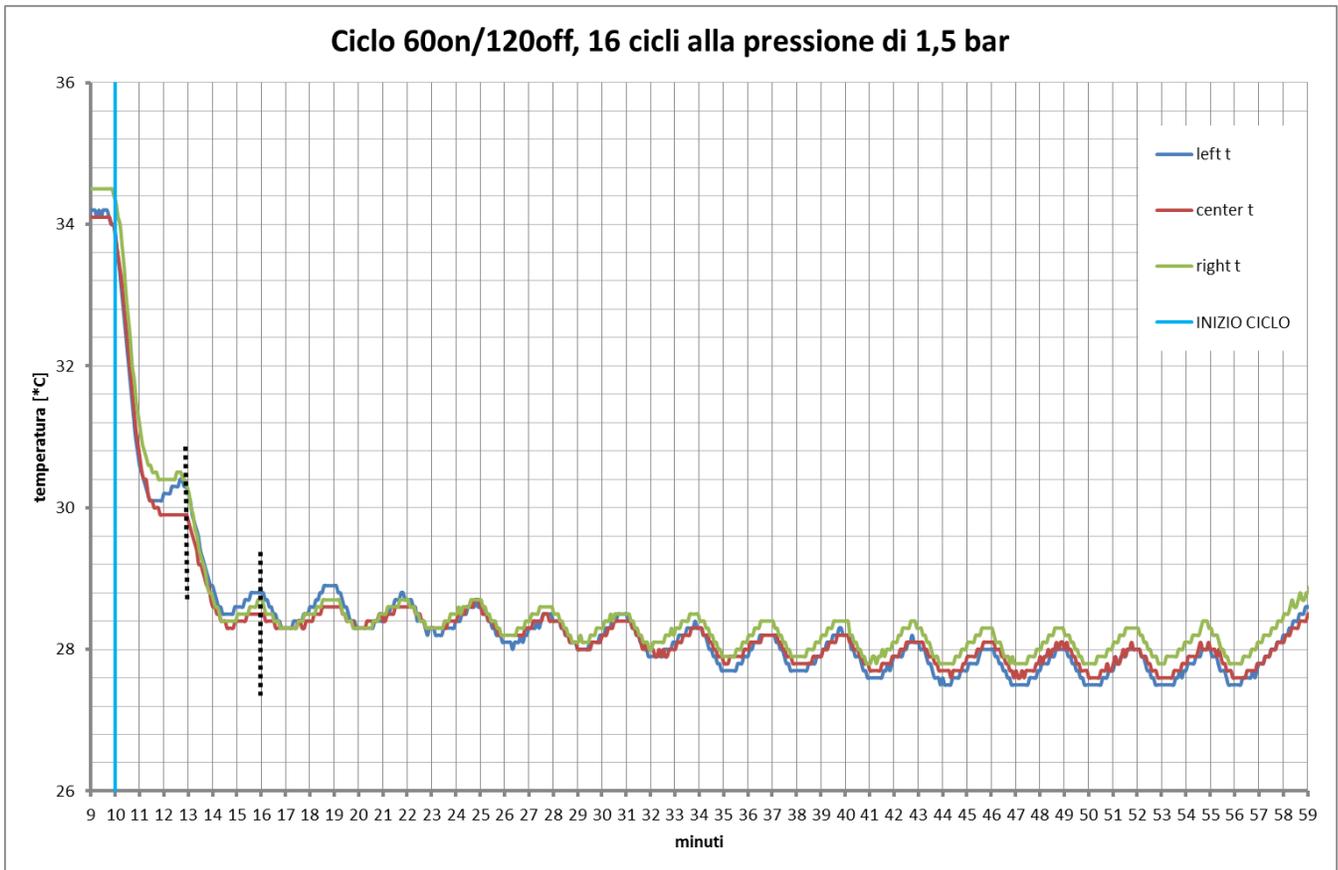


Figura 5.10: zoom della zona dei cicli di figura 5.8. Le linee tratteggiate indicano la fine del I e del II ciclo rispettivamente.

Come sempre, alla fine della prova è stata pesata l'acqua utilizzata, pari a 40.2 kg, ovvero 2.51 kg/min, equivalenti ad una portata di 50.35 l/h per ugello. Questa è di poco superiore a quella misurata nella prova a 1.5 bar descritta nel paragrafo precedente e quindi, ancora una volta, coerente con quella misurata a valle del pannello nel capitolo precedente.

In figura 5.11 è infine riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova di ciclo 60 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off, con faro posizionato ad un metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello, ma acqua di raffreddamento alla pressione di 2 bar.

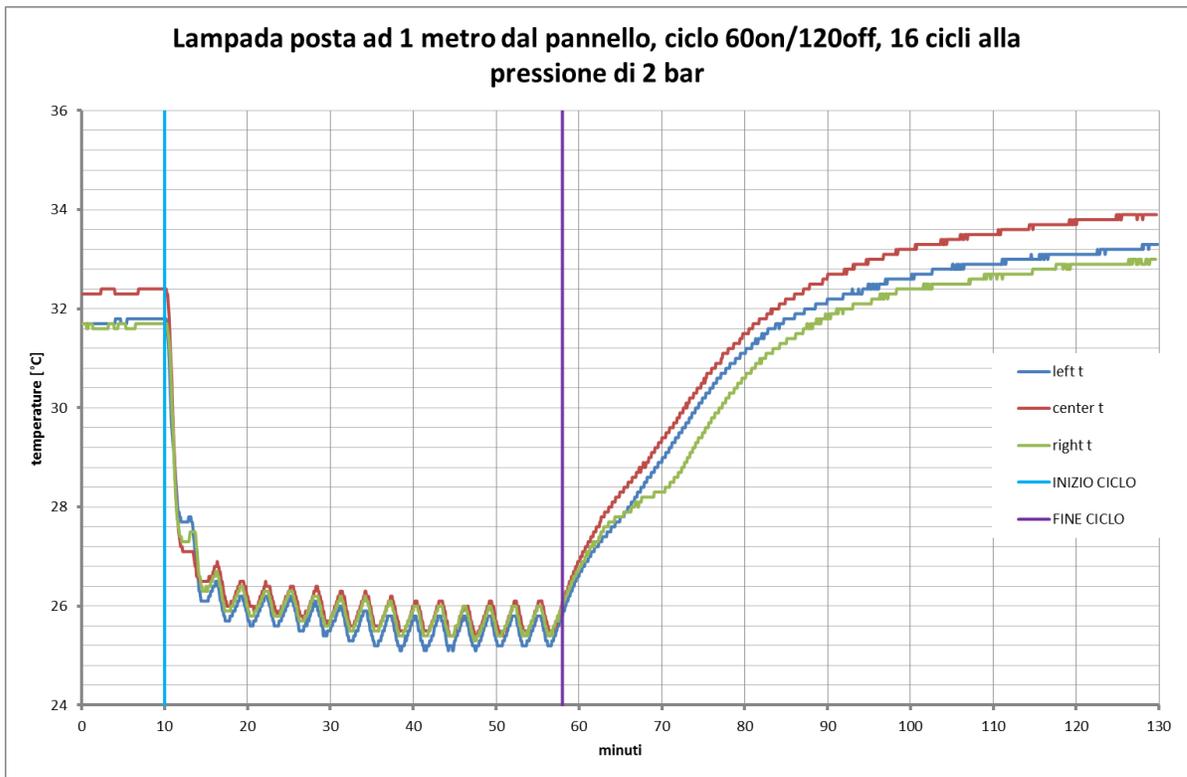


Figura 5.11: 16 cicli di 60 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off , con lampada posta ad 1 metro dal pannello e pressione pari a 2 bar.

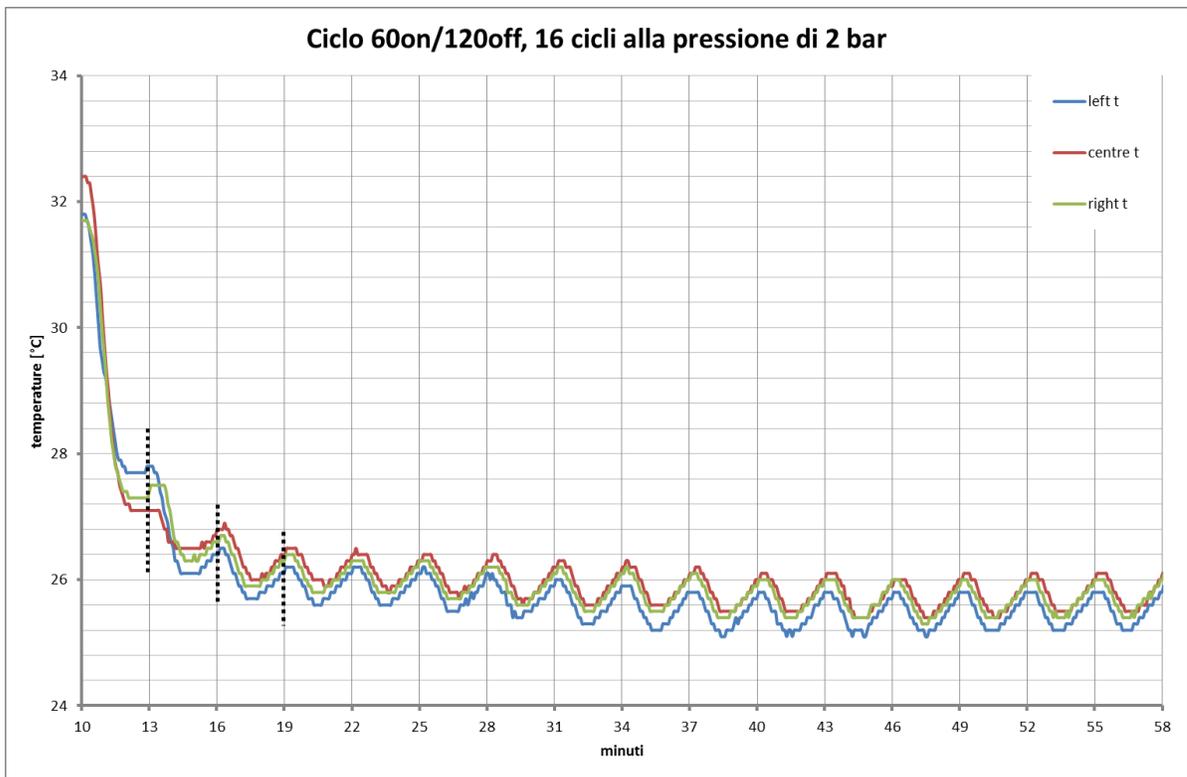


Figura 5.12: zoom della zona dei cicli di figura 5.11. Le linee tratteggiate indicano la fine del I, II e III ciclo rispettivamente.

Anche per questa prova valgono le stesse considerazioni fatte per le altre prove di questo paragrafo. Come si può vedere dal grafico, infatti, il salto termico maggiore si ha, ancora una volta, dopo i primi tre cicli di on/off, durante i quali la temperatura passa da circa 32°C a 26°C. Dal quarto al sedicesimo ciclo, invece, la temperatura cala di meno di 1°C ed inoltre i 16 cicli non sono sufficienti per stabilizzare la temperatura del pannello. L'acqua utilizzata è risultata pari a 42.2 kg, ovvero 2.64 kg/min, corrispondenti ad una portata di 52.85 l/h per ugello. Questa è molto simile alla portata misurata nella prova a 2 bar del paragrafo precedente.

5.4 Ciclo 60 secondi on – 180 secondi off, con faro ad un metro

In figura 5.13 è riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova di ciclo 60 secondi H₂O on – 180 secondi H₂O off, con faro posizionato ad un metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello e acqua di raffreddamento alla pressione di 1.5 bar.

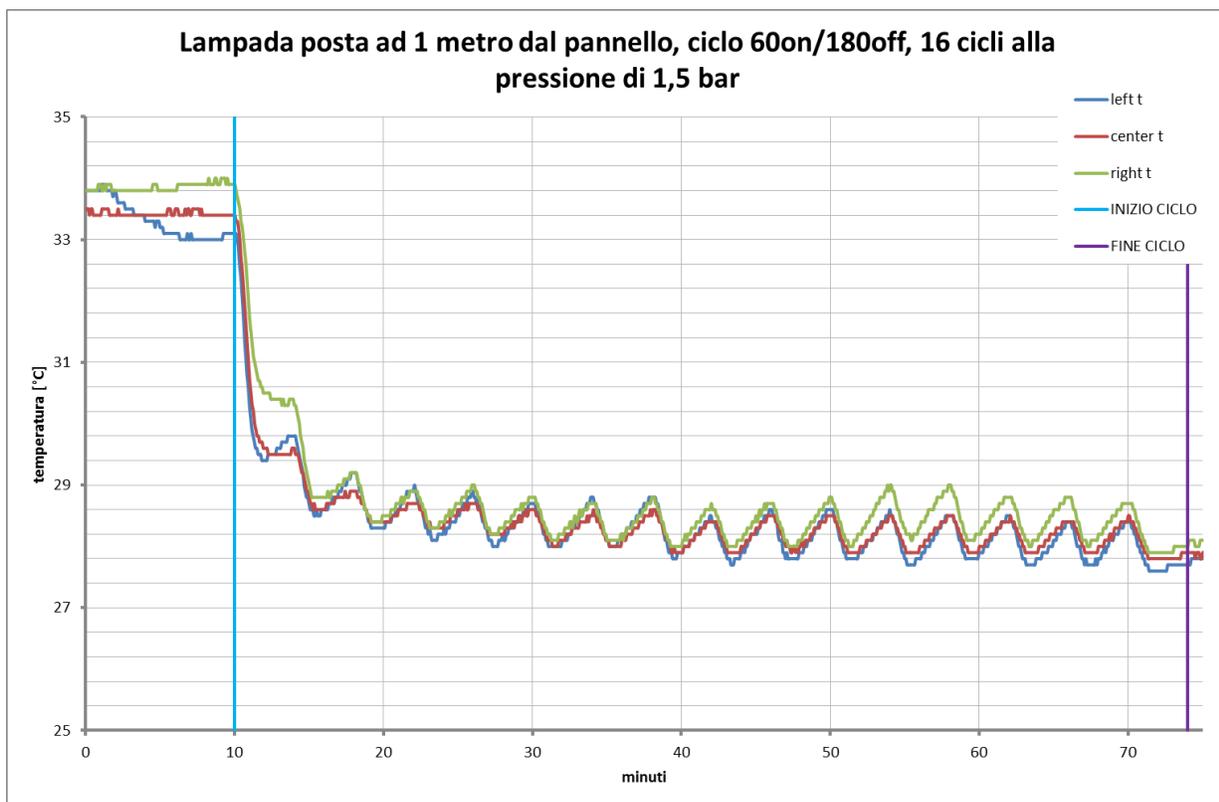


Figura 5.13: 16 cicli di 60 secondi H₂O on – 180 secondi H₂O off , con lampada posta ad 1 metro dal pannello e pressione pari a 1.5 bar.

Dopo aver aspettato che il faro portasse il pannello ad una temperatura di regime costante, sono state accese le termocoppie. Dopo dieci minuti di rilevamento, si è fatto partire il primo ciclo: viene mantenuto aperto il flusso d'acqua sulla superficie del pannello per 60 secondi e alla pressione di 1.5

bar, trascorsi i quali viene chiuso il rubinetto (mantenendo costante la pressione) per 180 secondi. Sono stati compiuti complessivamente 16 cicli.

Come nelle prove precedenti, nelle quali la temperatura compiva il salto termico maggiore nei primi due o tre cicli, anche in questa prova il salto termico più importante si verifica a seguito dei primi due cicli di raffreddamento-riscaldamento. Infatti, mentre prima dell'inizio del primo ciclo (minuto 10) il pannello si trovava alla temperatura di circa 33.5°C, pari alla massima temperatura raggiungibile, dopo i primi due cicli (minuto 18) la temperatura scende a circa 29°C, compiendo così un salto termico di 4÷5°C circa. Nei restanti 14 cicli, invece, la temperatura cala solamente di 1°C, anche se sembra che aumentando il numero di cicli questa possa leggermente diminuire ulteriormente.

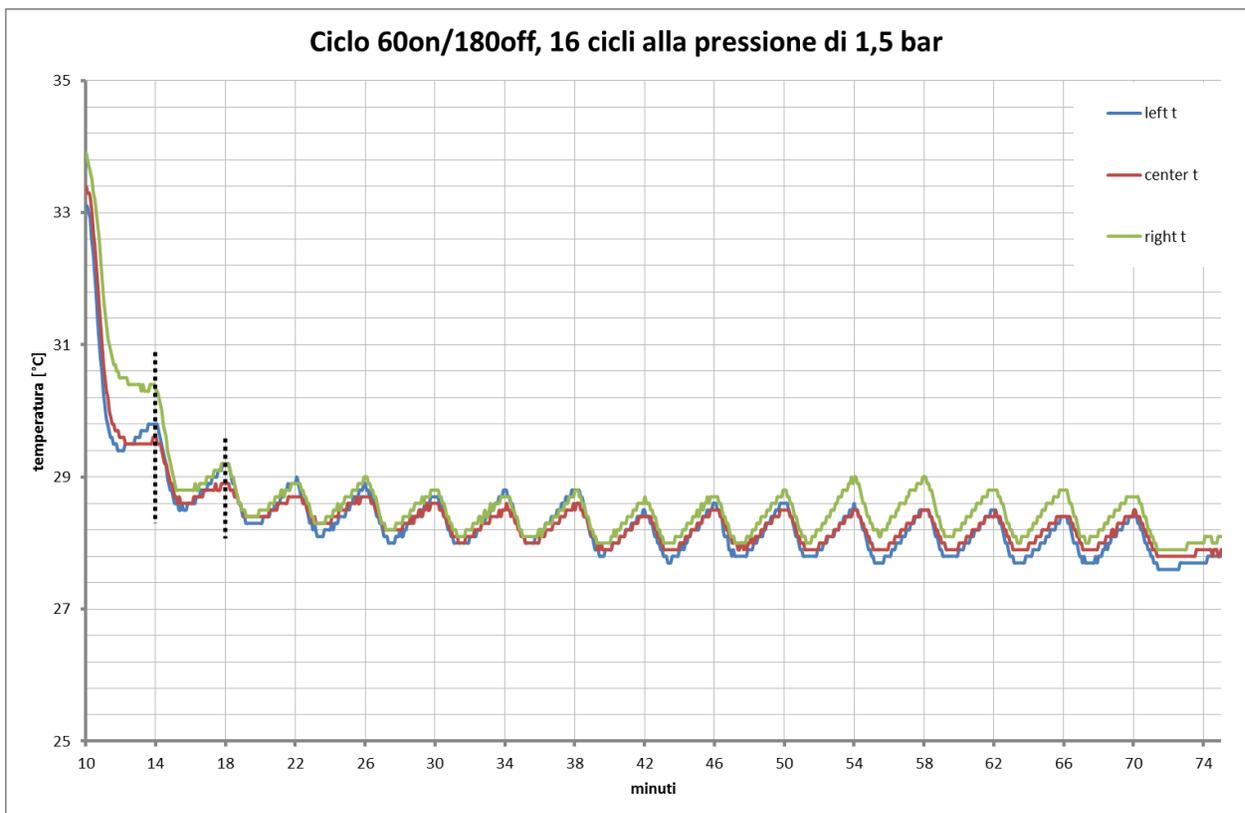


Figura 5.14: zoom della zona dei cicli di figura 5.9. Le linee tratteggiate indicano la fine del I e del II ciclo rispettivamente.

In figura 5.14 si può inoltre osservare come, dal terzo ciclo in poi e per ogni ciclo dopo esso, la temperatura del pannello scenda di 1°C durante i 60 secondi di apertura dell'acqua e poi risalga nuovamente di quasi 1°C durante i 180 secondi di chiusura: ciò rende quasi stabile l'andamento della temperatura.

Alla fine della prova, l'acqua utilizzata è risultante pari a 39.8 kg, ovvero 2.48 kg/min, equivalenti ad una portata di 49.85 l/h per ugello. Come ci si aspettava, questa misura è ovviamente simile a quelle di

portata effettuate nelle precedenti prove alla pressione di 1.5 bar, essendo stata lasciata aperta l'acqua per lo stesso intervallo di tempo.

Per quanto riguarda le prove effettuate alla stessa pressione, ma con un tempo di chiusura dell'acqua che aumenta, la prova di ciclo 60 secondi H₂O on – 180 secondi H₂O off risulta sicuramente meno conveniente, in quanto, pur consumando la stessa quantità d'acqua, consente di ottenere un salto termico minore e quindi un minore miglioramento delle prestazioni del pannello.

5.5 Ciclo 30 secondi on – 330 secondi off, con faro ad un metro

In figura 5.13 è riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova di ciclo 30 secondi H₂O on – 330 secondi H₂O off, con faro posizionato ad un metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello e acqua di raffreddamento alla pressione di 1.5 bar.

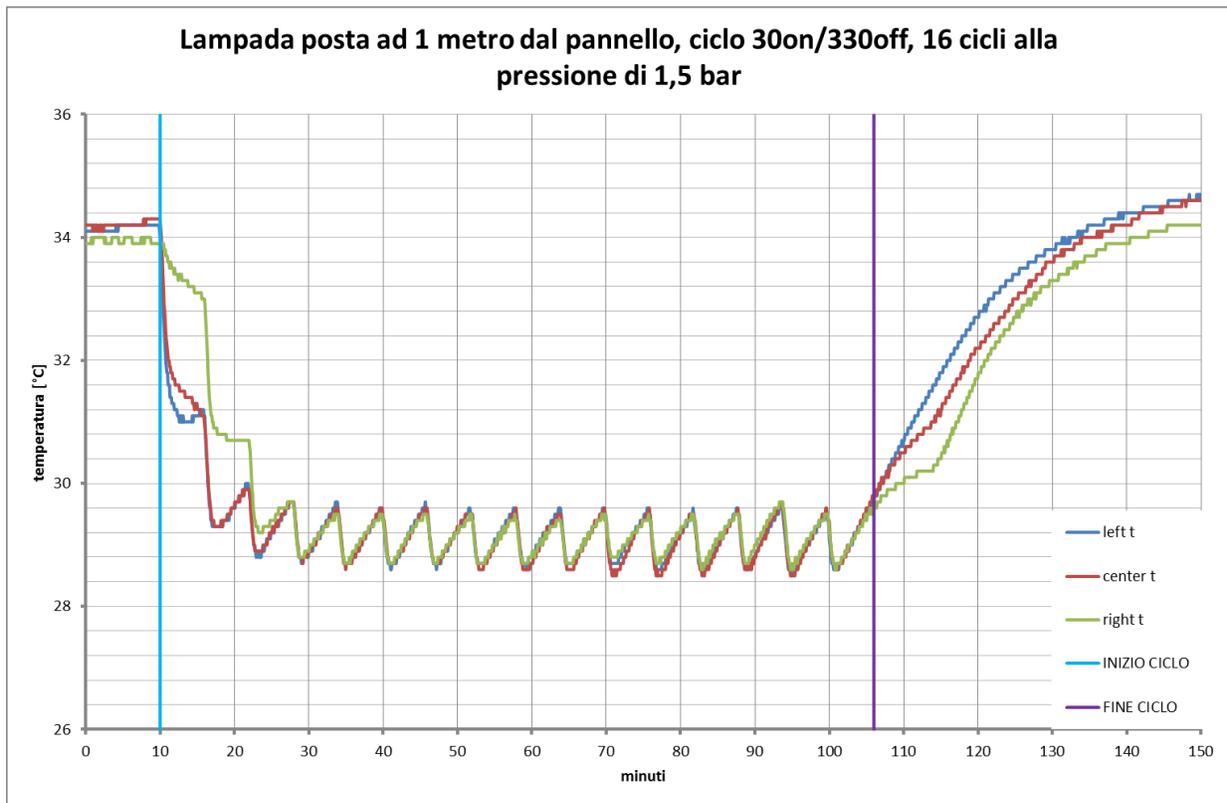


Figura 5.15: 16 cicli di 30 secondi H₂O on – 330 secondi H₂O off , con lampada posta ad 1 metro dal pannello e pressione pari a 1.5 bar.

Nonostante in questa prova sia stato diminuito il tempo di apertura dell'acqua e sia stato invece aumentato significativamente quello di chiusura, rimangono ancora valide alcune considerazioni viste per le prove descritte nei paragrafi precedenti. Anche in questa prova, infatti, il maggiore raffreddamento del pannello avviene durante i primi tre cicli di on/off, nel corso dei quali la

temperatura passa da 34°C a circa 29.5°C. Nei successivi cicli, invece, la temperatura del pannello cala di molto poco.

Tuttavia, mentre nelle prove precedenti i 16 cicli non erano mai stati sufficienti per stabilizzare la temperatura ad un valore minimo ben preciso, ma sembrava sempre che essa potesse diminuire ulteriormente se si aumentavano i cicli, in quest'ultima prova, invece, dopo 16 cicli la temperatura del pannello si è stabilizzata ad un valore compreso tra i 28.5°C (temperatura minima alla fine di ogni fase di raffreddamento) e i 29,5°C (temperatura massima alla fine di ogni fase di riscaldamento). Infatti, come si può vedere dal grafico di figura 5.16, durante i 30 secondi di raffreddamento la temperatura diminuisce di circa 1°C e risale nuovamente di 1°C durante i 330 secondi di riscaldamento.

Alla fine della prova è stata pesata l'acqua utilizzata, pari a 19.6 kg, ovvero 2.45 kg/min, equivalenti ad una portata di 49 l/h per ugello. Questa è coerente con quella misurata nelle altre prove effettuate alla stessa pressione e con quella che era stata determinata a valle del pannello nel capitolo precedente.

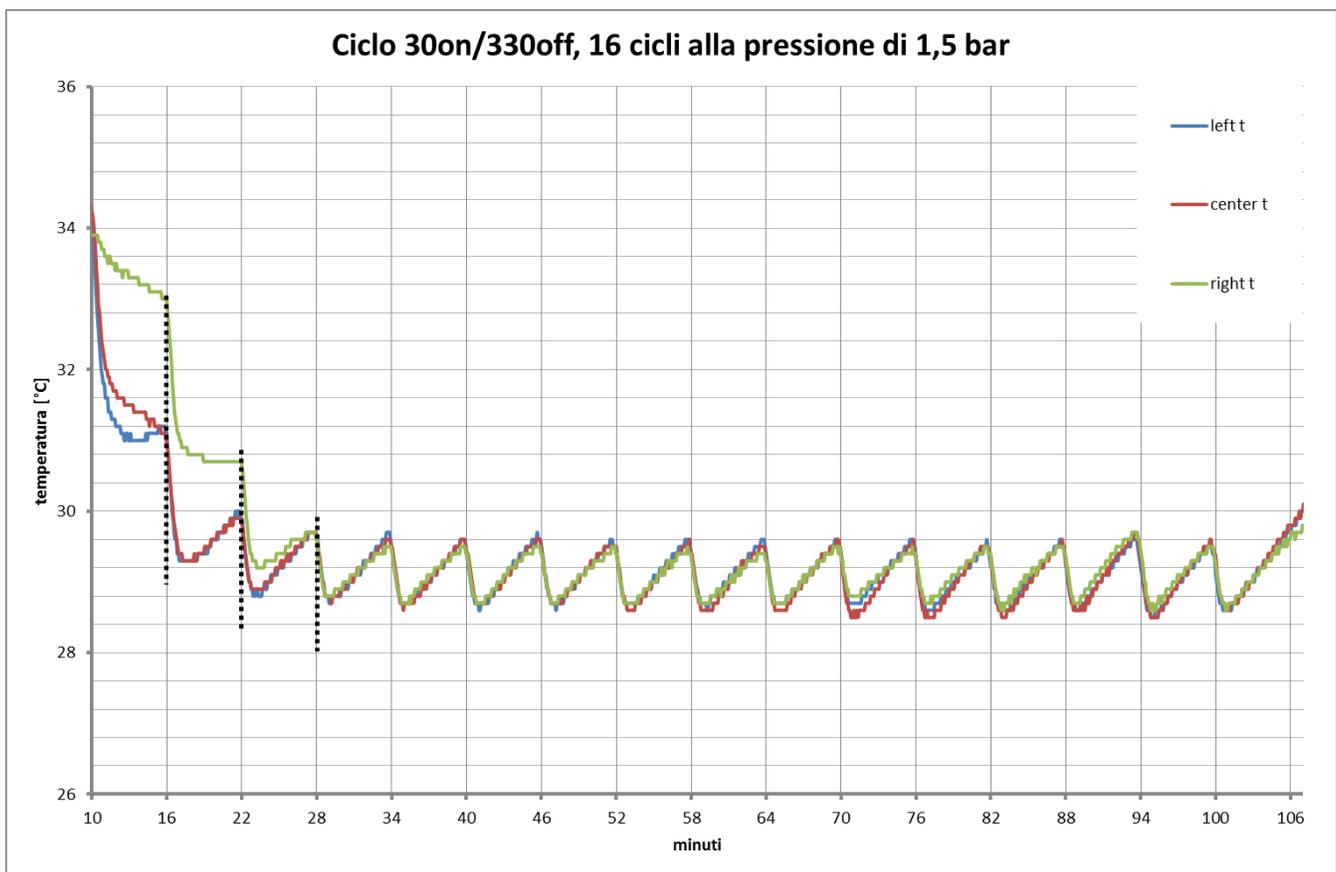


Figura 5.16: zoom della zona dei cicli di figura 5.15. Le linee tratteggiate indicano la fine del I, II e III ciclo rispettivamente.

Rispetto alla prova di ciclo 60 secondi H₂O on – 180 secondi H₂O off descritta nel paragrafo precedente, questa risulta sicuramente più conveniente. Nonostante in entrambe le prove si sia ottenuto

una diminuzione della temperatura del pannello di $5\div 6^{\circ}\text{C}$, alla quale corrisponde un miglioramento delle prestazioni non sperimentato di circa il 2%, in quest'ultima è stata consumata la metà dell'acqua.

5.6 Ciclo 30 secondi on – 30 secondi off, con faro ad un metro

In figura 5.17 è riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova di ciclo 30 secondi H_2O on – 30 secondi H_2O off, con faro posizionato ad un metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello e acqua di raffreddamento alla pressione di 2 bar.

Come si può osservare dal grafico di figura 5.18, i tempi di apertura e di chiusura dell'acqua sono troppo brevi per riuscire a distinguere chiaramente le fasi di raffreddamento e di riscaldamento che compongono ogni singolo ciclo. Inoltre, poiché la temperatura del pannello diminuisce senza interruzioni per i primi 5 minuti, nei primi 5 cicli sembra che la fase di 30 secondi di chiusura dell'acqua non sia presente, come se l'acqua non venisse mai chiusa. In questo periodo di tempo la temperatura compie il salto termico maggiore, passando da circa 32°C a 25°C , per poi stabilizzarsi intorno a questo valore.

Alla fine della prova è stata pesata l'acqua utilizzata, pari a 19.8 kg, ovvero 2.64 kg/min, equivalenti ad una portata di 52.9 l/h per ugello. Questa è coerente con quella che era stata misurata a valle del pannello durante le prove di portata a 2 bar.

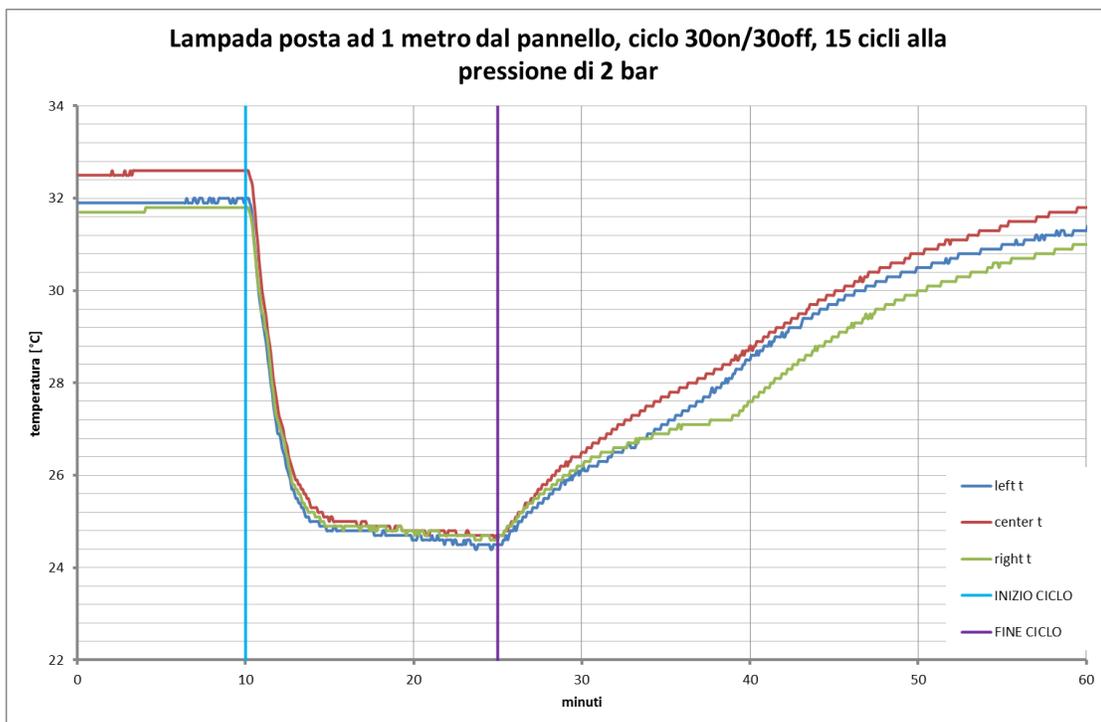


Figura 5.17: 15 cicli di 30 secondi H_2O on – 30 secondi H_2O off , con lampada posta ad 1 metro dal pannello e pressione pari a 2 bar.

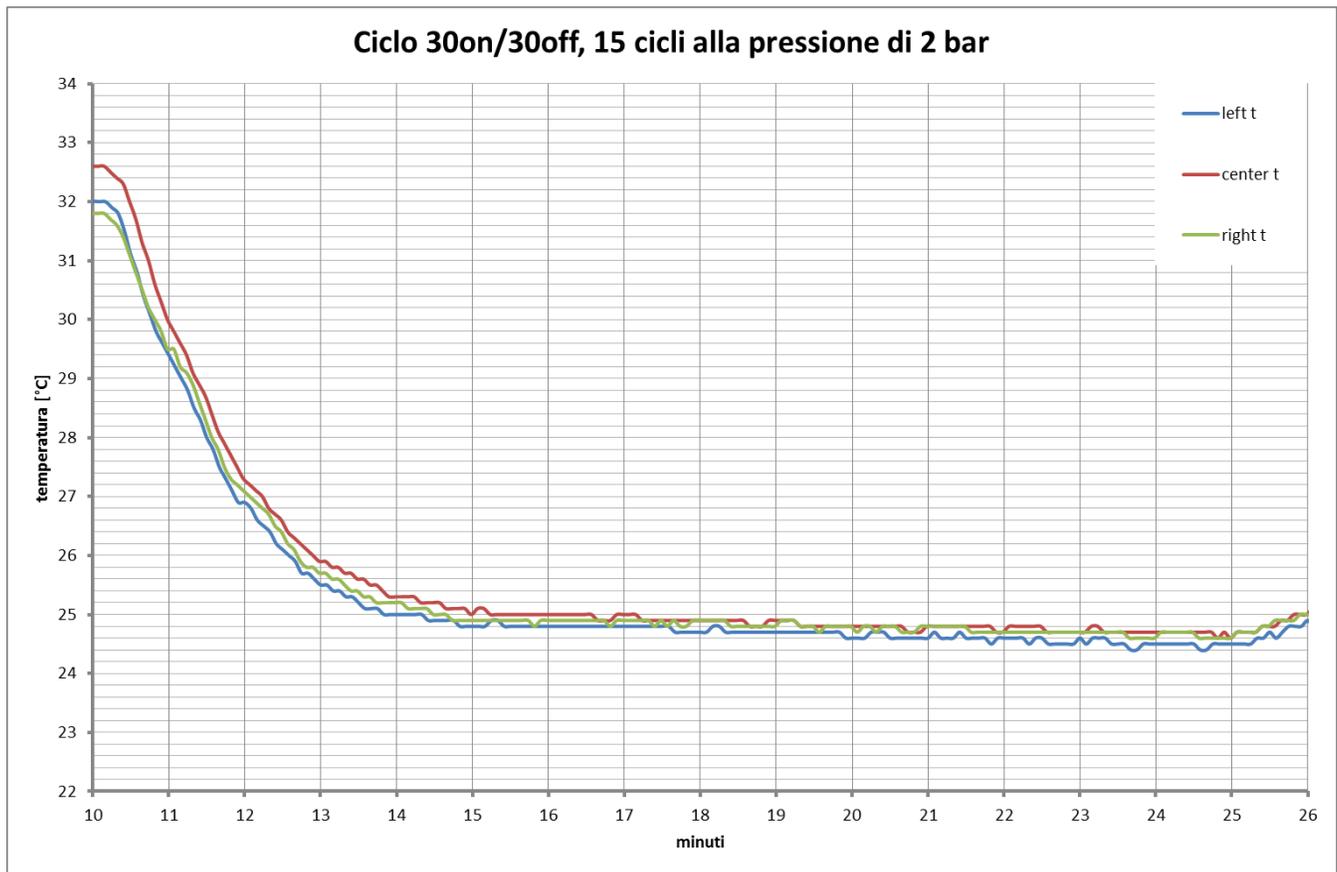


Figura 5.18: zoom della zona dei cicli di figura 5.17.

Anche se questa prova, paragonata alle altre, consente di ottenere un buon raffreddamento del pannello e perciò un buon miglioramento delle sue prestazioni, essa non risulta comunque conveniente a causa dell'elevata portata d'acqua necessaria. Infatti, mantenere una bassa temperatura superficiale del pannello erogando acqua alla pressione di 2 bar per 30 secondi ogni minuto, porterebbe ad un consumo d'acqua troppo elevato e insostenibile, tale da non giustificare l'incremento del rendimento del pannello.

5.7 Ciclo 60 secondi on – 60 secondi off, con faro a mezzo metro

In figura 5.19 è riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova di ciclo 60 secondi H₂O on – 60 secondi H₂O off, con faro posizionato a mezzo metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello e acqua di raffreddamento alla pressione di 1.5 bar.

La prima cosa che risulta evidente guardando il grafico è sicuramente il maggiore salto termico che si riesce ad ottenere rispetto alle prove effettuate con il faro posto ad un metro dal pannello. Se, infatti, nelle prove descritte nei paragrafi precedenti si era ottenuto un salto termico di 7÷8°C al massimo, in quest'ultima la temperatura del pannello diminuisce di più di 10°C. Mentre prima dell'inizio del primo ciclo (minuto 10) il pannello si trovava alla temperatura di circa 41°C, pari alla massima temperatura

raggiungibile, dopo i primi tre cicli di on/off essa scende a circa 30°C e continua a diminuire nei successivi cicli, anche se meno significativamente.

Esattamente come nelle prove precedenti, invece, si può vedere come dopo 16 cicli la temperatura del pannello non si sia ancora stabilizzata ad un valore ben preciso, ma essa sembra poter diminuire ulteriormente se si aumenta il numero di cicli.

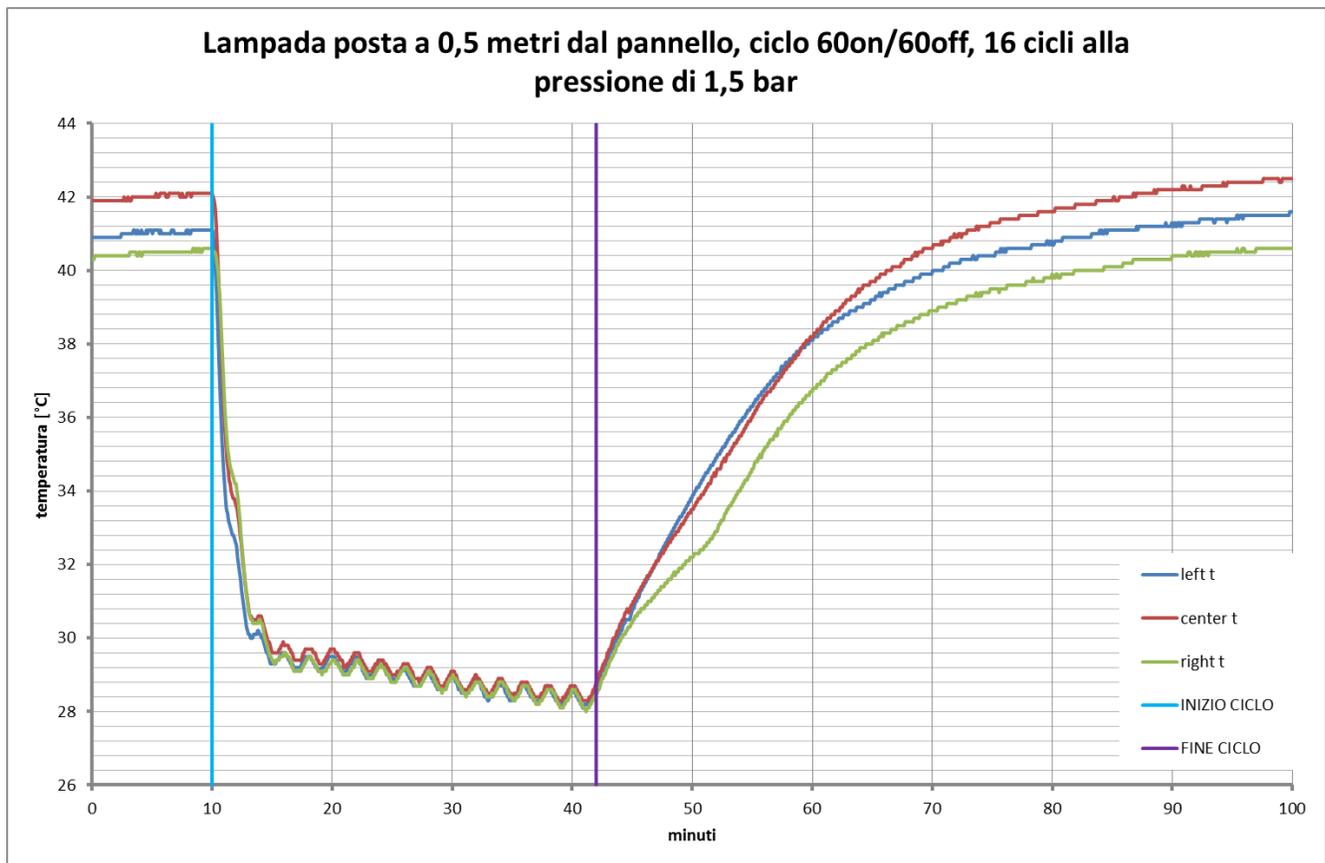


Figura 5.19: 16 cicli di 60 secondi H₂O on – 60 secondi H₂O off , con lampada posta a mezzo metro dal pannello e pressione pari a 1.5 bar.

Aumentando la massima temperatura di regime raggiungibile dal pannello, come avverrebbe ipoteticamente nelle ore di punta delle giornate in cui splende il sole, si ha quindi un aumento del salto termico ottenibile e, pertanto, un maggiore miglioramento delle prestazioni del pannello stesso; a una diminuzione della temperatura superficiale del pannello di 10°C corrisponde infatti un miglioramento delle sue prestazioni di circa il 4%.

Alla fine della prova, l'acqua di raffreddamento consumata era pari a 40.7 kg, ovvero 2.54 kg/min, equivalenti ad una portata di 50.97 l/h per ugello. Questa, seppur con un piccolo errore, è coerente con quella determinata nel capitolo precedente a valle del pannello e alla pressione di 1.5 bar.

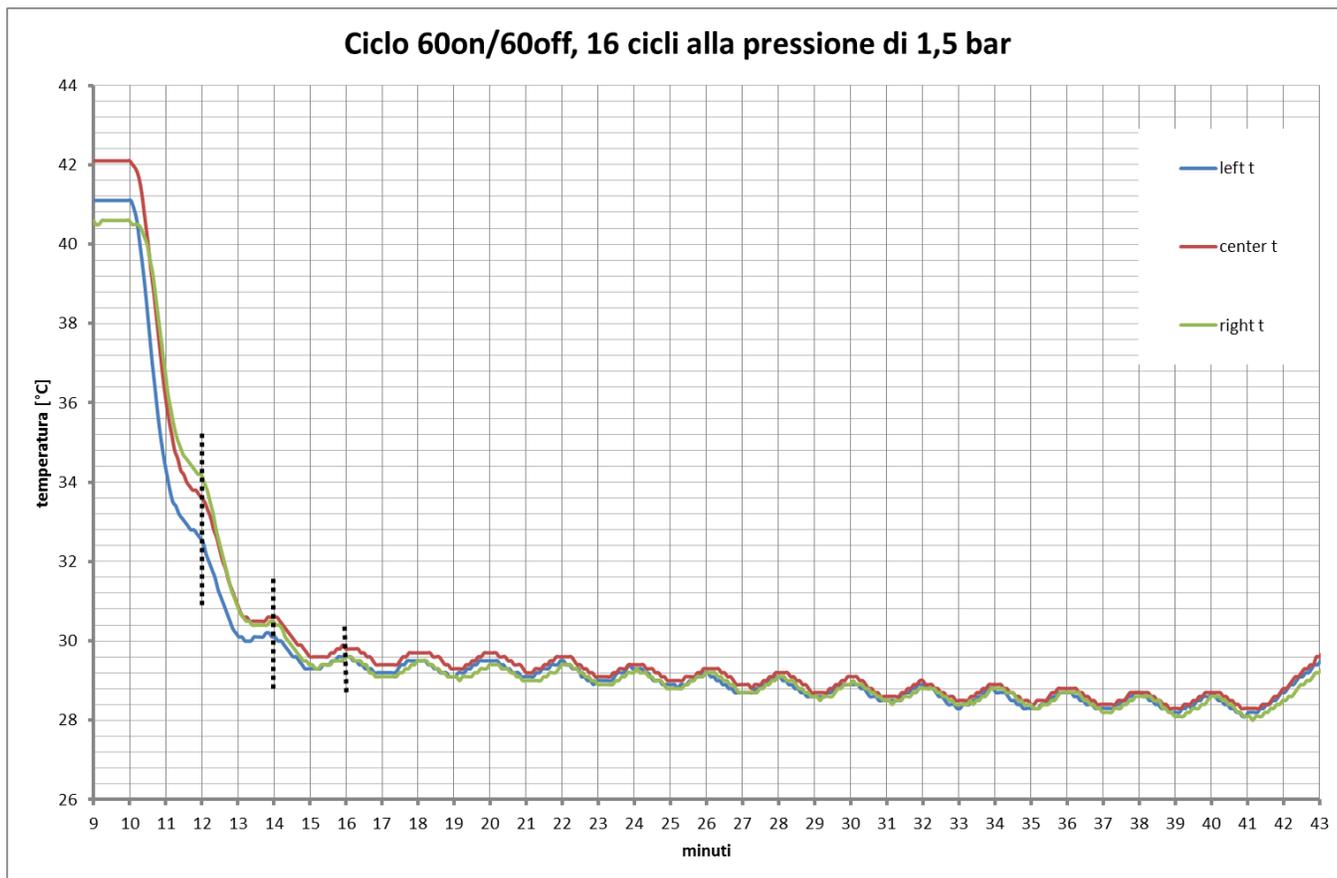


Figura 5.20: zoom della zona dei cicli di figura 5.19. Le linee tratteggiate indicano la fine del I, II e III ciclo rispettivamente.

5.8 Ciclo 30 secondi on – 60 secondi off, con faro a mezzo metro

In figura 5.21 è riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova di ciclo 30 secondi H₂O on – 60 secondi H₂O off, con faro posizionato a mezzo metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello e acqua di raffreddamento alla pressione di 1 bar.

Rispetto alle prove descritte nei paragrafi precedenti, nelle quali venivano effettuati complessivamente 16 cicli di on/off, in questa si è provato ad aumentare il numero totale di cicli, portandolo a 20.

Tuttavia, come si vede dal grafico, neanche questo è stato sufficiente per stabilizzare la temperatura del pannello ad un valore minimo, ma essa sembra poter diminuire ulteriormente se si aumentano i cicli. Per questo motivo, la stessa identica prova è stata eseguita nuovamente, portando però il numero di cicli effettuati a 50. Tale prova è riportata in figura 5.22.

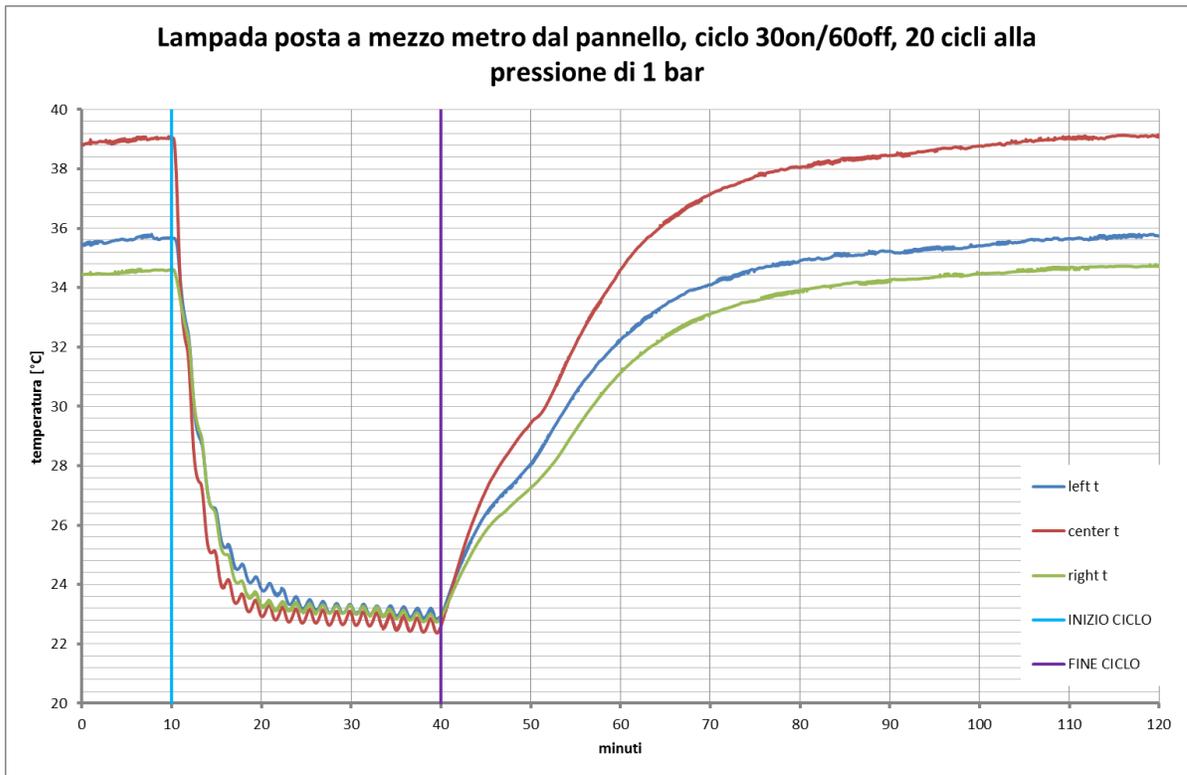


Figura 5.21: 20 cicli di 30 secondi H₂O on – 60 secondi H₂O off , con lampada posta a mezzo metro dal pannello e pressione pari a 1 bar.

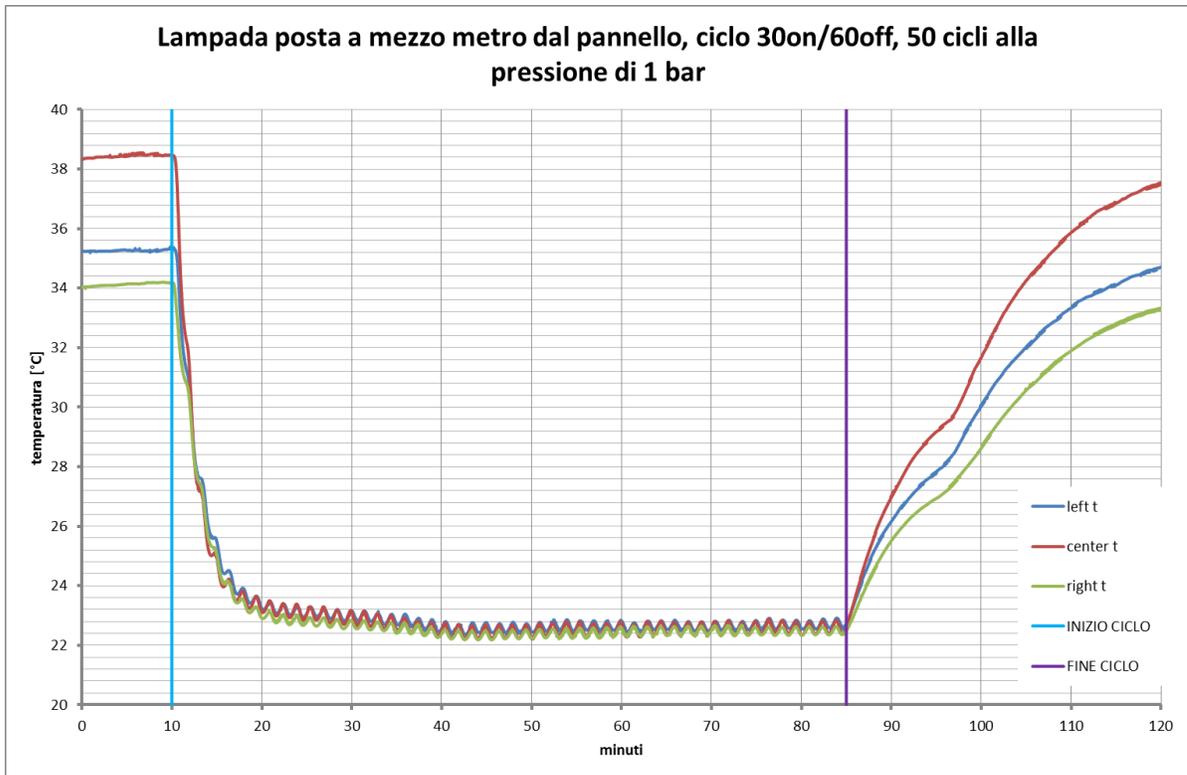


Figura 5.22: 50 cicli di 30 secondi H₂O on – 60 secondi H₂O off , con lampada posta a mezzo metro dal pannello e pressione pari a 1 bar.

Nella prova con 50 cicli si può chiaramente vedere come, tra il minuto 40 e il minuto 50, la temperatura minima raggiunta dal pannello si stabilizzi intorno ai 22.5°C, salvo poi incominciare a crescere lievemente fino alla fine dell'ultimo ciclo. Questo leggero aumento della temperatura durante il raffreddamento è sicuramente dovuto al contemporaneo aumento della temperatura ambiente. L'influenza di quest'ultima sull'andamento della temperatura del pannello provocato dai cicli non era visibile nelle prove precedenti, in quanto queste, a causa del basso numero di cicli, duravano troppo poco.

Inoltre, si può osservare come, nonostante l'aumento del numero di cicli, la temperatura minima raggiunta durante le due prove è pressoché la stessa (22.5°C), così come è lo stesso il salto termico che si ottiene.

Infine, se nelle prove precedenti la temperatura del pannello diminuiva molto velocemente, tanto che si otteneva il maggiore salto termico dopo i primi due o tre cicli, in quest'ultime due prove sono necessari cinque o sei cicli per abbassare la temperatura fino a quella minima raggiungibile. Questo è dovuto al poco tempo di apertura dell'acqua e alla sua bassa pressione.

5.9 Ciclo 30 secondi on – 120 secondi off, con faro a mezzo metro

Analogamente a quanto fatto per il ciclo di 30 secondi H₂O on - 60 secondi H₂O off descritto nel paragrafo precedente, anche per il ciclo di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off sono state effettuate due diverse prove. Queste differiscono tra di loro per il numero totale di cicli eseguiti: nella prova di figura 5.23 sono stati effettuati 20 cicli, mentre in quella di figura 5.24 il doppio, ovvero 40. La pressione dell'acqua è invece la stessa in entrambe le prove e pari a 1 bar.

Confrontando i 2 grafici si può vedere che, come nelle prove descritte nel paragrafo precedente, mentre 20 cicli non sono sufficienti per stabilizzare la temperatura del pannello a quella minima raggiungibile, 40 lo sono. Tuttavia, se da un certo momento in poi nella prova con 50 cicli di 30 secondi on e 60 secondi off l'andamento della temperatura incominciava a crescere a causa dell'aumento della temperatura ambiente, nella prova con 40 cicli di 30 secondi on e 120 secondi off ciò non avviene e l'andamento della temperatura resta stabile.

Valgono poi le stesse considerazioni fatte per le prove del paragrafo precedente: la temperatura minima raggiunta è la stessa in entrambe le prove ed è circa 24°C, inoltre sono necessari cinque o sei cicli per raggiungerla.

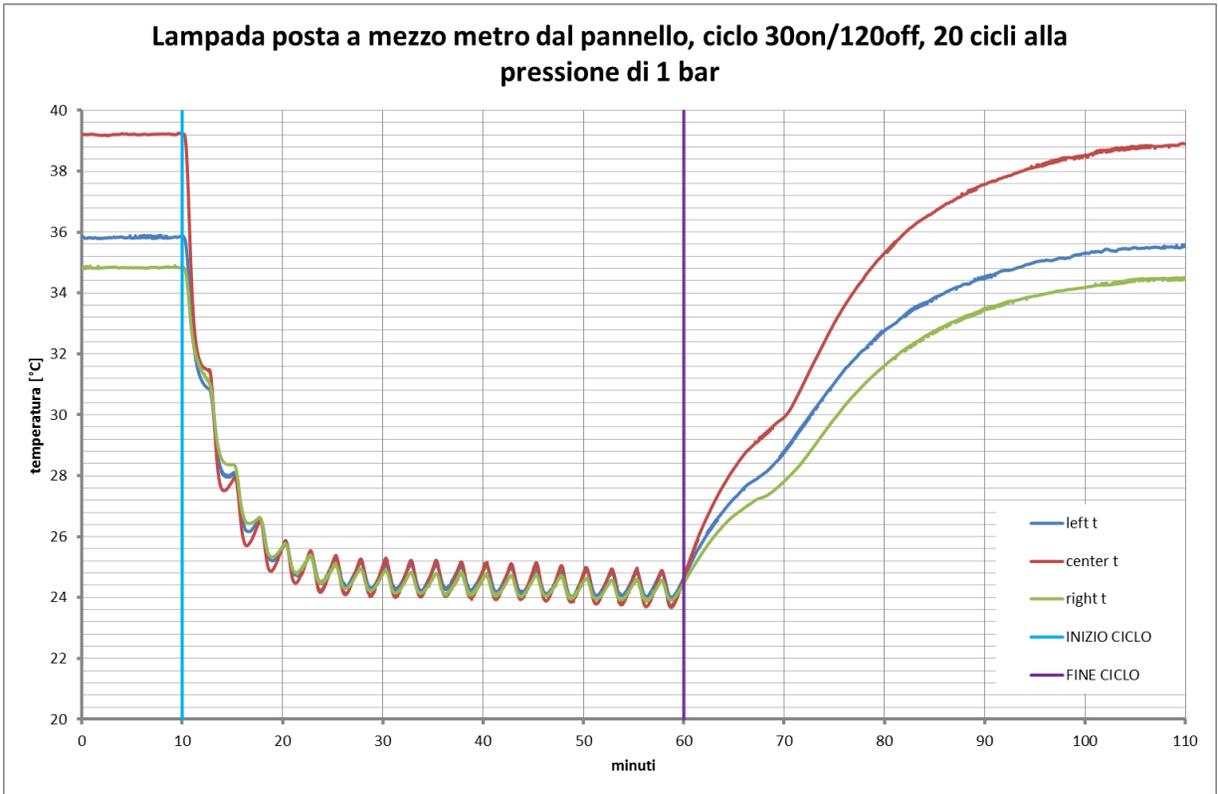


Figura 5.23: 20 cicli di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off , con lampada posta a mezzo metro dal pannello e pressione pari a 1 bar.

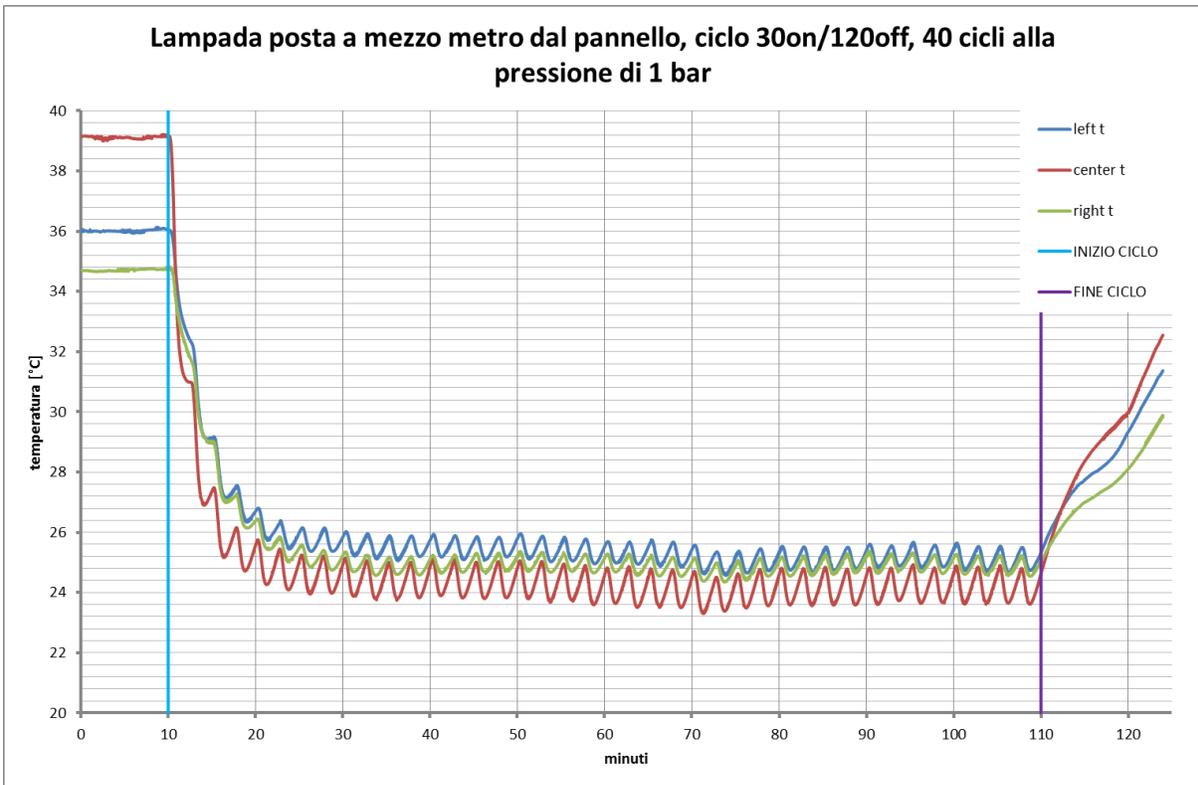


Figura 5.24: 40 cicli di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off , con lampada posta a mezzo metro dal pannello e pressione pari a 1 bar.

5.10 Ciclo 30 secondi on – 30 secondi off, con faro a mezzo metro

In figura 5.25 è riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova di ciclo 30 secondi H₂O on – 30 secondi H₂O off, con faro posizionato a mezzo metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello e acqua di raffreddamento alla pressione di 1 bar. A causa dei ridotti tempi di raffreddamento e riscaldamento di questa prova, si è deciso di eseguire direttamente 50 cicli di on/off, ritenendo che 20 cicli non fossero sufficienti e significativi per fare delle considerazioni.

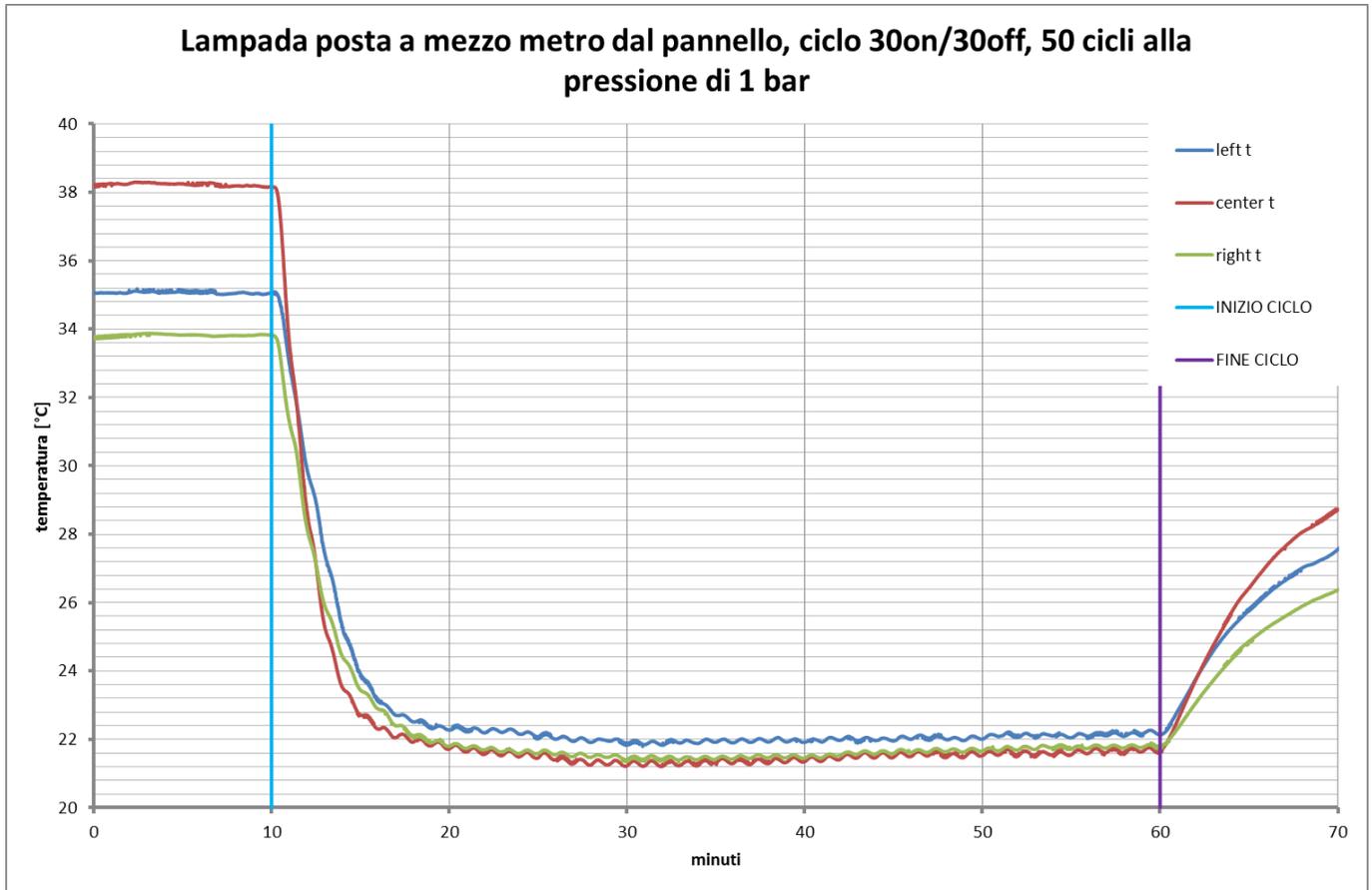


Figura 5.25: 50 cicli di 30 secondi H₂O on – 30 secondi H₂O off , con lampada posta a mezzo metro dal pannello e pressione pari a 1 bar.

Come nella prova di figura 5.22, anche in questa si può vedere l'influenza della temperatura ambiente sull'andamento della temperatura del pannello. Dal grafico si può infatti osservare come, mentre tra il minuto 30 e il minuto 40 la temperatura del pannello sembra stabilizzarsi ad un valore minimo, pari a 21°C, dal minuto 40 in poi essa incominci a crescere e durante i rimanenti cicli aumenti di mezzo grado.

Inoltre, per abbassare la temperatura del pannello dalla massima temperatura raggiungibile a quella minima, sono necessari 15 cicli di on/off.

5.11 Conclusioni seconda parte analisi sperimentale

Si riassumono qui le conclusioni riportate nei paragrafi precedenti e ottenute a seguito di varie prove di ciclo di on/off:

- a parità di ciclo di on/off, all'aumentare della pressione dell'acqua e quindi all'aumentare della sua portata, non aumenta il massimo salto termico ottenibile. Pertanto, una volta scelto il ciclo da utilizzare per abbassare la temperatura del pannello, risulta conveniente erogare l'acqua a pressioni non troppo elevate, per esempio ad 1 bar, in modo da ridurre il più possibile il consumo;
- riscaldando maggiormente il pannello e aumentandone dunque la massima temperatura raggiungibile, si ottiene un salto termico maggiore e quindi un maggiore miglioramento delle prestazioni del pannello. Posizionando il faro a mezzo metro dal pannello ed indipendentemente dal ciclo utilizzato, si è infatti sempre ottenuta una diminuzione della temperatura del pannello maggiore di 10°C, alla quale corrisponde un incremento del rendimento di più del 4%;
- 20 cicli di on/off non sono mai sufficienti per stabilizzare la temperatura del pannello ad un valore minimo, poiché essa sembra sempre poter diminuire ulteriormente se si aumenta il numero di cicli. Tuttavia, aumentando troppo il numero di cicli e aumentando così la durata della prova, la temperatura del pannello prima si stabilizza ad una temperatura minima, ma ad un certo punto risente del contemporaneo aumento della temperatura ambiente e quindi, seppur leggermente, comincia a crescere. Questo lieve aumento della temperatura causa ovviamente una diminuzione del salto termico ottenuto e, pertanto, una perdita dell'efficienza che si era guadagnata;
- per quanto riguarda le prove in laboratorio, sono sufficienti pochi cicli per abbassare notevolmente la temperatura del pannello fino a quasi quella minima raggiungibile. Ciò è molto importante perché consentirebbe di non effettuare troppi cicli consecutivamente, permettendo così di lasciare trascorrere del tempo tra una serie di cicli ed un'altra, in modo da risparmiare sul consumo di acqua. Ovviamente, nel tempo che intercorre tra 2 serie di cicli consecutive, la temperatura del pannello aumenterebbe, ma si è già visto che il tempo che impiega il pannello a riscaldarsi è molto maggiore di quello che impiega a raffreddarsi. In base agli obiettivi che ci si pone, come ad esempio un certo miglioramento dell'efficienza del pannello oppure un determinato consumo di acqua, bisogna quindi determinare il giusto compromesso tra il tempo della fase di raffreddamento e quella di riscaldamento;
- allungando la fase di off e lasciando invece costante quella di on, il massimo salto termico ottenuto diminuisce e questa diminuzione è ovviamente tanto maggiore quanto più si allunga la fase di riscaldamento. Tuttavia, nell'arco di un tempo prestabilito, si consuma meno acqua e quindi, anche in questo caso, la migliore soluzione dipende dagli obiettivi che ci si pone;

- diminuendo invece la fase di on, ma lasciando costante quella di off, si garantisce che il pannello venga bagnato più volte, anche se per una durata di tempo inferiore. Questo da un lato consente di risparmiare sulla quantità di acqua consumata, ma dall'altro causa una maggiore oscillazione della temperatura, sottoponendo quindi il pannello ad un maggiore stress termico;
- per poter scegliere il ciclo migliore è dunque necessario prestabilire gli obiettivi che si vogliono ottenere, come ad esempio il mantenimento della temperatura del pannello all'interno di un certo range per un determinato intervallo di tempo, oppure un consumo d'acqua non superiore ad un fissato valore;
- durante le prove sperimentali, grazie al sistema di recupero dell'acqua, è stato possibile determinare con discreta precisione la quantità d'acqua recuperabile ad ogni prova. Questa è sempre risultata molto simile alla portata che era stata misurata nel capitolo precedente a valle del pannello, confermando quindi quanto già osservato. Tuttavia, non è stato possibile misurare la temperatura dell'acqua recuperata per valutarne un eventuale stoccaggio o una reimmissione in un pozzo per un possibile riutilizzo nel raffreddamento del pannello. È però importante sottolineare che, se la temperatura dell'acqua recuperata fosse troppo elevata, questa non porterebbe essere utilizzata nuovamente, poiché non porterebbe allo stesso miglioramento delle prestazioni del pannello. In ipotesi di utilizzo del presente sistema di raffreddamento in una tipica giornata estiva è comunque possibile evitare questo problema, programmando il raffreddamento sin dal mattino, impedendo così al pannello di raggiungere una temperatura elevata tale da riscaldare eccessivamente l'acqua.

Capitolo 6

Analisi sperimentale: terza parte

In questo capitolo viene descritta la terza ed ultima parte delle prove effettuate. Questa parte finale di prove ha come scopo cercare di determinare il momento migliore per iniziare il raffreddamento del pannello attraverso una successione di cicli di on/off, come quelle descritte nel capitolo precedente, scegliere la pressione a cui erogare l'acqua e valutare il salto termico ottenuto. A tale scopo, si è preso come riferimento un ciclo di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off e per ogni prova sono stati eseguiti 50 cicli. Nei paragrafi successivi sono quindi descritte le prove effettuate al variare della pressione dell'acqua e del momento in cui fare partire il primo ciclo di raffreddamento. Tutte le prove sono state condotte con il faro posizionato a mezzo metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello.

6.1 Pressione 0.5 bar, inizio ciclo alla Tamb+2°C

In figura 6.1 è riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova costituita dalle seguenti fasi:

1. Per prima cosa si sono accese le termocoppie e si è aspettato che esse andassero a regime, misurando così la temperatura ambiente, pari a 18.9°C;
2. Dopo dieci minuti si è acceso il faro, posizionato a mezzo metro rispetto la perpendicolare condotta dal centro del pannello;
3. Non appena la temperatura registrata dalla termocoppia centrale è aumentata di 2°C rispetto a quella ambiente, si è iniziato a raffreddare il pannello, avviando il primo ciclo di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off, con acqua alla pressione di 0.5 bar;
4. Dopo aver eseguito 50 cicli di on/off si sono infine spente le termocoppie.

La prima cosa che risulta evidente guardando il grafico è come la temperatura del pannello si stabilizzi ad una temperatura maggiore rispetto ai 20.9°C ai quali si avvia il primo ciclo di raffreddamento. Zoomando il grafico in questa zona, infatti, si può vedere come i primi 30 secondi di flusso d'acqua continuo alla pressione di 0.5 bar non siano sufficienti ad abbassare la temperatura del pannello, ma essa continui a crescere quasi indisturbata fino al secondo ciclo. Anche nei successivi cicli la temperatura del pannello continua ad aumentare, ma non così significativamente, ed intorno al minuto

50, cioè dopo 20 cicli, sembra quasi stabilizzarsi a 24°C. Tuttavia, verso la fine della prova, essa riprende a crescere lievemente, ma ciò, come visto nei capitoli precedenti, è dovuto al contemporaneo aumento della temperatura ambiente.

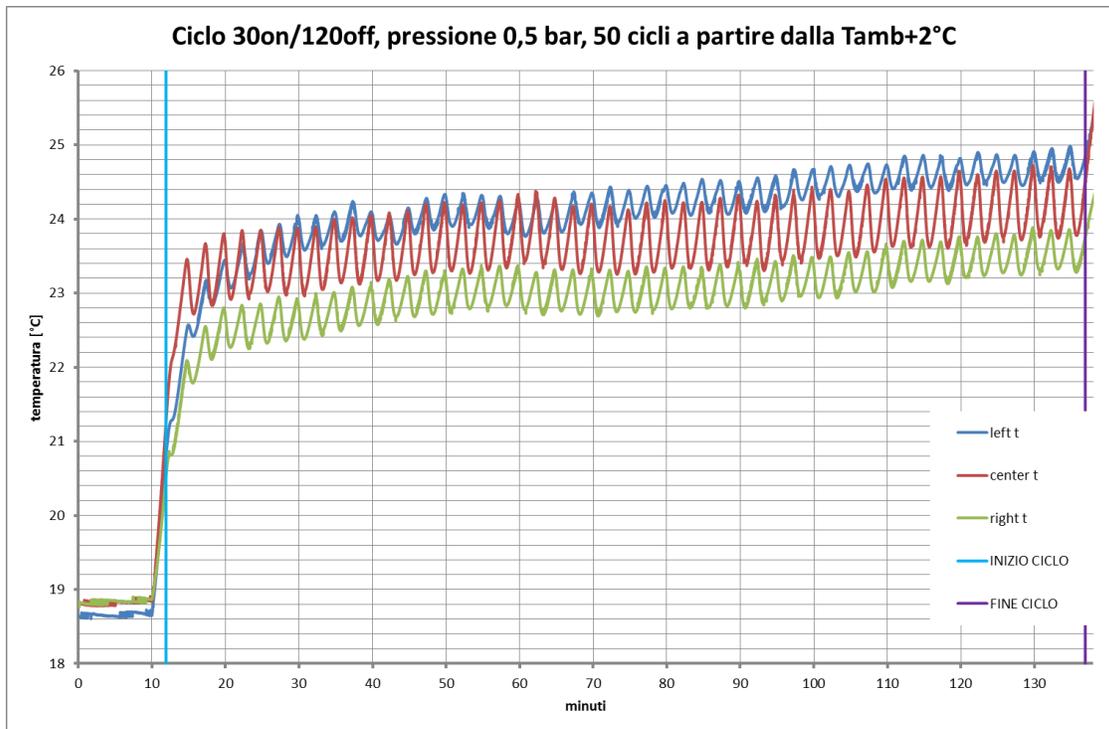


Figura 6.1: 50 cicli di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off, a partire dalla Tamb+2°C e alla pressione di 0.5 bar.

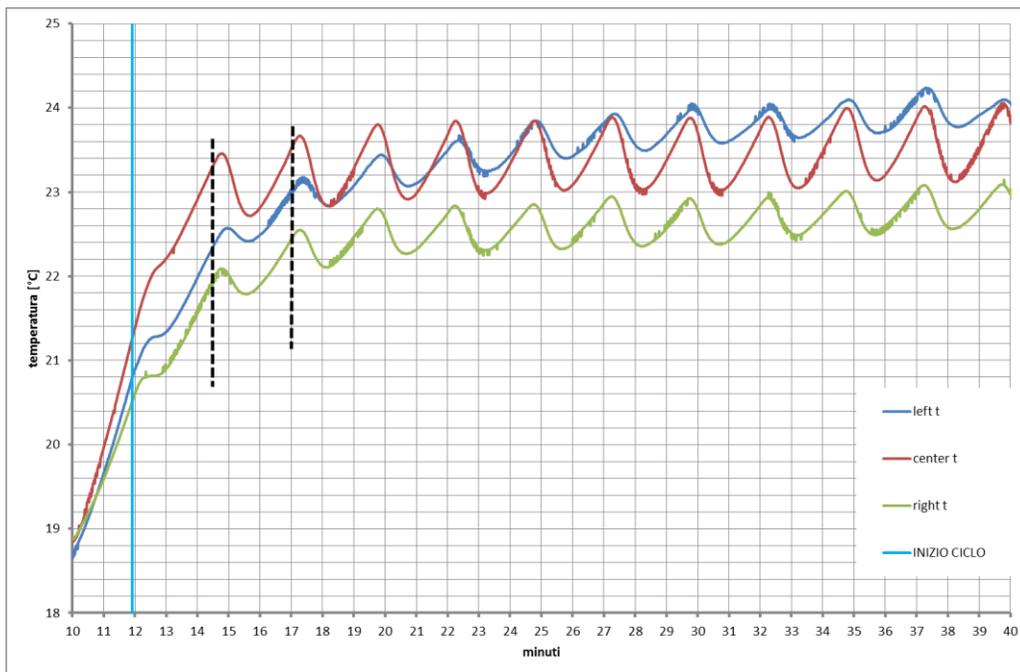


Figura 6.2: zoom della zona del primo ciclo di figura 6.1. Le linee tratteggiate indicano la fine del I e del II ciclo.

Inoltre, come in quasi tutte le prove effettuate, si può notare una certa discrepanza tra i valori misurati dalla termocoppia di destra e quella di sinistra. Infatti, nonostante l'andamento delle loro temperature dovrebbe essere circa uguale, la termocoppia di destra registra sempre almeno 1°C in meno dell'altra. Delle possibili spiegazioni a questo fenomeno sono già state date nei capitoli precedenti.

Si evidenzia, infine, come siano stati necessari quasi 2 minuti di riscaldamento affinché la temperatura del pannello aumentasse di 2°C rispetto a quella ambiente e si avviasse così il primo ciclo di on/off.

6.2 Pressione 0.5 bar, inizio ciclo alla Tamb+4°C

La prova descritta in figura 6.3 ha la stessa struttura della precedente, con l'unica differenza che il primo ciclo di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off viene fatto partire quando la temperatura indicata dalla termocoppia centrale è aumentata di 4°C rispetto a quella ambiente, misurata prima dell'accensione del faro e pari a 20.6°C.

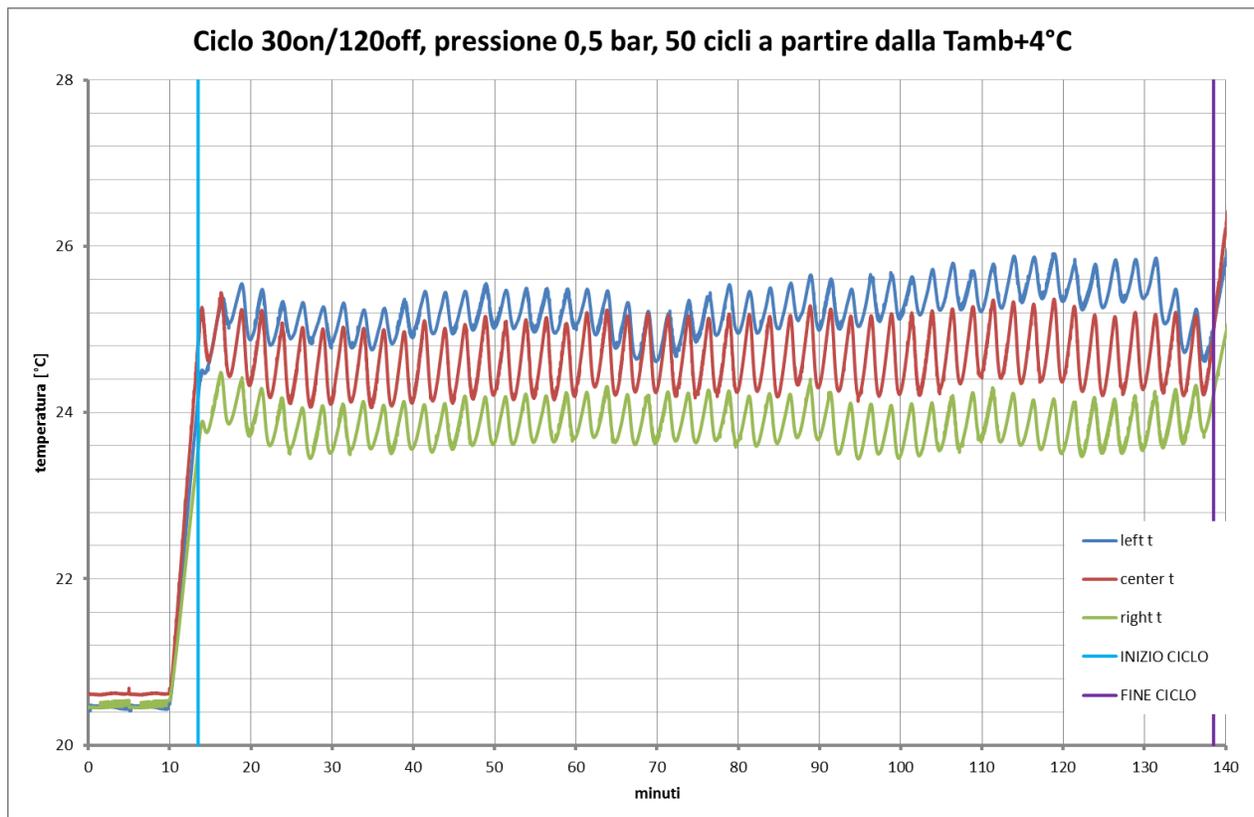


Figura 6.3: 50 cicli di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off, a partire dalla Tamb+4°C e alla pressione di 0.5 bar.

Zoomando il grafico nella zona in cui si avvia il primo ciclo di on/off è possibile vedere come, rispetto a quanto accadeva nella prova precedente, nel corso dei primi 30 secondi di raffreddamento la temperatura del pannello non cresca, ma diminuisca, e, in pochi cicli, si stabilizzi intorno ai 25°C, temperatura di poco maggiore di quella alla quale si è cominciato a raffreddare il pannello.

Inoltre, in questo caso, l'andamento della temperatura del pannello non risente di quello della temperatura ambiente. Ciò è dovuto al fatto che, mentre la prova precedente è stata effettuata nella mattinata del 10 ottobre, quest'ultima è stata eseguita nel tardo pomeriggio dello stesso giorno e quindi con una temperatura ambiente che non aumentava nel corso della prova stessa.

Infine, per aumentare la temperatura ambiente di 4°C, il faro ha impiegato tre minuti e mezzo.

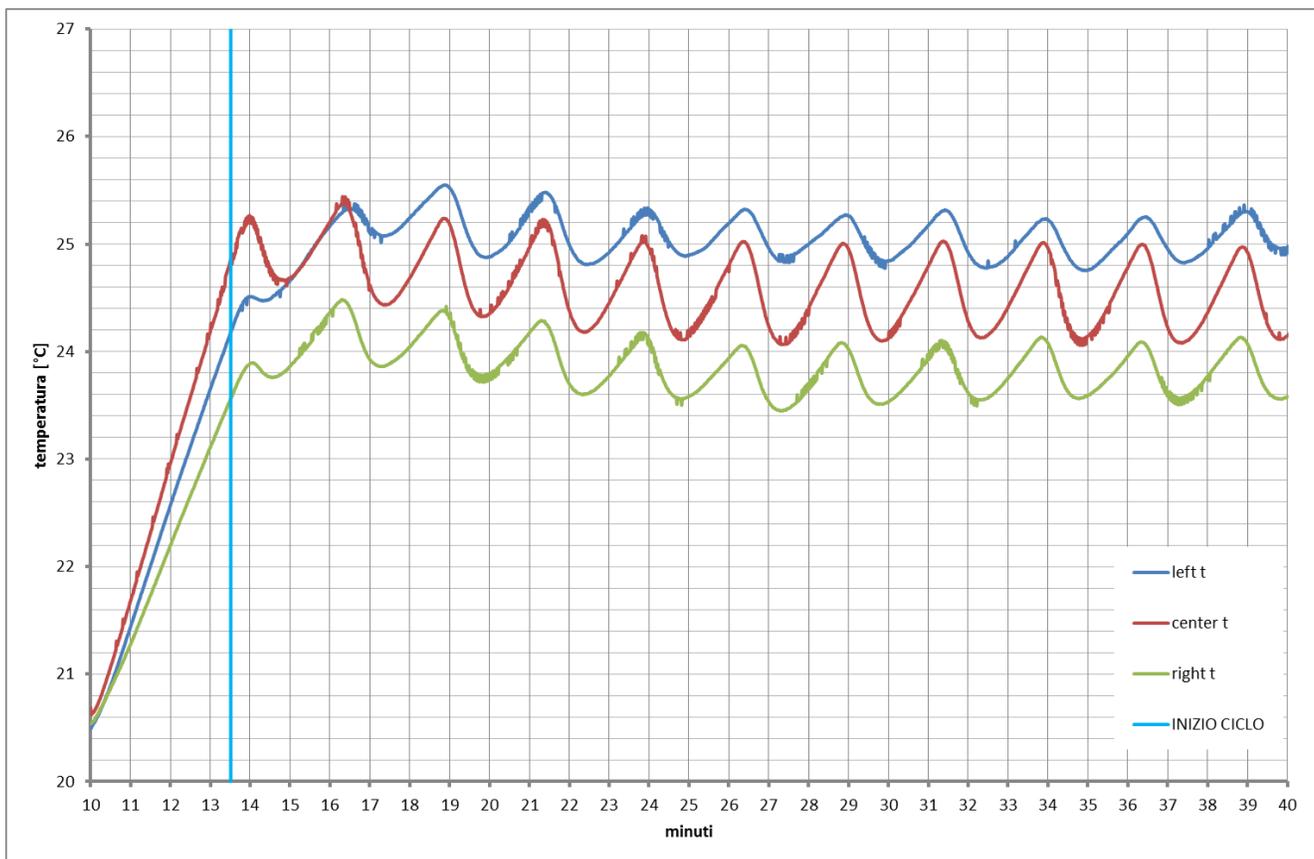


Figura 6.4: zoom della zona del primo ciclo di figura 6.3.

6.3 Pressione 0.5 bar, inizio ciclo alla Tamb+6°C

In figura 6.5 è riportata una prova identica alle precedenti, in cui però il primo ciclo di on/off viene fatto partire quando la temperatura ambiente, pari a 18.9°C, è aumentata di 6°C.

Dal grafico è subito evidente come, rispetto alle prove precedenti, la temperatura del pannello si stabilizzi questa volta ad una temperatura inferiore di quella a cui si è iniziato a raffreddare il pannello stesso. Infatti, mentre il primo ciclo di on/off viene fatto partire quando la termocoppia centrale indica 24.9°C, dopo appena 3 cicli essa si stabilizza intorno a 23.5°C.

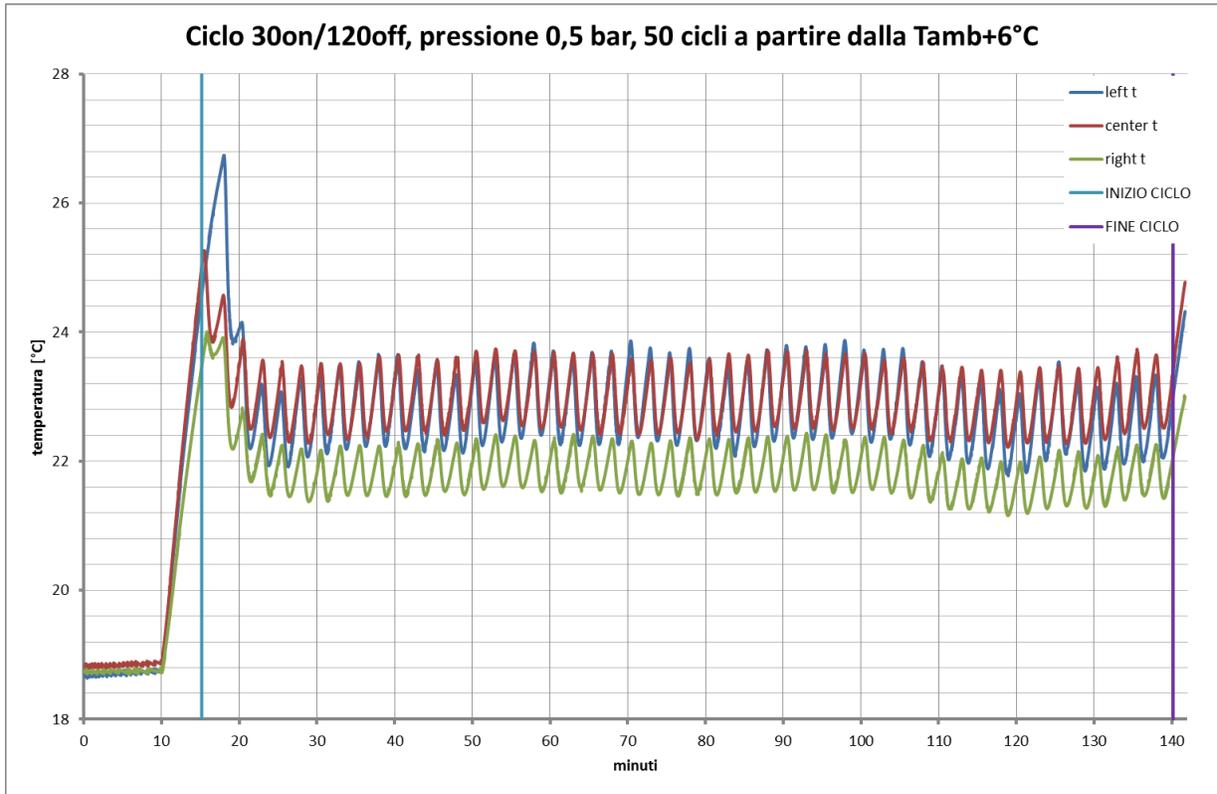


Figura 6.5: 50 cicli di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off, a partire dalla Tamb+6°C e alla pressione di 0.5 bar.

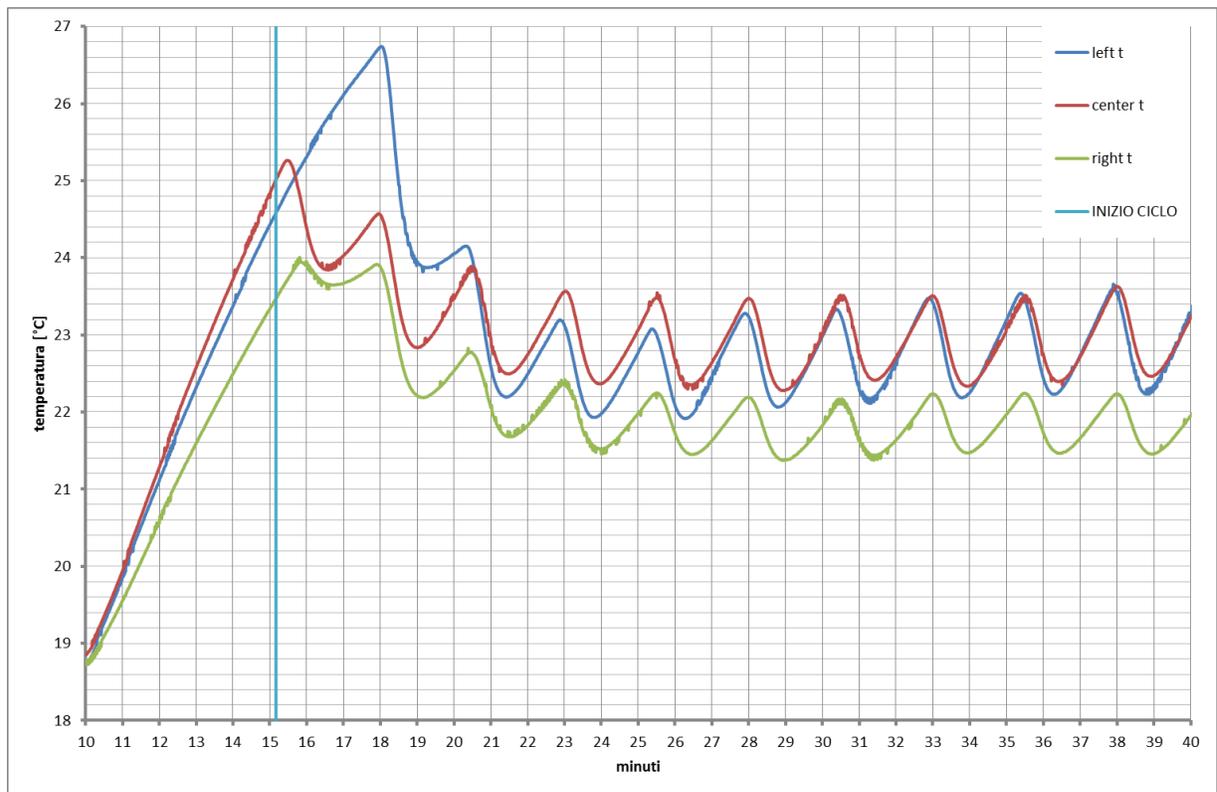


Figura 6.6: zoom della zona del primo ciclo di figura 6.5.

Il tempo impiegato dal faro per aumentare la temperatura ambiente di 6°C è di poco maggiore a 5 minuti.

Confrontando questa prova con le precedenti, si può dire che essa è sicuramente più conveniente. Infatti, nonostante si lasci riscaldare il pannello per un tempo maggiore, si ottiene un salto termico maggiore e, inoltre, la temperatura del pannello si stabilizza comunque ad una temperatura più bassa rispetto alle altre prove.

6.4 Pressione 0.5 bar, inizio ciclo alla Tamb+8°C

Infine, in figura 6.7 è rappresentata l'ultima prova effettuata alla pressione di 0.5 bar. Anche questa è del tutto analoga alle precedenti, con l'unica differenza che si è lasciato riscaldare ulteriormente il pannello, facendo partire il primo ciclo di on/off solamente quando la temperatura ambiente, pari a 19.1°C, è aumentata di 8°C.

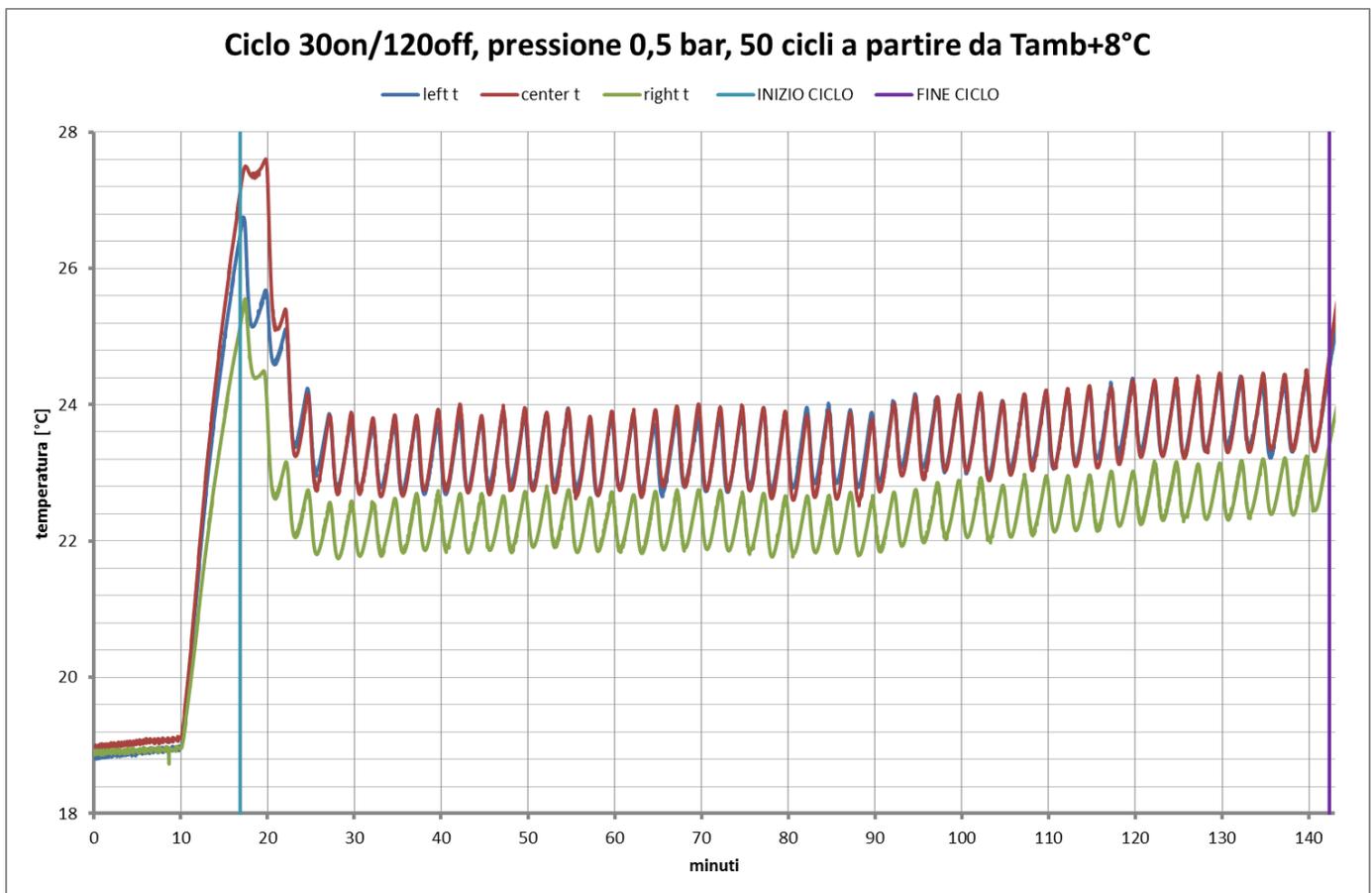


Figura 6.7: 50 cicli di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off, a partire dalla Tamb+8°C e alla pressione di 0.5 bar.

Come nella prova precedente, anche in quest'ultima la temperatura del pannello si stabilizza ad una temperatura inferiore di quella alla quale si è iniziato a raffreddarlo.

Infatti, come si può vedere zoomando il grafico nella zona di inizio raffreddamento, già dopo 4 cicli la temperatura registrata dalla termocoppia centrale passa da 27.1°C a poco meno di 24°C, stabilizzandosi a questo valore e compiendo dunque un salto termico di 3°C.

Infine, si può notare come dal minuto 90 in poi, le temperature rilevate dalle termocoppie riprendano lievemente a salire a causa dell'aumento della temperatura ambiente.

Il tempo impiegato dal faro per aumentare la temperatura ambiente di 8°C è di poco inferiore a 7 minuti.

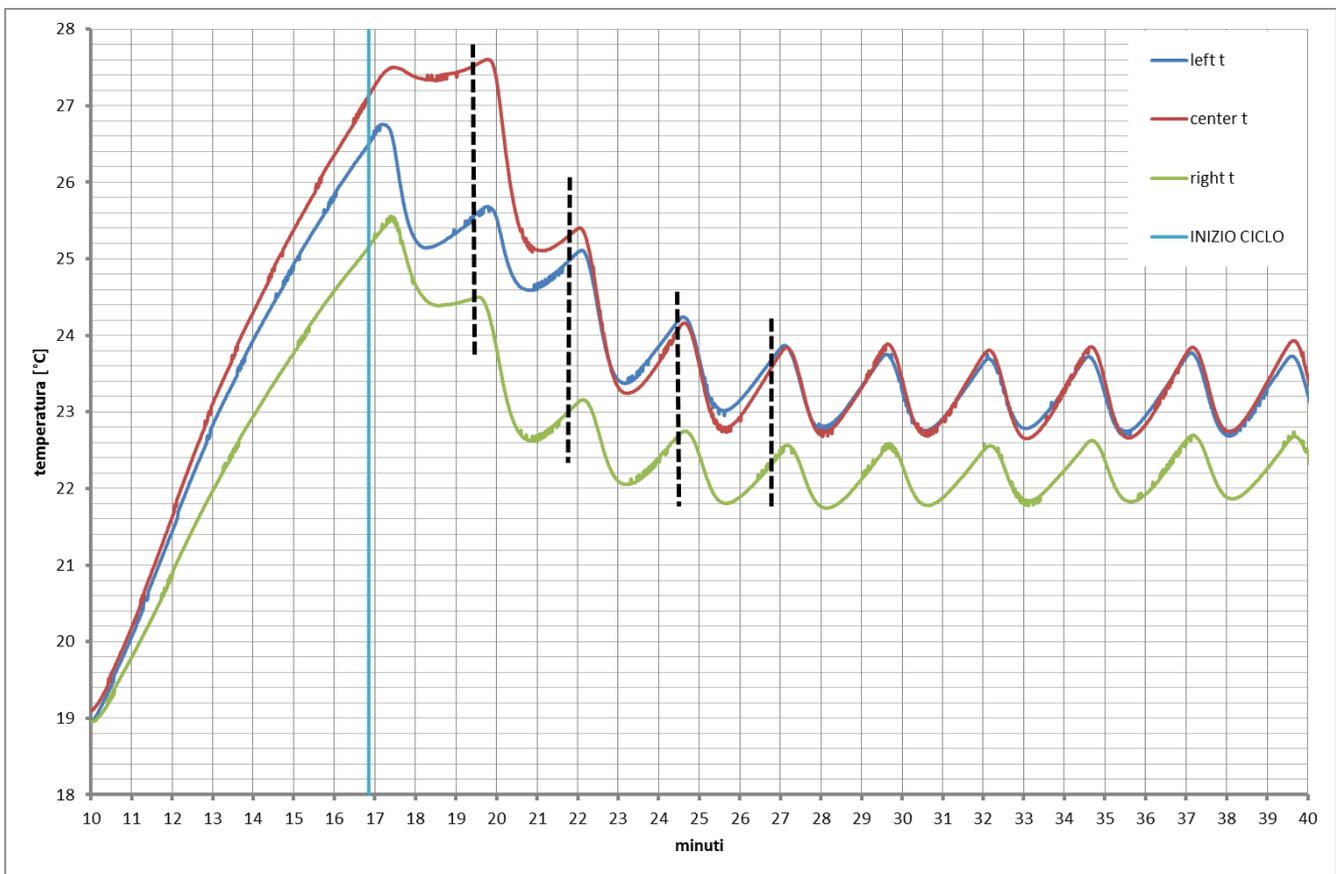


Figura 6.8: zoom della zona del primo ciclo di figura 6.7. Le linee tratteggiate indicano la fine del I, II, III e IV ciclo.

Confrontando questa prova con la precedente, essa risulta ancora più conveniente. Infatti, essa permette di ottenere un salto termico maggiore e quindi un maggiore miglioramento delle prestazioni del pannello. Inoltre, la temperatura alla quale esso si stabilizza è di pochissimo maggiore rispetto a quella alla quale il pannello si stabilizzava incominciando il raffreddamento ad una temperatura di 2°C inferiore.

6.5 Confronto grafico tra le prove a 0.5 bar

In figura 6.9 è riportato un confronto grafico tra l'andamento della temperatura rilevato dalla termocoppia centrale nel corso delle prove descritte nei paragrafi precedenti, effettuate a pressione costante, pari a 0.5 bar, ma al variare della temperatura alla quale fare partire il primo ciclo di on/off. Poiché in tre prove su quattro la temperatura ambiente di partenza è di circa 19°C, mentre in una è di 20.6°C, in quest'ultima sono stati traslati tutti i valori di temperatura registrati, in modo tale da portare la temperatura ambiente allo stesso valore delle altre e ottenere così un confronto grafico a parità di temperatura ambiente (oltre che a parità di pressione).

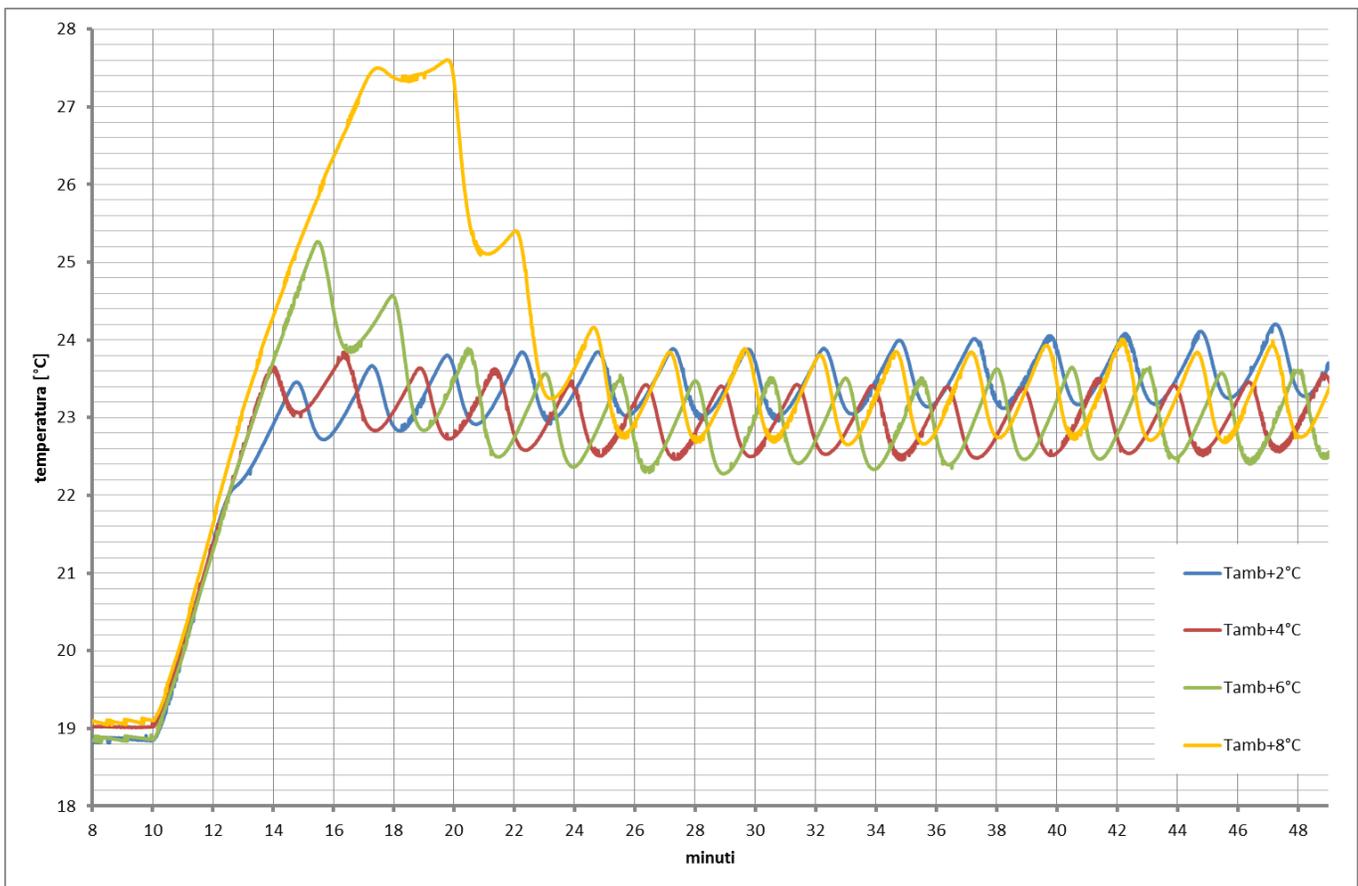


Figura 6.9: confronto grafico tra le 4 prove effettuate a 0.5 bar e temperatura di inizio primo ciclo variabile.

Anche questo grafico conferma quanto detto nei paragrafi precedenti. Come si può vedere, infatti, facendo partire il raffreddamento del pannello alla $T_{amb}+8^{\circ}\text{C}$ si ottiene un salto termico maggiore rispetto a quello che si ottiene nelle altre prove e, pertanto, un maggiore incremento delle prestazioni del pannello. Inoltre, nonostante il maggiore riscaldamento, la temperatura del pannello si stabilizza ad una temperatura circa uguale alle altre. La portata d'acqua consumata durante le prove è invece sempre la stessa, essendo la pressione, il ciclo ed il numero di cicli costanti.

6.6 Pressione 1 bar, inizio ciclo alla $T_{amb}+2^{\circ}\text{C}$

In figura 6.10 è riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova costituita dalle stesse identiche fasi di quella descritta nel paragrafo 6.1, con l'unica differenza che l'acqua di raffreddamento, invece di essere erogata alla pressione di 0.5 bar, viene erogata a 1 bar.

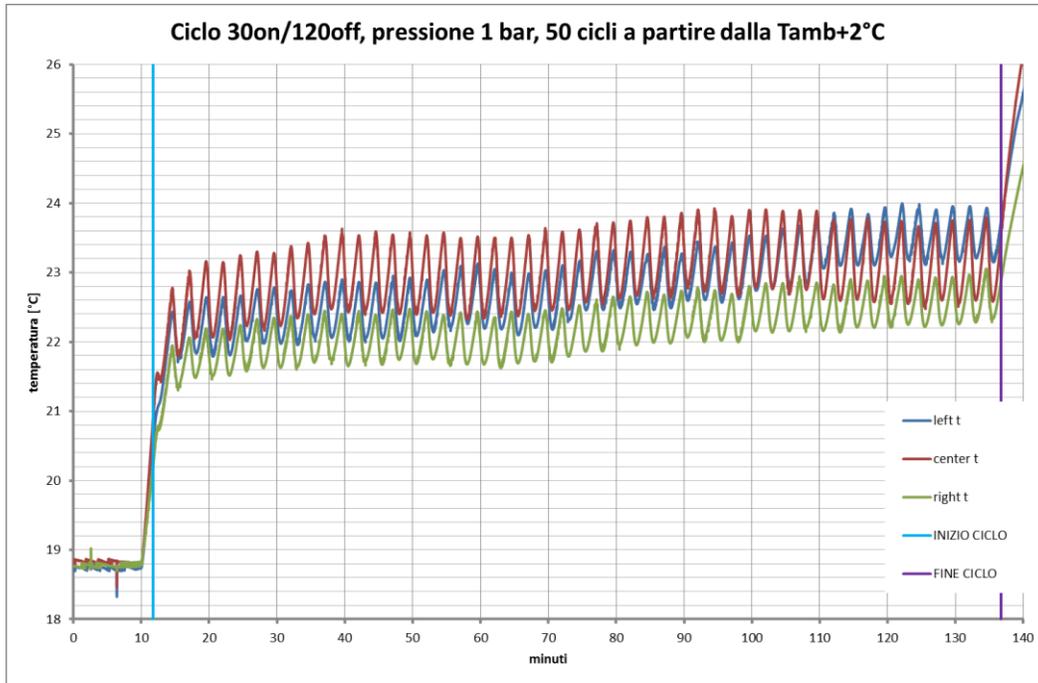


Figura 6.10: 50 cicli di 30 secondi H_2O on – 120 secondi H_2O off, a partire dalla $T_{amb}+2^{\circ}\text{C}$ e alla pressione di 1 bar.

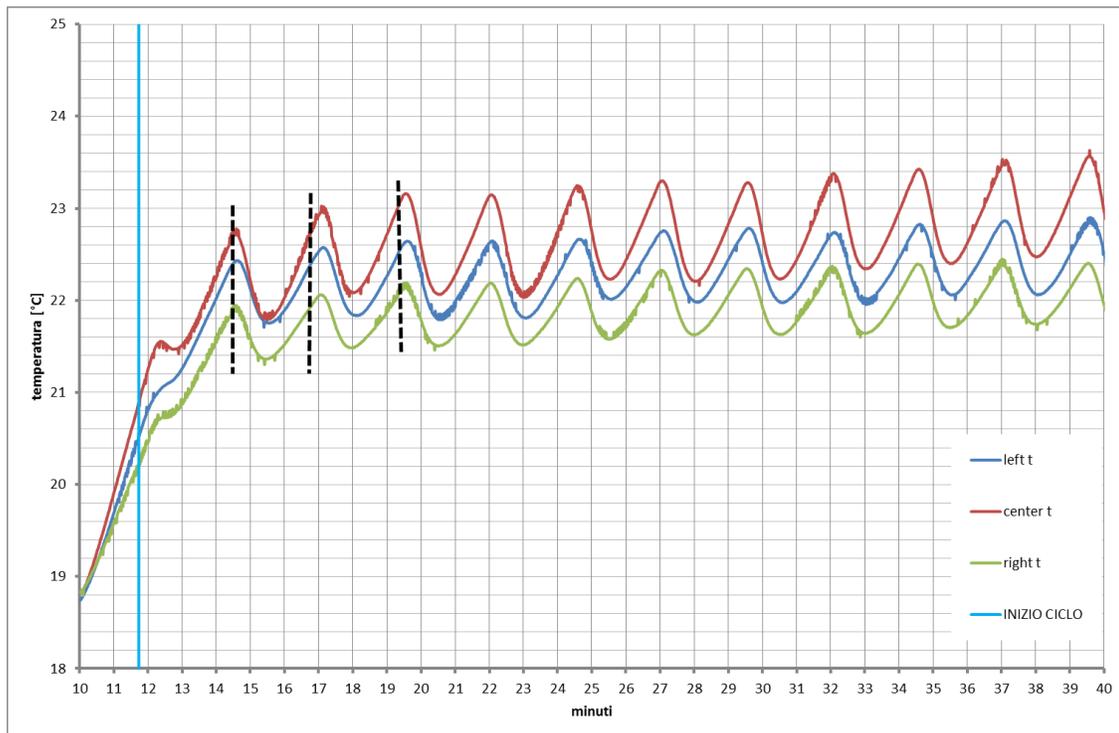


Figura 6.11: zoom della zona del primo ciclo di figura 6.10. Le linee tratteggiate indicano la fine del I, II e III ciclo.

Come si vede dal grafico e come accadeva anche nella corrispondente prova a 0.5 bar, dopo pochi cicli la temperatura misurata dalla termocoppia centrale si stabilizza ad una temperatura maggiore (23.5°C) rispetto ai 20.8°C ai quali si era fatto partire il primo ciclo di on/off.

Pertanto, confrontando queste due prove, sembra che aumentare la pressione dell'acqua di raffreddamento da 0.5 a 1 bar, mantenendo invece costante il momento in cui si avvia il primo ciclo di on/off, non porti ad evidenti miglioramenti.

Infine, il tempo impiegato dal faro per aumentare di 2°C la temperatura del pannello è stato poco meno di 2 minuti, coerentemente con quanto accadeva nella prova del paragrafo 6.1.

6.7 Pressione 1 bar, inizio ciclo alla Tamb+4°C

In figura 6.12 è riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova analoga a quella descritta nel paragrafo 6.2, nella quale però l'acqua viene erogata alla pressione di 1 bar.

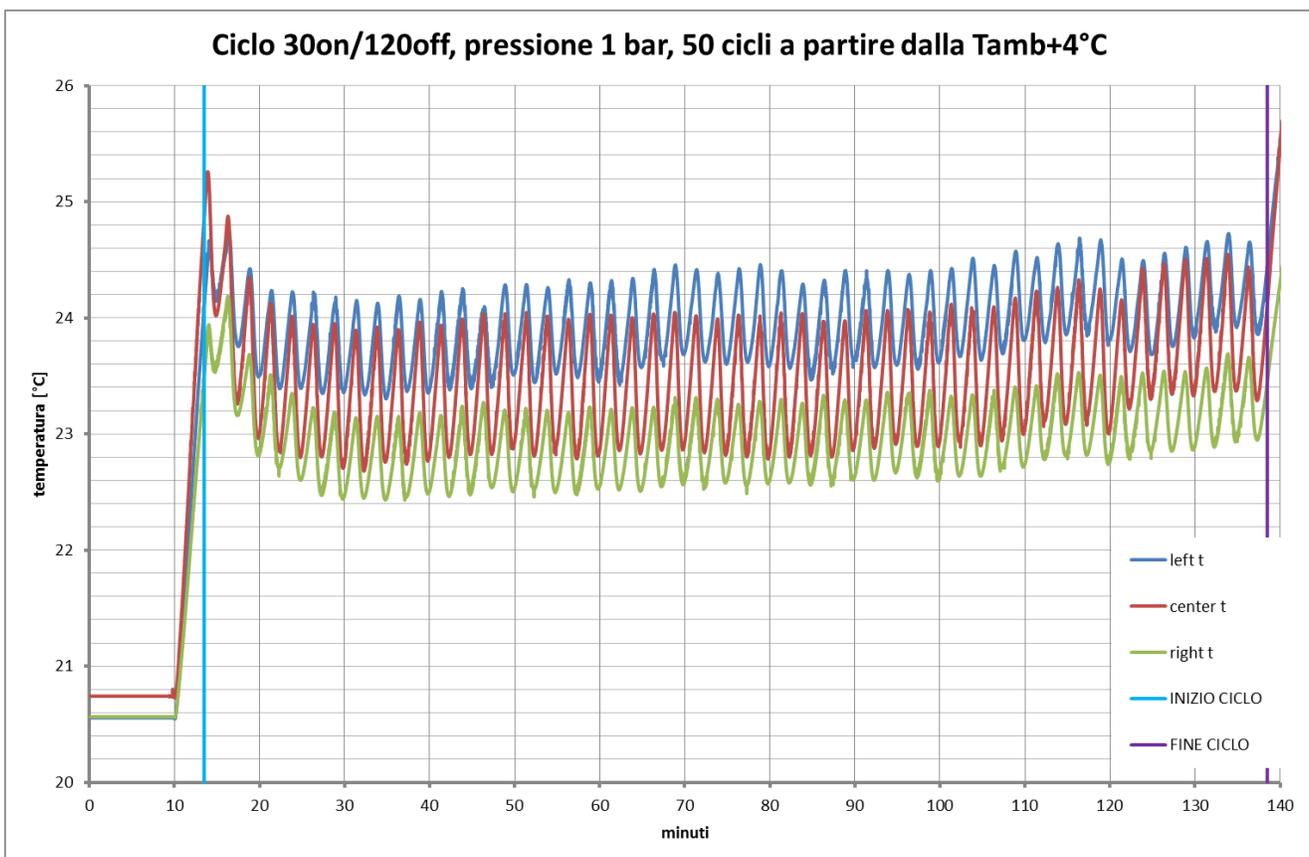


Figura 6.12: 50 cicli di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off, a partire dalla Tamb+4°C e alla pressione di 1 bar.

Rispetto alla corrispondente prova a 0.5 bar, nella quale la temperatura del pannello si stabilizzava a circa la stessa temperatura a cui si era fatto partire il primo ciclo, in quest'ultima la temperatura del pannello scende al di sotto di quella di inizio raffreddamento.

In figura 6.13 è rappresentato un confronto grafico tra l'andamento della temperatura rilevato dalla termocoppia centrale durante i primi cicli di on/off della prova descritta nel paragrafo 6.2 e quello della prova rappresentata in figura 6.12. Poiché la temperatura ambiente è praticamente la stessa in entrambe le prove, queste differiscono tra loro solamente per la pressione a cui viene erogata l'acqua. Come si può osservare, l'andamento della temperatura della prova ad 1 bar ha una pendenza maggiore di quella a 0.5 bar e permette quindi un migliore raffreddamento del pannello, smentendo così quanto detto nel paragrafo precedente.

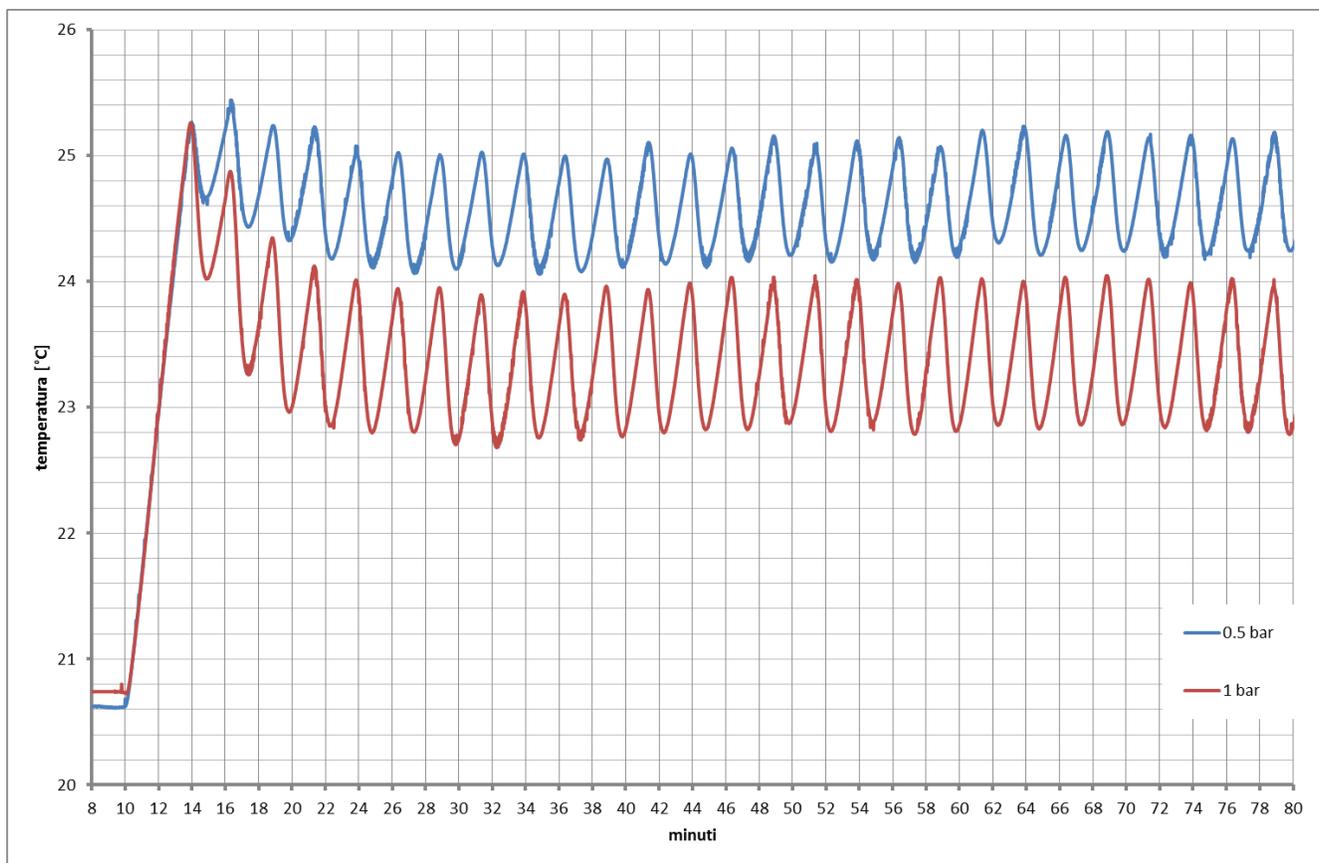


Figura 6.13: confronto grafico tra due prove di ciclo 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off a partire dalla T_{amb}+4°C e acqua di raffreddamento a pressioni diverse.

6.8 Pressione 1 bar, inizio ciclo alla Tamb+6°C

In figura 6.14 è riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova analoga a quella descritta nel paragrafo 6.3, con l'unica differenza che l'acqua viene erogata alla pressione di 1 bar invece che 0.5 bar.

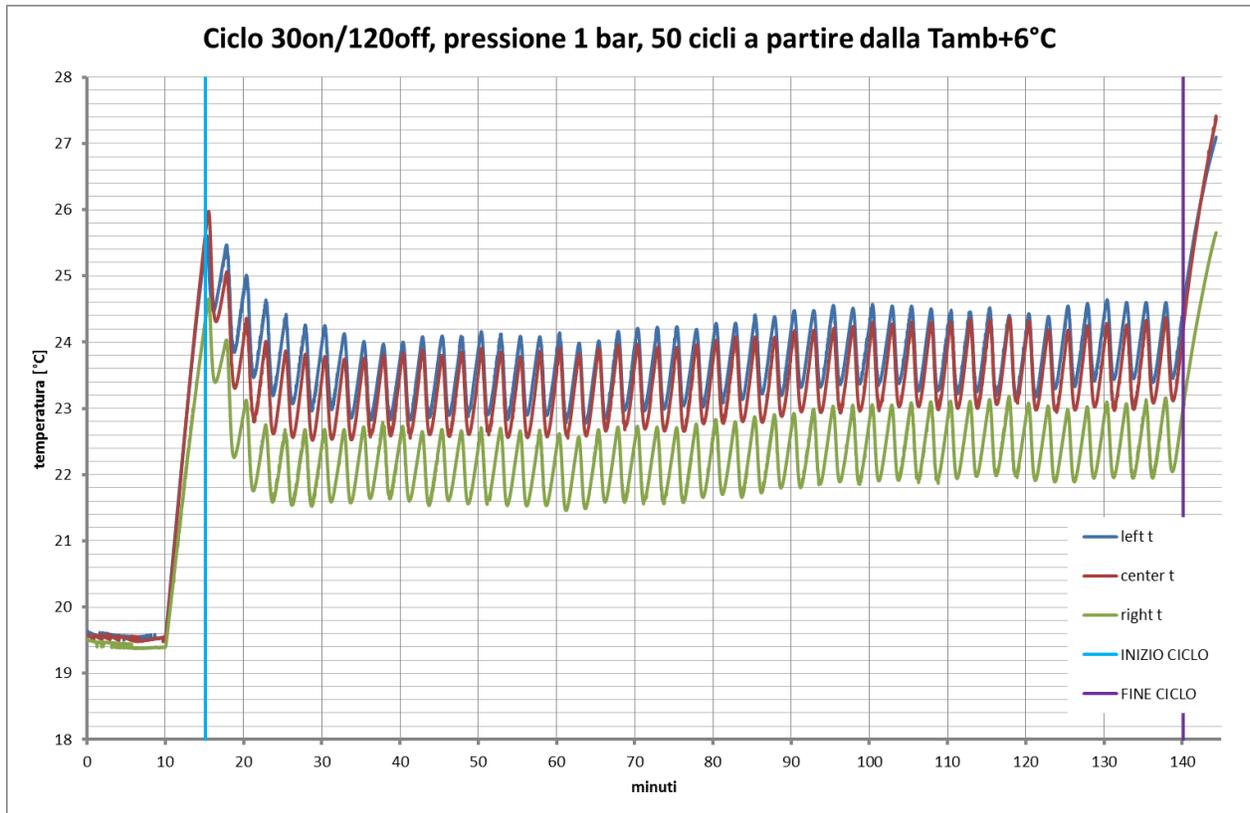


Figura 6.14: 50 cicli di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off, a partire dalla Tamb+6°C e alla pressione di 1 bar.

Come si può vedere dal grafico, anche in questa prova la temperatura del pannello si stabilizza ad una temperatura inferiore rispetto ai 25.5°C a cui si avvia il primo ciclo di raffreddamento.

Analogamente a quanto fatto nel paragrafo precedente, in figura 6.15 è rappresentato un confronto grafico tra l'andamento della temperatura rilevato dalla termocoppia centrale durante i primi cicli di on/off della prova rappresentata in figura 6.14 e quello della corrispondente prova a 0.5 bar. Poiché la temperatura ambiente tra le due prove è leggermente diversa, i valori registrati nella prova ad 1 bar sono stati tutti diminuiti di 0.8°C, così da ottenere un confronto a parità di temperatura ambiente. Dal grafico si vede che, mentre durante i primi 30 cicli la prova ad 1 bar consente un raffreddamento del pannello migliore, verso la fine delle 2 prove l'andamento delle temperature va a coincidere. Questo probabilmente avviene perché, mentre durante la prova ad 1 bar la temperatura ambiente aumentava, influenzando così l'andamento della temperatura, in quella a 0.5 bar restava costante.

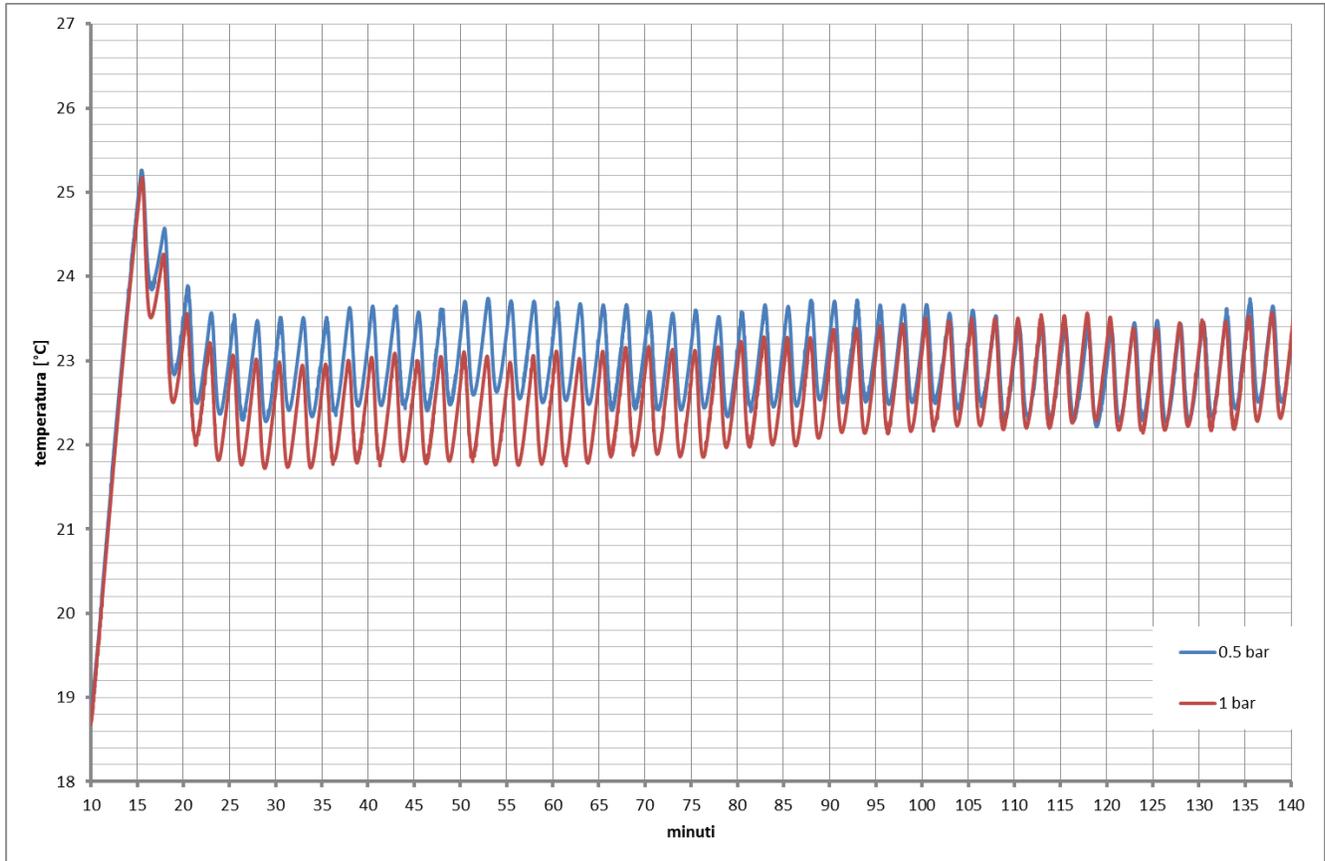


Figura 6.15: confronto grafico tra due prove di ciclo 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off a partire dalla Tamb+6°C e acqua di raffreddamento a pressioni diverse.

6.9 Pressione 1 bar, inizio ciclo alla Tamb+8°C

Infine, in figura 6.16 è riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova effettuata alla pressione di 1 bar e nella quale si avvia il primo ciclo di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off quando la temperatura ambiente, pari a 19.1°C, è aumentata di 8°C.

Come si vede dal grafico, già dopo pochi cicli la temperatura registrata dalla termocoppia centrale passa da 27.1°C a poco meno di 23.5°C, stabilizzandosi a questo valore e compiendo dunque un salto termico di 3,5°C, ovvero mezzo grado in più rispetto a quanto accadeva nella corrispondente prova a 0.5 bar. Questa differenza costante di mezzo grado tra il salto termico ottenuto tra la prova di raffreddamento con acqua alla pressione di 1 bar e quella effettuata a partire dalla stessa temperatura, ma con acqua alla pressione di 0.5 bar, è visibile anche nel confronto grafico, rappresentato in figura 6.17.

La prova ad 1 bar consente quindi di ottenere un maggiore miglioramento delle prestazioni del pannello rispetto a quella a 0.5 bar, ma ha lo svantaggio di consumare una maggiore quantità di acqua.

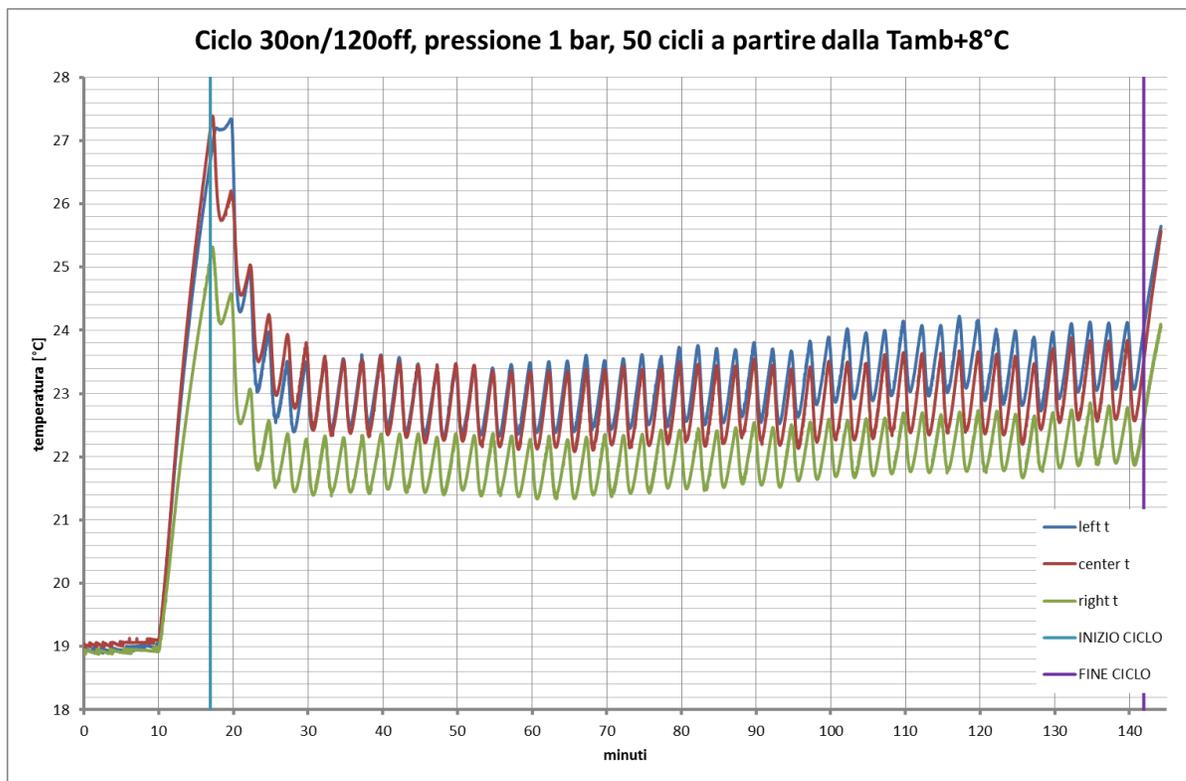


Figura 6.16: 50 cicli di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off, a partire dalla Tamb+8°C e alla pressione di 1 bar.

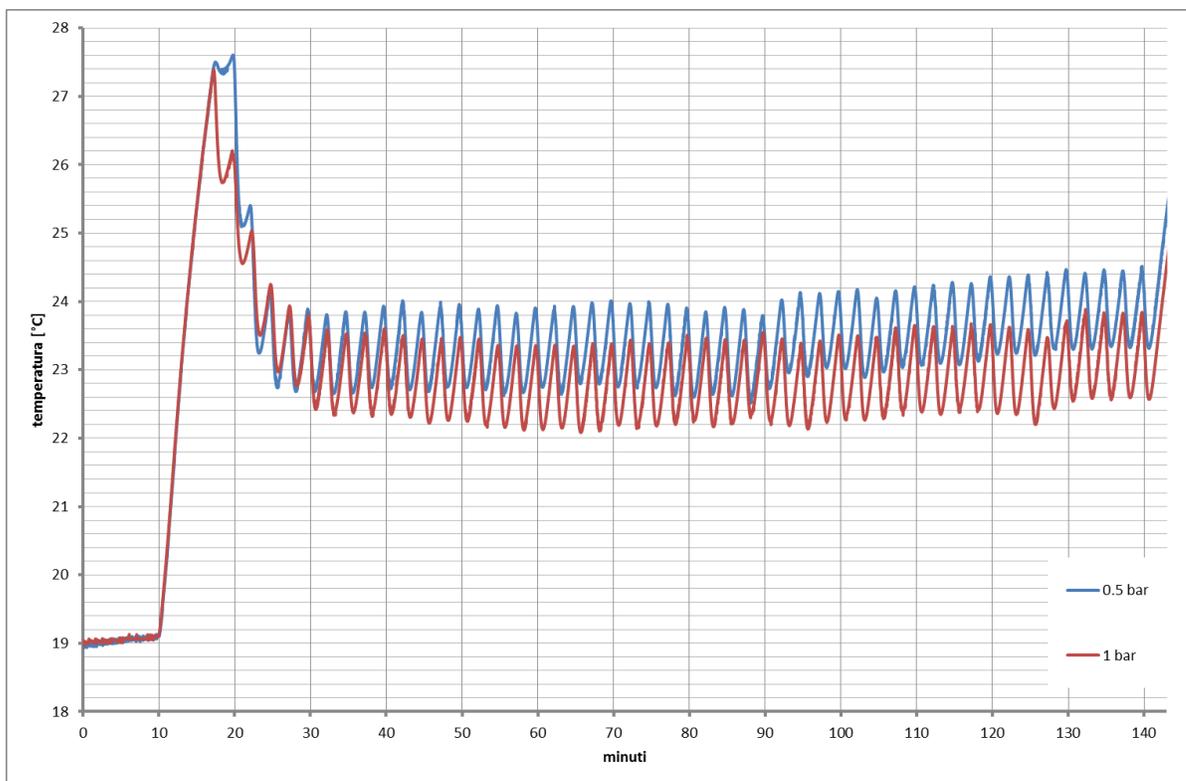


Figura 6.17: confronto grafico tra due prove di ciclo 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off a partire dalla Tamb+8°C e acqua di raffreddamento a pressioni diverse.

6.10 Confronto grafico tra le prove ad 1 bar

In figura 6.18 è riportato un confronto grafico tra l'andamento della temperatura rilevato dalla termocoppia centrale nel corso delle prove effettuate alla pressione di 1 bar e al variare della temperatura alla quale viene fatto partire il primo ciclo di on/off. Per avere un confronto a parità di temperatura ambiente (oltre che a parità di pressione), tutti i valori di temperatura registrati nel corso delle prove nelle quali il raffreddamento inizia alla $T_{amb}+4^{\circ}\text{C}$ e alla $T_{amb}+6^{\circ}\text{C}$ sono stati traslati, in modo che la temperatura ambiente risulti pari a 19°C e circa uguale a quella delle altre due prove.

Come si vede dal grafico, e come accadeva anche per le prove alla pressione di 0.5 bar, facendo partire il raffreddamento del pannello alla $T_{amb}+8^{\circ}\text{C}$ si ottiene un salto termico maggiore rispetto a quello che si ottiene nelle altre prove e, pertanto, un maggiore incremento delle prestazioni del pannello. Inoltre, essendo la pressione, il ciclo ed il numero di cicli costanti, la portata d'acqua consumata durante le 4 prove è sempre la stessa. Pertanto, tra le prove alla pressione di 1 bar, quella nella quale si inizia il raffreddamento alla $T_{amb}+8^{\circ}\text{C}$ è sicuramente la più conveniente.

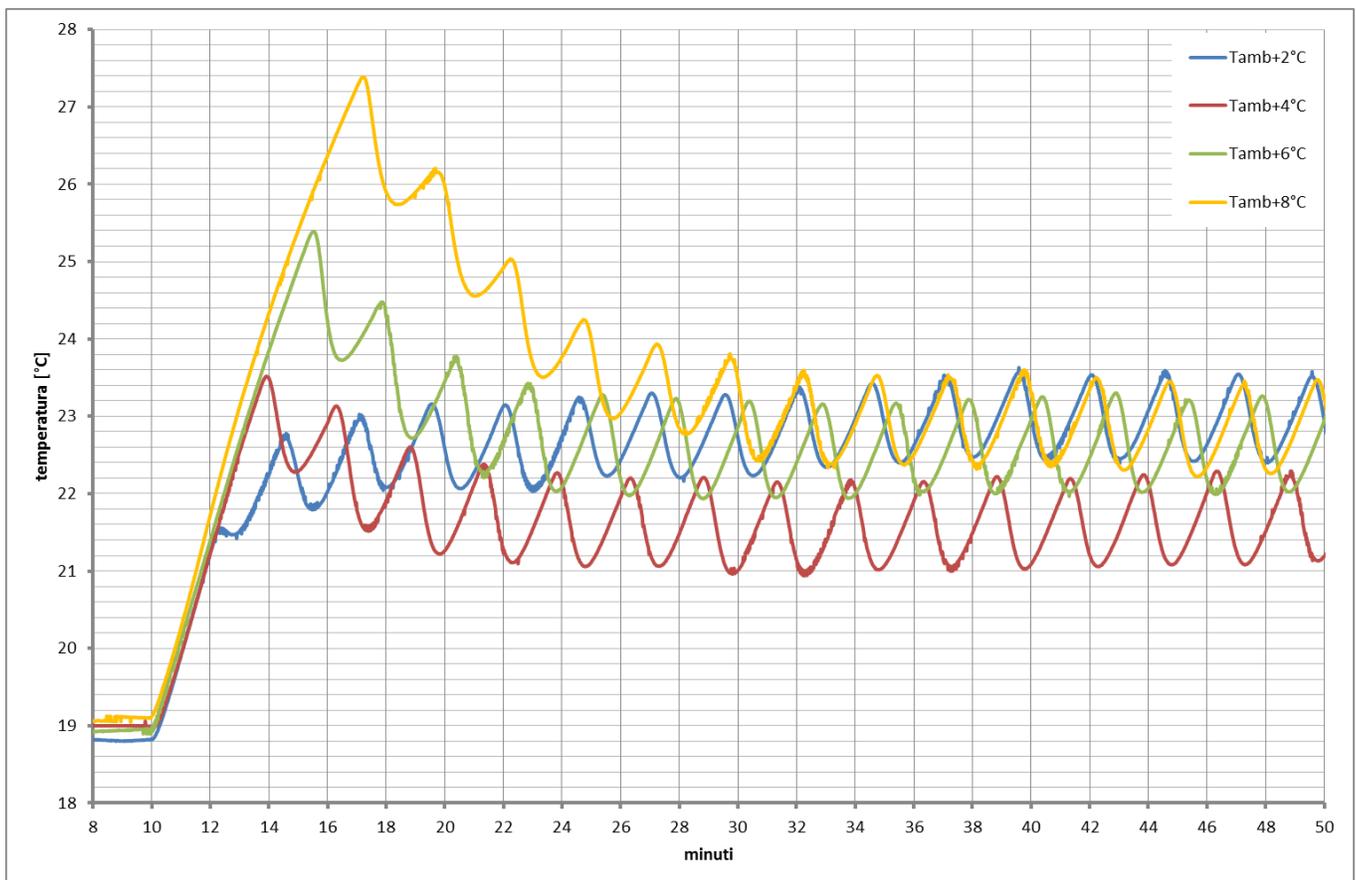


Figura 6.18: confronto grafico tra le 4 prove effettuate a 1 bar e temperatura di inizio primo ciclo variabile.

6.11 Pressione 1.5 bar, inizio ciclo alla Tamb+2°C

Infine, analogamente a quanto fatto per 0.5 ed 1 bar, anche alla pressione di 1.5 bar sono state effettuate 4 diverse prove di ciclo di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off al variare del momento in cui iniziare il raffreddamento del pannello.

In figura 6.19 è riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova nella quale viene fatto partire il primo ciclo di on/off quando la temperatura del pannello è aumentata di 2°C rispetto a quella ambiente e l'acqua di raffreddamento viene erogata alla pressione di 1,5 bar.

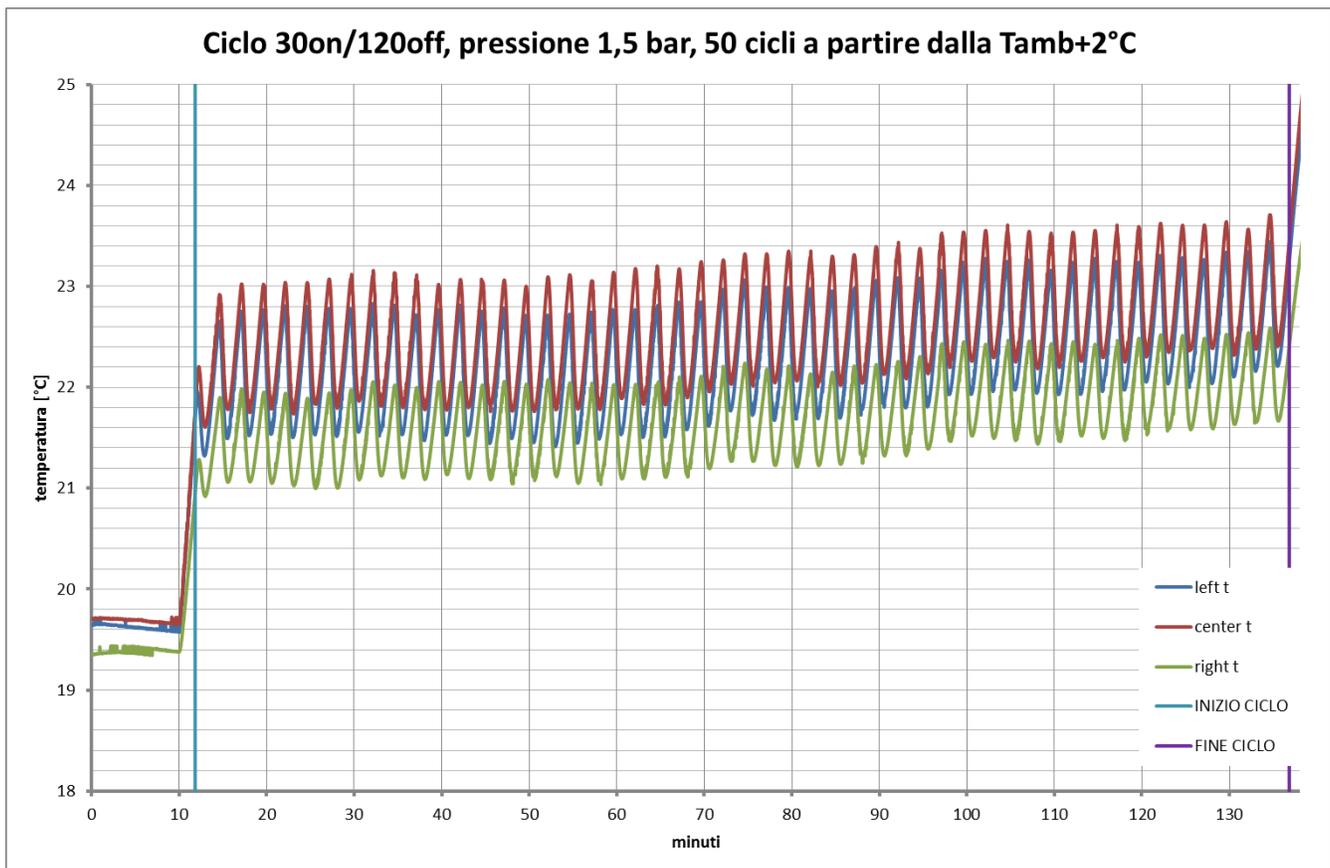


Figura 6.19: 50 cicli di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off, a partire dalla Tamb+2°C e alla pressione di 1.5 bar.

In figura 6.20 è invece rappresentato un confronto grafico, a parità di temperatura ambiente, tra l'andamento della temperatura rilevato dalla termocoppia centrale durante i primi cicli della prova descritta in figura 6.19 e quello delle corrispondenti prove a 0.5 e 1 bar. Come si può vedere dal grafico, mentre nelle prove a pressione minore i primi 30 secondi di flusso d'acqua continuo non erano sufficienti ad abbassare la temperatura del pannello, nella prova a 1.5 bar lo sono. Inoltre, nonostante il pannello si stabilizzi sempre ad una temperatura leggermente maggiore di quella di inizio raffreddamento, aumentando la pressione questa temperatura è comunque più bassa delle precedenti.

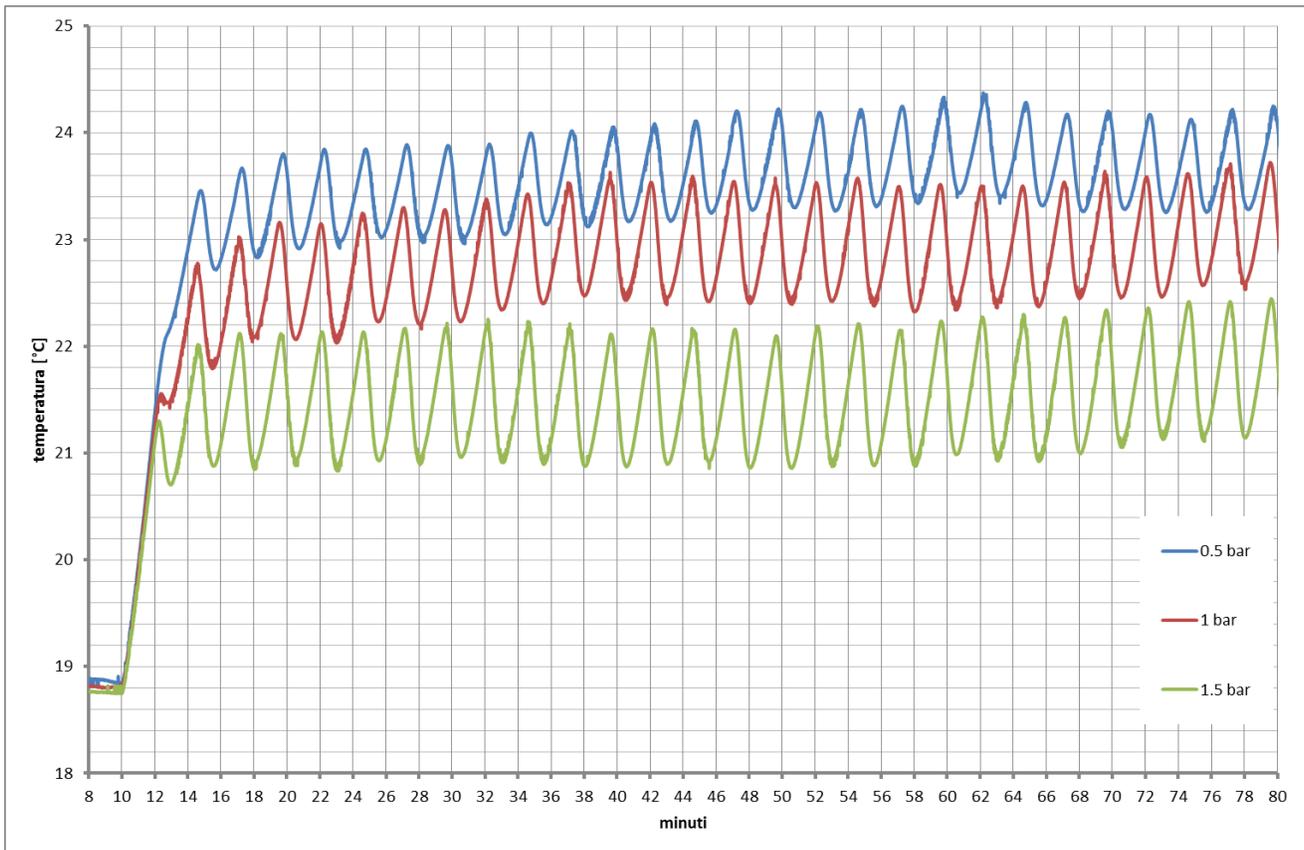


Figura 6.20: confronto grafico tra tre prove di ciclo 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off a partire dalla Tamb+2°C e acqua di raffreddamento a pressioni diverse.

6.12 Pressione 1.5 bar, inizio ciclo alla Tamb+4°C

In figura 6.21 è riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova analoga a quelle descritte nei paragrafi 6.2 e 6.7, ma nella quale l'acqua di raffreddamento viene erogata alla pressione di 1,5 bar.

Come accadeva nella corrispondente prova a 1 bar, anche alla pressione di 1.5 bar la temperatura del pannello scende al di sotto di quella di inizio raffreddamento. Tuttavia, confrontando a parità di temperatura ambiente l'andamento della temperatura rilevato dalla termocoppia centrale durante i primi cicli della prova a 1.5 bar con quello delle corrispondenti prove a 0.5 e 1 bar, si può vedere come il salto termico maggiore non si ottenga alla pressione di 1.5 bar, ma a quella di 1 bar. Questo risultato non coincide però con quanto determinato nel paragrafo precedente e verrà smentito anche nella prova successiva, nella quale aumentando la pressione si otterrà un salto termico maggiore.

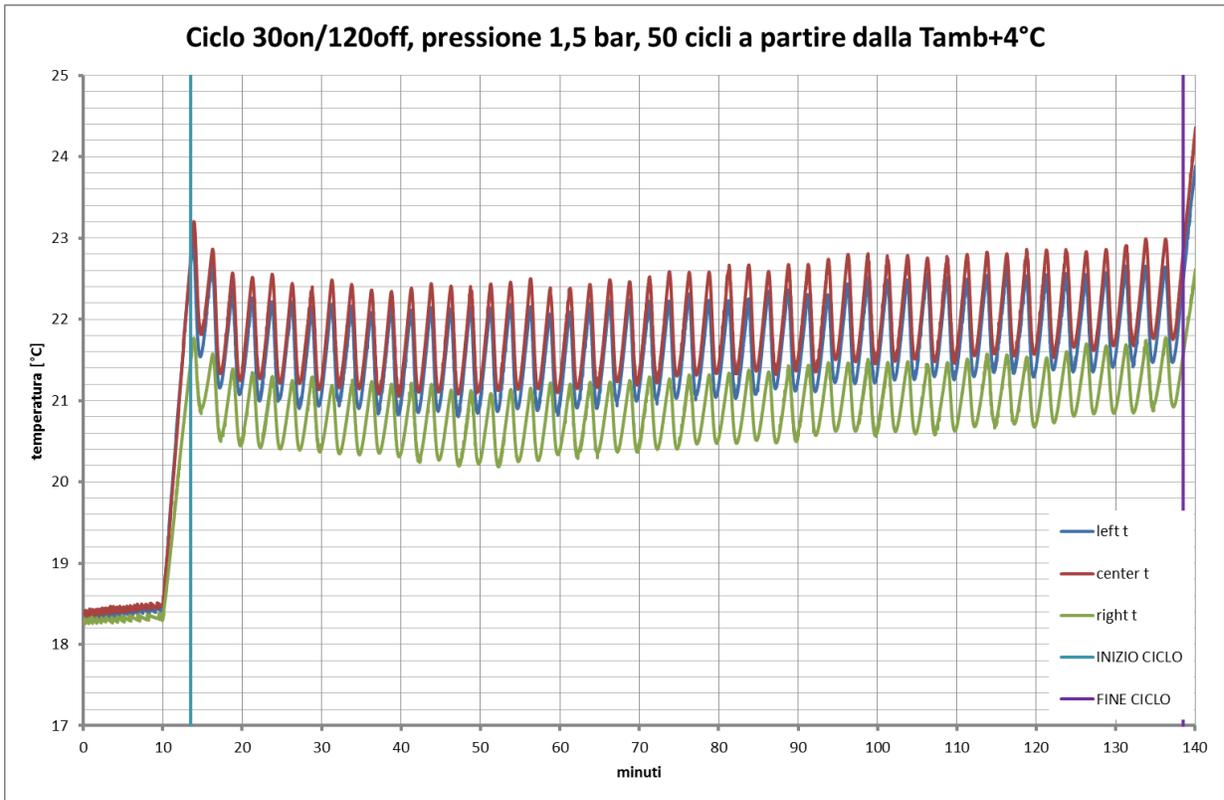


Figura 6.21: 50 cicli di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off, a partire dalla Tamb+4°C e alla pressione di 1.5 bar.

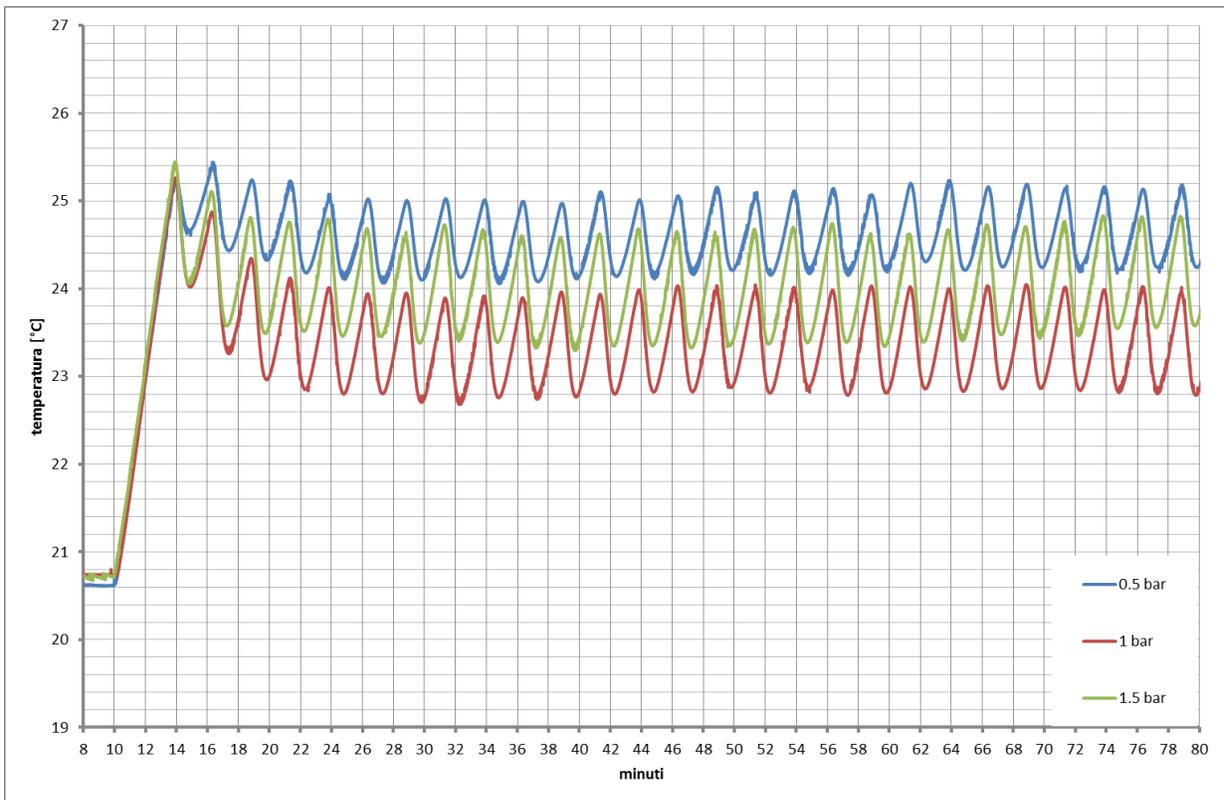


Figura 6.22: confronto grafico tra tre prove di ciclo 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off a partire dalla Tamb+4°C e acqua di raffreddamento a pressioni diverse.

6.13 Pressione 1.5 bar, inizio ciclo alla Tamb+6°C

In figura 6.23 è riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova del tutto analoga a quelle descritte nei paragrafi 6.3 e 6.8, con l'unica differenza che l'acqua viene erogata alla pressione di 1.5 bar invece che 0.5 bar o 1 bar.



Figura 6.23: 50 cicli di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off, a partire dalla Tamb+6°C e alla pressione di 1.5 bar.

Come si vede dal grafico, già dopo pochi cicli la temperatura registrata dalla termocoppia centrale passa da 25.1°C a circa 23°C, stabilizzandosi a questo valore e compiendo dunque un salto termico di 2°C.

Inoltre, come fatto nei paragrafi precedenti, in figura 6.24 è rappresentato un confronto grafico tra l'andamento della temperatura rilevato dalla termocoppia centrale durante i primi cicli di on/off della prova rappresentata in figura 6.23 e quello delle corrispondenti prove a 0.5 e 1 bar. Per ottenere un confronto a parità di temperatura ambiente, tutti i valori di temperatura registrati nella prova ad 1.5 bar sono stati traslati. Da questo grafico risulta subito evidente come, erogando l'acqua di raffreddamento alla pressione di 1.5 bar si ottenga un salto termico maggiore rispetto a quello ottenuto nelle altre prove. Questo, infatti, è di mezzo grado maggiore rispetto a quello che si otteneva ad 1 bar.

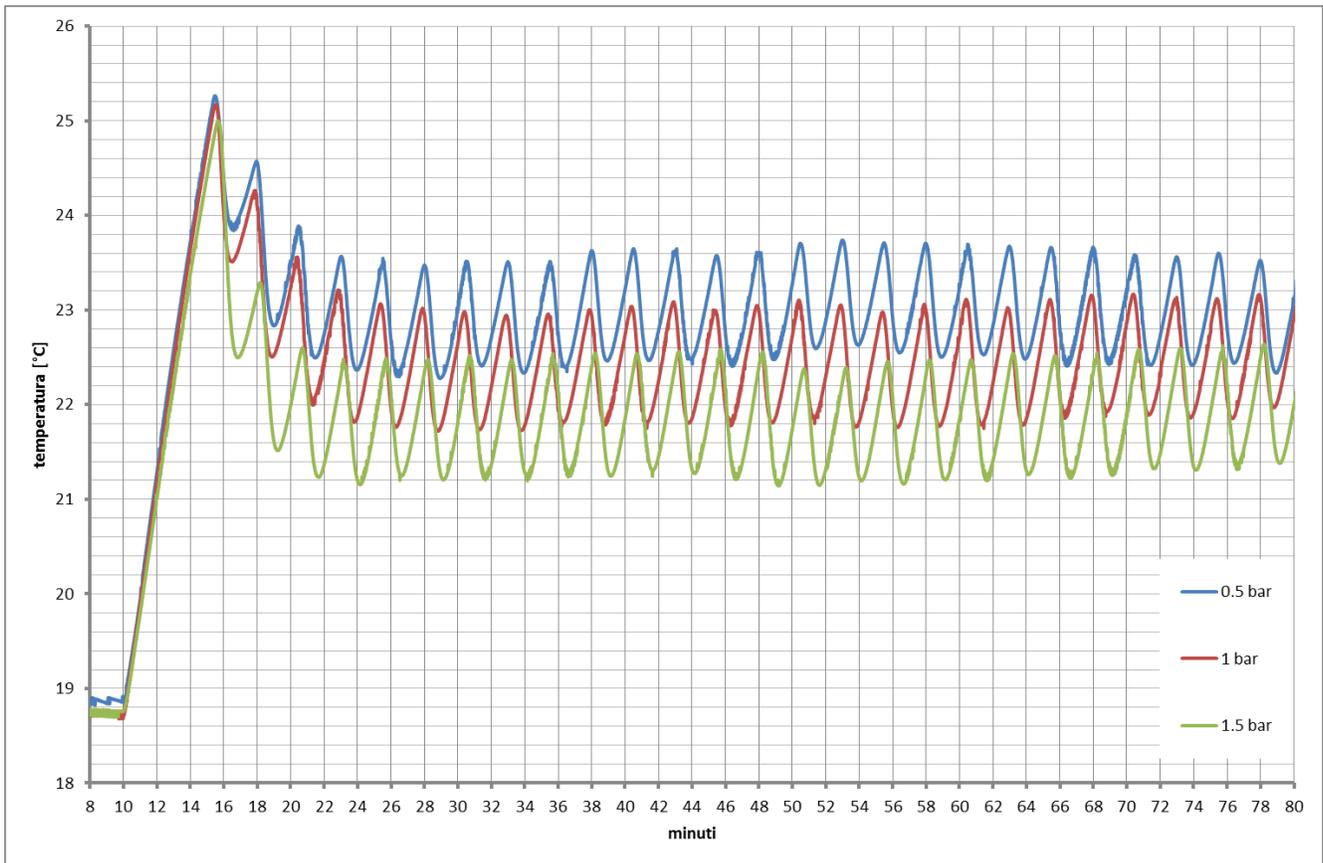


Figura 6.24: confronto grafico tra tre prove di ciclo 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off a partire dalla Tamb+6°C e acqua di raffreddamento a pressioni diverse.

6.14 Pressione 1.5 bar, inizio ciclo alla Tamb+8°C

Infine, in figura 6.25 è riportato l'andamento delle temperature rilevato dalle tre termocoppie durante una prova di ciclo di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off, nella quale il primo ciclo viene avviato quando la temperatura ambiente, pari a 17.8°C, è aumentata di 8°C e l'acqua viene erogata alla pressione di 1.5 bar.

In figura 6.20 è invece rappresentato un confronto grafico, a parità di temperatura ambiente, tra l'andamento della temperatura rilevato dalla termocoppia centrale durante i primi cicli della prova descritta in figura 6.25 e quello delle corrispondenti prove a 0.5 e 1 bar. Dal grafico si vede che aumentando la pressione a cui viene erogata l'acqua si ottiene un migliore raffreddamento del pannello solamente durante i cicli iniziali. All'aumentare del numero di cicli, infatti, l'andamento della temperatura del pannello della prova a 1 bar riprende quello della prova a pressione maggiore e, da un certo momento in poi, questi coincidono. Pertanto, in questo caso, la prova a 1 bar risulta più conveniente di quella a 1.5 bar, in quanto consente di ottenere lo stesso salto termico, ma consumando una minore quantità di acqua.

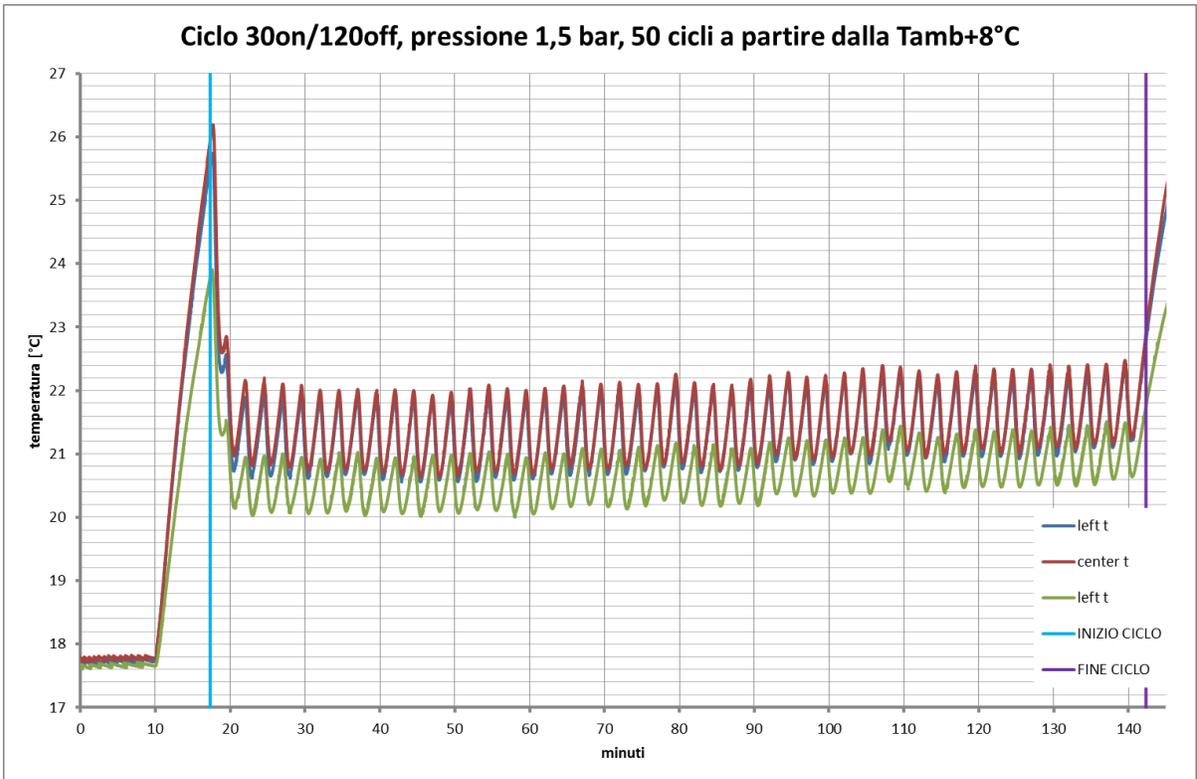


Figura 6.25: 50 cicli di 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off, a partire dalla Tamb+8°C e alla pressione di 1.5 bar.

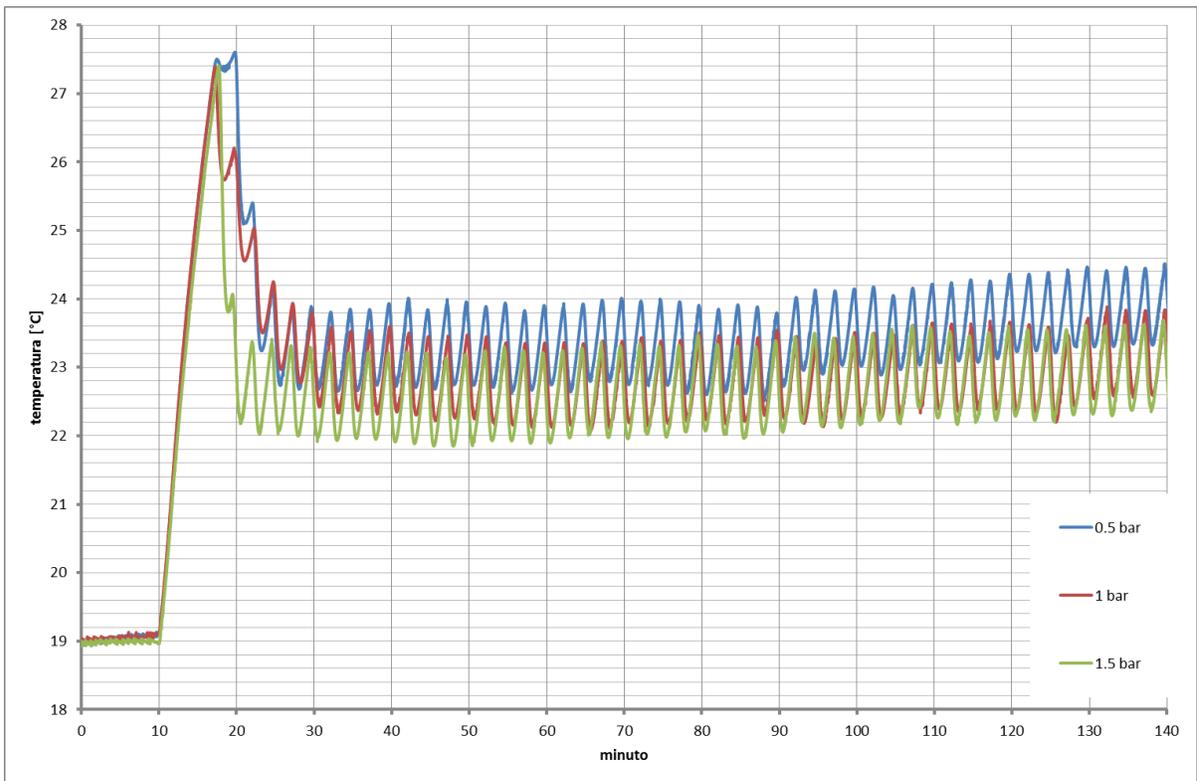


Figura 6.26: confronto grafico tra tre prove di ciclo 30 secondi H₂O on – 120 secondi H₂O off a partire dalla Tamb+8°C e acqua di raffreddamento a pressioni diverse.

6.15 Confronto grafico tra le prove a 1.5 bar

In figura 6.27 è riportato un confronto grafico tra l'andamento della temperatura rilevato dalla termocoppia centrale durante le 4 prove effettuate alla pressione di 1.5 bar e al variare della temperatura alla quale viene fatto partire il primo ciclo di on/off. Per avere un confronto, oltre che a parità di pressione dell'acqua, anche a parità di temperatura ambiente, gli andamenti della temperatura sono stati traslati in modo che in ogni prova la temperatura ambiente risulti pari a 19°C.

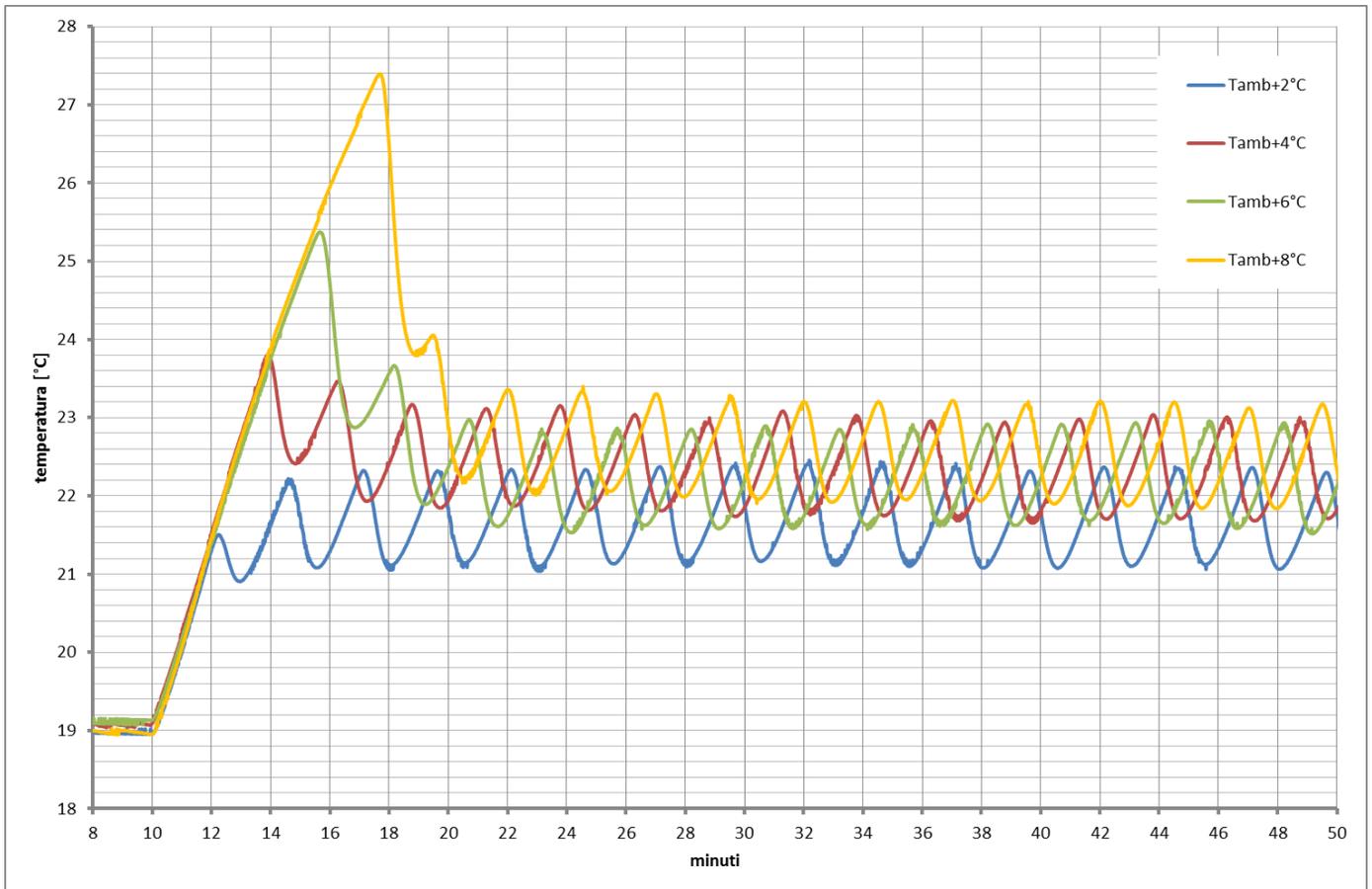


Figura 6.27: confronto grafico tra le 4 prove effettuate a 1.5 bar e temperatura di inizio primo ciclo variabile.

Come si può vedere, il grafico conferma quanto detto anche per le corrispondenti prove a 0.5 e 1 bar. Infatti, facendo partire il primo ciclo di on/off quando la temperatura ambiente è aumentata di 8°C si ottiene un salto termico maggiore rispetto a quello che si ottiene nelle altre prove effettuate alla stessa pressione e, quindi, un maggiore incremento delle prestazioni del pannello. Inoltre, nonostante il maggiore riscaldamento, la temperatura del pannello si stabilizza ad una temperatura circa uguale alle altre. Pertanto, tra le prove eseguite alla pressione di 1.5 bar, quella nella quale si inizia il raffreddamento alla Tamb+8°C è sicuramente la più conveniente.

Capitolo 7

Conclusioni

7.1 Conclusioni dello studio

Lo scopo del lavoro di tesi era realizzare ed analizzare sperimentalmente un sistema di raffreddamento a film d'acqua per pannelli fotovoltaici. La necessità di abbassare la temperatura superficiale dei pannelli nasce dalla possibilità di ottenere maggiori rendimenti elettrici in condizioni ambientali critiche (irraggiamento e temperatura ambiente elevati), con incrementi di produzione elettrica anche maggiori del 10%.

Nella prima fase si è analizzato nel dettaglio il problema grazie agli studi già presenti in letteratura, evidenziandone problemi e limiti. Lo studio si è poi focalizzato sul sistema di raffreddamento a film d'acqua, in quanto esso può essere applicato ad installazioni fotovoltaiche già esistenti in modo economico e senza la necessità di grosse modifiche strutturali. L'impianto di raffreddamento adottato è quindi frutto di un'attenta analisi sulle caratteristiche che impianti di questo tipo devono avere: efficienza, economicità e durata.

Le successive analisi sperimentali hanno avuto invece come obiettivo l'individuazione della portata d'acqua necessaria a raffreddare il pannello e la determinazione dei tempi e delle entità del raffreddamento per mantenere una condizione raffreddata; oltre ai benefici in termini energetici, tale condizione garantisce meno stress termici al pannello. A tale scopo sono state dunque effettuate molte prove: al variare del riscaldamento del pannello, della pressione dell'acqua, del ciclo di raffreddamento e di quando farlo partire. Queste, oltre a confermare che raffreddando il pannello con un flusso d'acqua continuo che scorre sulla sua superficie è possibile ottenere una sostanziale diminuzione della sua temperatura, hanno anche mostrato che all'aumentare della temperatura del pannello aumenta il salto termico ottenibile. Inoltre, tra tutti i cicli di on/off studiati, quello che consente di ottenere il miglior compromesso tra la diminuzione della temperatura ottenuta e la quantità d'acqua consumata, è il ciclo caratterizzato da 30 secondi di fase on e 120 secondi di fase off. Questo, una volta portato il pannello alla massima temperatura raggiungibile con il faro posto a mezzo metro dal pannello (di poco maggiore a 40°C) e con acqua erogata alla pressione di 1 bar (alla quale corrisponde una portata di 36 l/h per ugello), ha permesso di ottenere un salto termico di circa 15°C e, dunque, un incremento netto della produzione del 6%. Tuttavia, questo incremento potrebbe anche aumentare qualora si lavorasse a

temperature più elevate e si ottimizzasse l'impianto (consumo minimo delle pompe, tipologia di materiali, disposizione tubazioni, ecc).

Tuttavia, la scelta del ciclo dipende di volta in volta dal raffreddamento che si vuole ottenere e dalla quantità d'acqua disponibile. Il consumo di acqua gioca infatti un ruolo fondamentale oltre che dal punto di vista del raffreddamento, anche in termini economici ed ambientali. La maggiore convenienza per l'installazione dei sistemi di raffreddamento per il fotovoltaico si riscontra infatti quando vi sia disponibilità d'acqua in prossimità dell'impianto, senza limiti restrittivi sul prelievo e sulla sua successiva dispersione.

7.2 Miglioramenti futuri

Poiché le prove sperimentali sono state effettuate all'interno di un laboratorio, esse non tengono conto dei fenomeni atmosferici legati all'esterno: la presenza del vento, variabile in velocità e direzione, la variazione della temperatura ambiente e la variazione dell'irraggiamento a causa del cielo coperto. Per questo motivo sarebbe opportuno effettuare le medesime prove all'esterno, monitorando il pannello per un certo periodo di tempo. Questo, infatti, garantirebbe una quantità di dati maggiori e valori più prossimi alle realtà operative.

Una soluzione opposta alla precedente potrebbe invece essere quella di effettuare le prove in un ambiente controllato, come ad esempio una cella climatizzata. Ciò permetterebbe non solo di rendere le misure ottenute indipendenti dalla temperatura ambiente e dalle condizioni climatiche esterne, ma anche facilmente comparabili tra di loro. Tuttavia, allontanerebbe i risultati dalla realtà.

Per quanto riguarda l'apparato sperimentale, i possibili miglioramenti che si potrebbero fare sono molteplici. Innanzitutto, si potrebbe aumentare il numero di termocoppie installate sul pannello. In questo modo, infatti, sarebbe possibile ottenere una visione più precisa dell'andamento della temperatura sulla superficie del pannello, individuando così le zone più o meno raffreddate dal film d'acqua. Inoltre, si dovrebbero monitorare costantemente anche la temperatura dell'acqua, per valutarne il possibile riutilizzo o lo stoccaggio per altre applicazioni, e la temperatura ambiente, per capire come essa influisce sull'andamento della temperatura del pannello. In più, per facilitare chi esegue le prove di ciclo e ridurre il rischio di errore umano, andrebbe anche pensato un sistema automatico di accensione e spegnimento del sistema di raffreddamento. Infine, sebbene il sistema di recupero dell'acqua utilizzato sia sicuramente efficace, esso è pensato alle esigenze riscontrate durante le prove. Sarebbe quindi interessante progettare nel dettaglio un sistema di recupero, che tenga conto di tutti gli aspetti che sono stati trascurati in questo studio: la sopra citata temperatura dell'acqua, la presenza o meno di polveri, la pulizia della vasca e dei filtri nel caso vi fossero fenomeni di ristagno, materiali da utilizzare.

Per concludere, nonostante in questo lavoro non siano stati presi in considerazione gli aspetti economici, sarebbe importante approfondire in tesi future la convenienza economica del sistema di raffreddamento. Esso sarà economicamente conveniente se è in grado di garantire entrate monetarie superiori ai costi di installazione e di esercizio dello stesso, dove i costi di esercizio sono principalmente legati al consumo della pompa, alla manutenzione e all'utilizzo dell'acqua.

Bibliografia

Tom Markvart and Luis Castañer. *Practical Handbook of Photovoltaics*, 2003.

E. Skoplaki and J.A. Palyvos. *On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations*, Solar Engineering Unit, School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens, 2008.

Emmanuel Amy de la Breteque. *Thermal aspects of c-Si photovoltaic module energy rating*, Laboratory for Solar Systems (L2S)/Institut National d'Énergie Solaire (INES), Francia, 2008.

S. Krauter and R. Hanitsch. *Actual optical and thermal performance of PV modules*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 1996, pp.557-574.

S. Krauter. *Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 2004, pp.131-137.

Stefan Krauter, Rolf Hanitsch (Technical University of Berlin), Luciano Moreira (Universidade Federal do Rio de Janeiro). *New optical and thermal enhanced PV-modules performing 12% better under true module rating conditions*.

K. Moharram, M. Abd-Elhady, H. Kandil and H. El-Sherif. *Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling*, pp.869-877.

Earle Wilson. *Theoretical and operational thermal performance of a 'wet' crystalline silicon PV module under Jamaican conditions*, Renewable Energy, 2009, pp.1655–1660.

Potuganti Prudhvi, Ponnappalli Chaitanya Sai. *Efficiency Improvement of Solar PV Panels Using Active Cooling*, NIT Warangal, India.

TUV Rheinland. *PV module safety qualification according to IEC 61730:2004, EN 61730:2007*, Gennaio 2009.

TÜV SÜD America Inc.. *Basic Understanding of IEC Standard Testing For Photovoltaic Panels*.

F. Schiro. *Sistemi di raffreddamento per moduli fotovoltaici: analisi delle possibili configurazioni, modellazione teorica e studio di un impianto esistente*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica, Università degli Studi di Padova, Ottobre 2012.

M. Cazzola. *Analisi, realizzazione e verifica sperimentale di un sistema di raffreddamento a fil d'acqua per pannelli fotovoltaici*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica, Università degli Studi di Padova, 2012.

A. Pisani. *Verifica sperimentale di un sistema di raffreddamento per pannelli fotovoltaici*, Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria dell'Energia, Università degli Studi di Padova, 2017.

Ringraziamenti

Con queste poche parole desidero ringraziare tutti coloro che durante questi mesi mi hanno dedicato il proprio tempo e aiutato nella stesura della tesi con suggerimenti, critiche ed osservazioni.

Innanzitutto vorrei ringraziare la relatrice Prof.ssa Anna Stoppato e il correlatore Ing. Alberto Benato per non avermi mai fatto mancare la propria disponibilità, il proprio sostegno e aiuto durante l'elaborazione di questo lavoro.

Proseguo con i miei colleghi e compagni di viaggio Andrea Pisani e Mattia D'Incà, che hanno trascorso con me molte ore in laboratorio, fornendomi un aiuto pratico e ottima compagnia. Inoltre, ringrazio Fortunato, tecnico di laboratorio del DII, che mi ha aiutato ad allestire tutto l'apparato sperimentale.

Un ringraziamento particolare va poi alle persone a me più care: la mia fidanzata Debora, per avermi fatto sorridere anche nei periodi più difficili, i miei migliori amici, con i quali ho condiviso i momenti più belli di questi anni universitari, e nonna Anna.

Infine, un ringraziamento speciale a mamma Cinzia e papà Diego: è grazie al vostro sostegno e al vostro incoraggiamento se non ho mai mollato e oggi sono riuscito a raggiungere questo importante traguardo.

E grazie anche a te, che anche se oggi non ci puoi essere, saresti fiero di me.

