



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

Tesi di Laurea Magistrale

**ANALISI ENERGETICA DI UN IMPIANTO
DI CONSERVAZIONE IPOGEO**

Relatore: Prof. Michele De Carli
Dipartimento di Ingegneria Industriale

Correlatori: Ing. Tommaso Bezzi
Ing. Michele Tarolli
Polo Tecnologico per l'Energia s.r.l.

Laureando: Marco Balduzzo

ANNO ACCADEMICO 2013/2014

INDICE

Sommario	5
Introduzione	7
1. Cenni sulla conservazione delle mele	9
1.1 Conservazione in atmosfera controllata (AC)	9
1.2 Conservazione in ipogeo	9
1.3 Calore di respirazione.....	9
2. Struttura dell' impianto	11
2.1 Descrizione impianto.....	11
2.2 La dolomia.....	17
3. Modello agli elementi finiti	20
3.1 Software utilizzato.....	20
3.2 Modello di analisi della roccia	20
3.3 Modello di interazione mele-roccia.....	23
4. Cella frigorifera sperimentale	26
4.1 Dati sperimentali	27
4.2 Modello cella pilota e confronto con dati sperimentali	34
4.3 Validazione modello.....	42
5. Gallerie di frigoconservazione	44
5.1 Primo pre-raffreddamento	44
5.2 Mantenimento.....	48
5.3 Ottimizzazione pre-raffreddamento.....	52
5.3.1 Ottimizzazione con impianto acceso	52
5.3.2 Ottimizzazione con impianto spento.....	56
5.4 Carico cella frigoconservazione	60
5.4.1 Valutazioni su cassoni e mele.....	61
5.4.2 Valutazione complessiva del sistema durante il carico	65
5.4.2.1 Energia termica restituita dalla roccia.....	65
5.4.2.2 Influenza durata e temperatura di pre-raffreddamento.....	71
5.4.2.3 Carico con raffreddamento notturno tramite impianto.....	74
5.4.2.4 Confronto tempi di risposta con celle fuori terra	79
5.4.2.5 Temperature in cella negli istanti iniziali.....	82
6. Dimostrazione analitica parametri	89
6.1 Diffusività termica.....	89

6.2 Profondità utile nel caso ideale.....	90
6.3 Primo pre-raffreddamento	91
6.4 Profondità utile ed energia recuperata	92
6.5 Considerazioni sulle dispersioni di calore	93
7. Potenza installata e gestione impianto.....	96
8. Confronto con cella di frigoconservazione tradizionale	103
9. Ampliamenti futuri	106
Conclusioni.....	112
Ringraziamenti	115
Bibliografia	116
Siti web consultati	117
Appendice A.....	118
Appendice B.....	124
Appendice C.....	139
Appendice D.....	147
Appendice E.....	148
Appendice F	149
Appendice G.....	156

Sommario

La crescente richiesta di mele, con la conseguente esigenza di ampliare gli spazi per la frigoconservazione, ha fatto nascere l'idea di poter sfruttare i vuoti di cava delle miniere di Mollaro come magazzini ipogei. L'idea si basa sull'elevata inerzia termica della montagna, la quale a seguito di un iniziale raffreddamento dovrebbe fungere da isolante "naturale". Inoltre contribuirà ad assorbire il calore della frutta durante il carico, ridurre i tempi di raffreddamento ed i consumi energetici annuali.

Per verificare e quantificare le supposizioni iniziali è stata costruita una cella pilota, nella cava in questione, la quale ha permesso di rilevare dati sperimentali su consumi elettrici e temperature del sistema. Questi valori sono stati in seguito elaborati tramite software agli elementi finiti e, per controprova, alcuni sono stati verificati anche per via analitica.

Ne è emerso che, lo strato di roccia fredda che si deve avere per ottenere un'adeguato isolamento è rilevante, vista l'elevata conducibilità termica della roccia. Come lo sono pure le dispersioni in essa. Il calore della frutta che riesco ad asportare, grazie alla roccia fredda, nei tre giorni di carico, è il 17% del totale. In quanto posso recuperare solo il "freddo" stoccato nei primi 1,25 m di roccia. I tempi di raffreddamento non sono quindi molto inferiori rispetto ad una cella fuori terra. Il taglio sui consumi elettrici, grazie alla riduzione nel tempo delle perdite e dell'energia spesa per il pre-raffreddamento, potrebbe arrivare fino al 27% per le due gallerie realizzate finora. Nel caso si proseguisse con gli ampliamenti previsti, creando altre 8 gallerie per la frigoconservazione, si potrebbe raggiungere un risparmio del 43%.

Introduzione

Verso la fine del 2010, la Ditta Tassullo Materiali S.p.a., la quale opera nel settore dei materiali da costruzione, propone di usare i vuoti di cava di Mollaro, per realizzarvi delle celle frigorifere [1]. Queste cave servono per l' estrazione della Dolomia. Esse non sono a cielo aperto ma scavate nel cuore della montagna, quindi si presenta l' opportunità di riutilizzare degli spazi che altrimenti resterebbero vuoti.

Nella primavera del 2011 viene istituito presso la Provincia Autonoma di Trento un gruppo di lavoro interdisciplinare composto da esperti in materia di ambiente, paesaggio, geologia, attività agricole, etc. e contemporaneamente ci sono i primi contatti tra Melinda e FEM (Fondazione Edmund Mach), la quale svolge attività di ricerca scientifica e sperimentazione anche nel settore agroalimentare e ambientale, per un' ipotesi di effettiva costruzione di celle frigorifere in ipogeo.

A novembre 2011 presso la FEM viene organizzato un seminario "La conservazione dei prodotti ortofrutticoli in ipogeo: tra storia e innovazione per un modello di sviluppo sostenibile", dal quale emerge che non esistono a livello mondiale esperienze di conservazione a temperature positive ed in Atmosfera Controllata (AC) di frutta e ortaggi freschi. Si decide quindi di comune accordo tra Tassullo Materiali, FEM e Melinda di realizzare una cella sperimentale adatta a conservare mele in regime di AC, nelle viscere delle miniere di Mollaro.

Nel marzo del 2012 viene realizzata la cella sperimentale in ipogeo, e si sceglie di dare avvio alla conservazione di mele in essa.

Per trarre conclusioni apprezzabili sono necessari due periodi di conservazione in AC, e a febbraio 2013 sono stati presentati i risultati al Comitato Celle Ipogee costituito in Melinda, alla Tassullo Materiali ed infine all' assemblea dei soci di Melinda. Dai risultati ottenuti si è avuta la conferma che la conservazione di mele in AC tipo ULO (Ultra Low Oxygen) è possibile.

E' stato osservato come l' energia consumata inizialmente sarà superiore per via che si deve raffreddare la roccia, ma una volta raggiunto l' equilibrio termico, si suppone sia inferiore rispetto ad una pari cella fuori terra. A seguito dei risultati ottenuti è stato deciso di passare alla realizzazione di un impianto pilota per una capacità di circa 97200 q.li (9720 ton) di mele suddivisi in 12 celle su 2 gallerie quale primo blocco, per un possibile e più ampio progetto per una capienza totale di circa 518400 q.li (51840 ton). In ogni caso si continuerà la sperimentazione nella cella di prova (da 1200 q.li) per avere uno "storico" in fatto di consumi e/o risparmio energetico effettivo.

Tra gli obiettivi del progetto si individua il risparmio sui consumi energetici, la riduzione del tempo di abbattimento della temperatura della frutta e il recuperare la massima energia termica immagazzinata precedentemente nella roccia durante il carico.

Lo scopo del lavoro di tesi è quello di studiare il comportamento della roccia dal punto di vista termico creando un modello, mediante software agli elementi finiti, che permetta di simulare gli scambi di calore che avvengono tra cella e montagna per stabilire la potenza dell' impianto frigorifero e relativi consumi energetici da sostenere. Si cercherà, inoltre, di definire delle linee guida che possano essere applicate a qualunque altro tipo di cella ipogea e si dovranno ottimizzare tutte le variabili in gioco per poter sfruttare al meglio il potenziale dell' impianto in ipogeo.

Questo progetto con il benessere ed il sostegno della Provincia autonoma di Trento potrà offrire al Trentino qualcosa di particolarmente interessante sotto vari profili. E' un progetto all' insegna del risparmio di territorio, da una risposta alla crescente richiesta di volumi di mele da produrre in futuro, si hanno soluzioni impiantistiche in grado di ottimizzare le risorse energetiche disponibili (acqua in sotterraneo), si evita di utilizzare materiali inquinanti per isolare le celle e non di poca importanza la possibilità di portare in visita i turisti.

1. Cenni sulla conservazione delle mele

La mela è un frutto che contiene molte vitamine e in Trentino la sua coltivazione è molto diffusa. La maturazione naturale varia da fine agosto a metà ottobre a seconda della varietà. La mela è il frutto più destagionalizzato, cioè lo si può trovare tutto l'anno, ma per fare questo servono degli impianti che provvedano alla conservazione e che lo rendano disponibile su un lungo periodo di tempo.

1.1 Conservazione in atmosfera controllata (AC)

La mela, come ogni altro prodotto vegetale, ha un metabolismo che la rende "viva". Essa respira consumando ossigeno sia durante la crescita sull'albero sia dopo la raccolta [2]. Mantenere la mela in vita è fondamentale per conservare le proprietà di consistenza, gusto, colore e le sostanze nutritive che il consumatore si aspetterà quando consumerà il prodotto.

I prodotti della respirazione sono principalmente calore, anidride carbonica e vapore acqueo. Maggiore sarà l'attività di respirazione e più rapido sarà il suo "invecchiamento", riducendone la conservabilità. Risulta necessario ridurre al minimo vitale questo processo di respirazione, ovvero l'ossidazione dei carboidrati presenti nei tessuti vegetali.

Si ottengono ottimi risultati abbinando il freddo ad un'atmosfera controllata, in quanto la mela interagisce in modo diretto con l'ambiente che la circonda.

La temperatura di conservazione è di circa 1°C, importante è verificare che la polpa non scenda sotto gli 0,3 °C pena la "morte" della mela.

Per quanto riguarda l'atmosfera controllata (AC) si usa la modalità ULO (bassi tenori di ossigeno). In particolar modo, a seconda della varietà, avremo una atmosfera contenente una percentuale di ossigeno dell' 1-2%, l' 1-3% di anidride carbonica e un'umidità relativa del 90-95%. Quindi bassi valori di O₂ e alti di CO₂ (rispetto alle percentuali presenti convenzionalmente nell'aria). La restante percentuale di atmosfera è occupata da azoto. Queste concentrazioni si ottengono grazie ad appositi assorbitori e generatori [3].

1.2 Conservazione in ipogeo

La conservazione delle mele in ipogeo è possibile, con perfetta adattabilità. Questo è quanto verificato confrontando mele conservate con entrambi i tipi di cella. Le analisi fisico-chimiche e fisio-patologiche hanno dati i risultati sperati. Il decadimento qualitativo e l'andamento dei parametri di conservazione sulle mele Golden oggetto del confronto è stato identico. Inoltre il raffreddamento è stato lievemente più veloce nella cella ipogea [1].

1.3 Calore di respirazione

Come si è visto il processo di maturazione delle mele genera calore, è questo il parametro che interessa per l'analisi che si andrà ad effettuare.

Sarà rilevante, non tanto nel breve periodo in cui le mele verranno raffreddate, ma piuttosto nel lungo periodo di conservazione. Sebbene come potenza specifica non sia elevata (Fig. 1.1), si ha che in un ampio arco di tempo bisognerà far fronte ad una sorgente di calore continua e vista l' elevata quantità di frutta immagazzinata non sarà più un valore trascurabile [4]. Il calore generato dipende dalla qualità e temperatura delle stesse, e per essere in vantaggio di sicurezza si assume il valore massimo tabellato alla temperatura di conservazione.

Heat of respiration (mW/kg)

Cultivars	0°C	5°C	10°C	15°C	20°C
Yellow Transparent	20.4	35.9		106.2	166.8
Delicious	10.2	15.0			
Golden Delicious	10.7	16.0			
Jonathan	11.6	17.5			
McIntosh	10.7	16.0			
Early cultivars	9.7-18.4	15.5-31.5	41.2-60.6	53.6-92.1	58.2-121.2
Late cultivars	5.3-10.7	13.6-20.9	20.4-31.0	27.6-58.2	43.6-72.7
Average of many cultivars	6.8-12.1	15.0-21.3		40.3-91.7	50.0-103.8

Ref. 2006 ASHRAE Handbook -Refrigeration

Fig. 1.1- Calore di respirazione delle mele

2. Struttura dell' impianto

L' impianto è situato nel comune di Taio in Val di Non, ad una quota di 550 m s.l.m. La ditta Tassullo Materiali provvederà ad estrarre dalla montagna la roccia necessaria a soddisfare le proprie esigenze scavando delle gallerie in essa. In un secondo momento i vuoti di cava verranno utilizzati dal consorzio Melinda per lo stoccaggio delle mele. Gli scavi sotto terra non si limiteranno agli spazi poi gestiti da Melinda, ma verrà effettuato un altro ingresso nel versante opposto della montagna, si divideranno le due zone e poi Tassullo Materiali proseguirà con le estrazioni. La parte che vedremo sarà solo quella destinata a Melinda.

2.1 Descrizione impianto

Il sistema è disposto su tre livelli (Fig. 2.1). Al livello zero si trova l' ingresso, le due camere contenenti gli impianti, la cella sperimentale e le due gallerie di stoccaggio finora scavate, più le quattro previste nel futuro ampliamento. Nel secondo livello sono previste dalle quattro alle sei gallerie sempre relative al possibile sviluppo. Al terzo livello verranno ricavati i serbatoi per l' acqua. Vi sono poi tutta una serie di corridoi e gallerie necessarie al collegamento degli spazi ed alle evacuazioni in caso di emergenza [5].

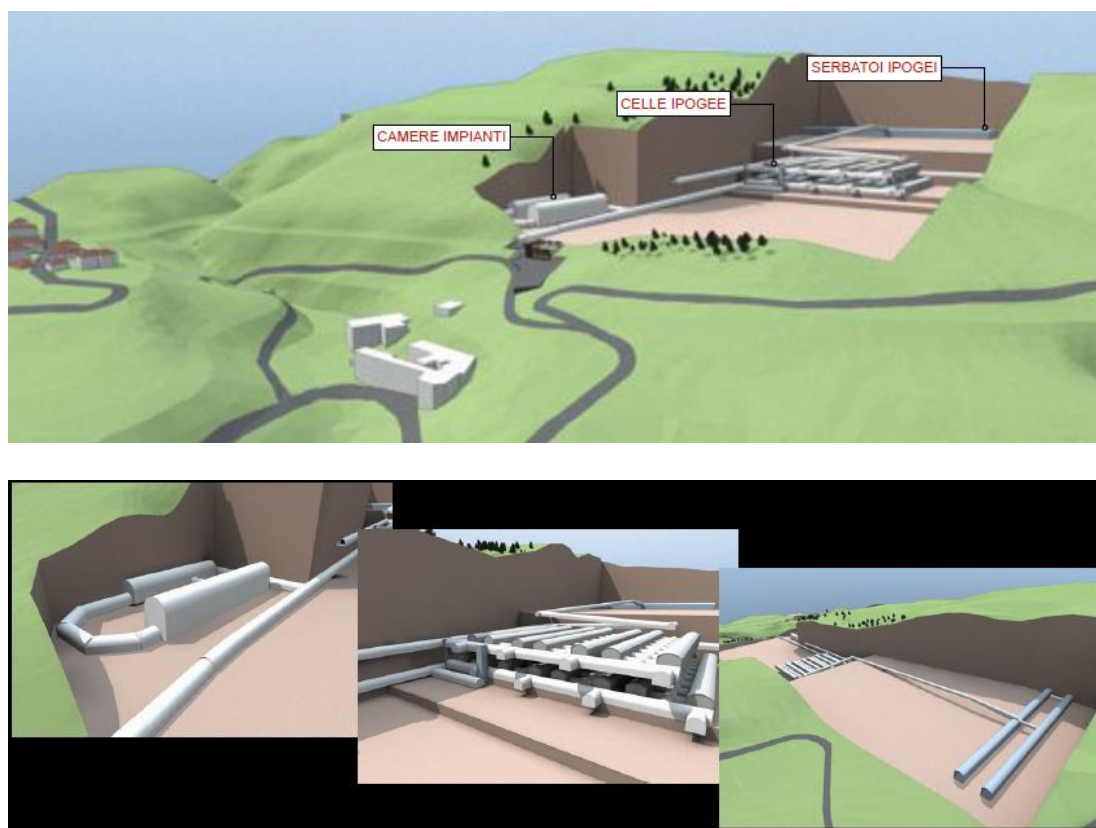


Fig. 2.1- Rappresentazione 3D impianto

Ma vediamo più nel dettaglio questo impianto [6]. Partiamo dall' ingresso, dove arriveranno i camion provenienti dai consorzi dopo la pesa, i quali scaricheranno i cassoni con le mele (Fig. 2.2).



Fig. 2.2- Ingresso impianto

Si percorre il corridoio d' ingresso per 500 m verso il centro della montagna prima di arrivare alle gallerie destinate allo stoccaggio (Fig. 2.3). Queste sono due ed ognuna ha una lunghezza di 145,5 m, una larghezza di 12,30 m e l' altezza essendo a volta varia dai 10,20 m agli 11,30 m nel punto centrale (Fig. 2.4). Ogni galleria verrà divisa in sei celle più piccole per motivi gestionali, separate da 30 cm di calcestruzzo. Quindi avremo a disposizione, in totale, dodici celle da 24 m di lunghezza l' una, per un volume totale di circa 36000 m³(al netto dei rivestimenti superficiali interni).

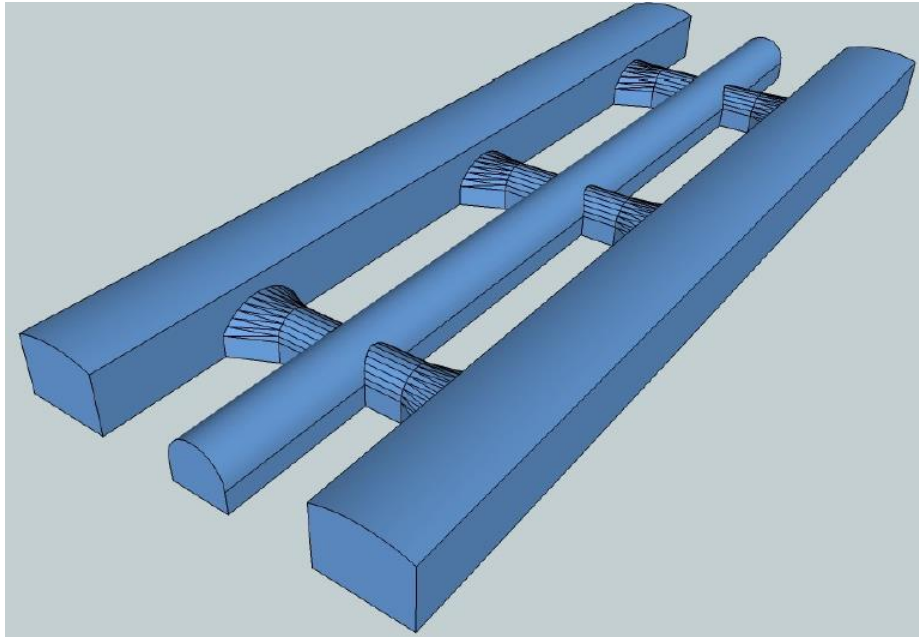


Fig. 2.3- Disposizione parallela gallerie per la frigoconservazione

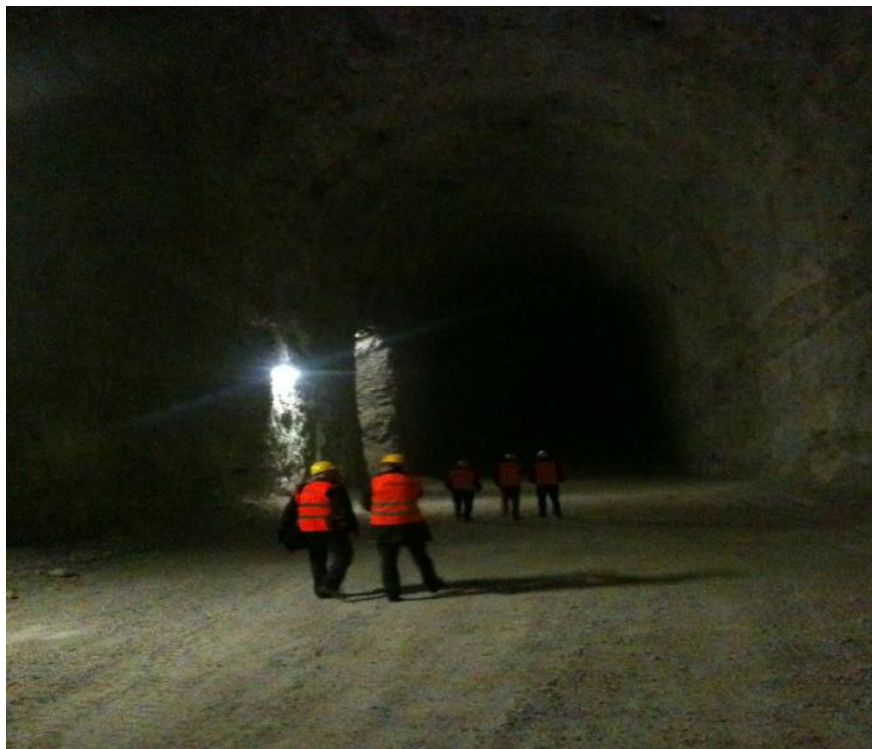


Fig. 2.4- Vista centrale galleria di frigoconservazione

I gruppi frigoriferi verranno posti in una camera ricavata trasversalmente, in prossimità delle stesse. Le unità di condensazione del fluido refrigerante primario (NH_3), vengono poste sempre nello stesso ambiente e raffreddate ad acqua (ciclo aperto). La quale viene stoccata negli appositi magazzini ipogei da 400000 m^3 totali (visti sopra) e prelevata, mediante pompe, da dei pozzi in loco ad una temperatura di

circa 12°C, grazie alla presenza della falda, 6 m al di sotto delle gallerie. Questo è uno dei diversi vantaggi di quest' impianto, il quale permette di risparmiare un quantitativo d' acqua per il raffreddamento di circa 27000 m³/anno ed aumentare l' efficienza dell' impianto di raffreddamento del 20-25% [17]. Successivamente verrà restituita alla rete adduttrice al bacino di scarico (diverso da quello di prelievo) a circa 20 °C e verrà utilizzata ad uso irriguo. Questo risparmio d' acqua, è dato dal fatto che nella celle fuori terra si utilizzano torri evaporative per il raffreddamento dell' ammoniaca circolante nel circuito primario, mentre in quelle ipogee la si riutilizza. I circuiti secondari utilizzeranno acqua glicolata al 33% V/V, ed ogni cella avrà a disposizione il proprio circuito e relativa pompa. In modo che mediante una valvola miscelatrice a 3 vie si possa variare la temperatura del fluido refrigerante nelle batterie alettate e di conseguenza l' aria in cella.

La superficie delle celle non necessita di essere isolata, contrariamente a quanto avviene in ogni altra situazione (questo per sfruttare al meglio le caratteristiche della roccia). Il risparmio di materiale isolante, è uno dei vantaggi più importanti rispetto alle celle frigorifere convenzionali, la coibentazione è data dallo strato di roccia che le circonda. Tale consumo specifico in celle fuori terra è di 0,19 m³/ton. Per un risparmio totale di 1847 m³ di materiale isolante. Il quale a fine vita ha un elevato impatto ambientale e rilevanti costi di smaltimento in discarica.

Le pareti verranno rivestite di calcestruzzo spruzzato, costituito in parte dalla stessa roccia estratta dalla montagna e serve a far in modo che le pareti non si sgretolino col tempo. Sopra vi saranno date tre mani di uno speciale impermeabilizzante a tenuta di gas ed infine uno strato di rivestimento "coating" ad elevata resistenza bianco ed igienizzante. I pavimenti sono costituiti da magrone per fondazioni e da un pavimento industriale fibrorinforzato. Rispettivamente per uno spessore di 15 e 35 cm. Questi rivestimenti, visto che le loro caratteristiche termofisiche sono simili a quelle della roccia, verranno trascurati nell' analisi termica che si andrà a fare, la loro incidenza è di fatto del tutto trascurabile.

Il fatto che i magazzini non siano direttamente accessibili e non presentino quantità elevate di materiale infiammabile, pregiudica la possibilità di propagazione di incendi ed eventuali atti vandalici. Aumentando la sicurezza per il personale.

La capacità di ogni cella è di 810 ton di mele e complessivamente l' impianto può immagazzinare un po' meno di 10 mila ton di frutta, un quinto di quello che potrebbe contenere se verranno portati a termine gli ampliamenti previsti. La produzione totale annua stimata da Melinda è di 300000 ton, così che anche piccoli accorgimenti possono portare ad elevati risparmi economici [19]. Se le aspettative saranno rispettate, in futuro si potranno realizzare nuovi impianti per coprire l'intera produzione.

Le mele sono contenute in cassoni, in gergo "bins", i quali possono essere di vario tipo. Quelli utilizzati nel nostro caso possono portare circa 330 kg di frutta, pesano 33 kg e le dimensioni sono: 1120x1120x770 mm (Fig. 2.5) [7].



Fig. 2.5- Cassone raccolta mele

I cassoni verranno accatastati uno sopra l'altro, complessivamente si avrà un blocco di 10x13x20 bins e cosa importante ai fini del nostro studio è considerare che fra di essi si ha un'intercapedine orizzontale di circa 13 cm entro cui fluisce l'aria che per convezione raffredderà la cassa e le mele in esse contenute. In Fig. 2.6 e Fig. 2.7 è stata riportata la rappresentazione ipotizzata inizialmente, poi modificata con l'utilizzo di cassoni differenti [8].

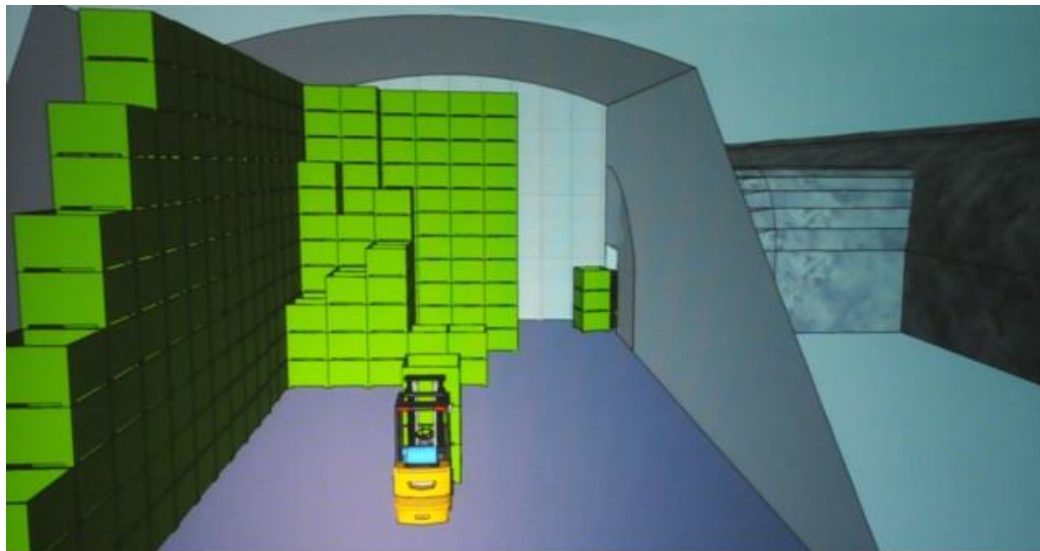


Fig. 2.6- Possibile disposizione dei cassoni in fase di carico

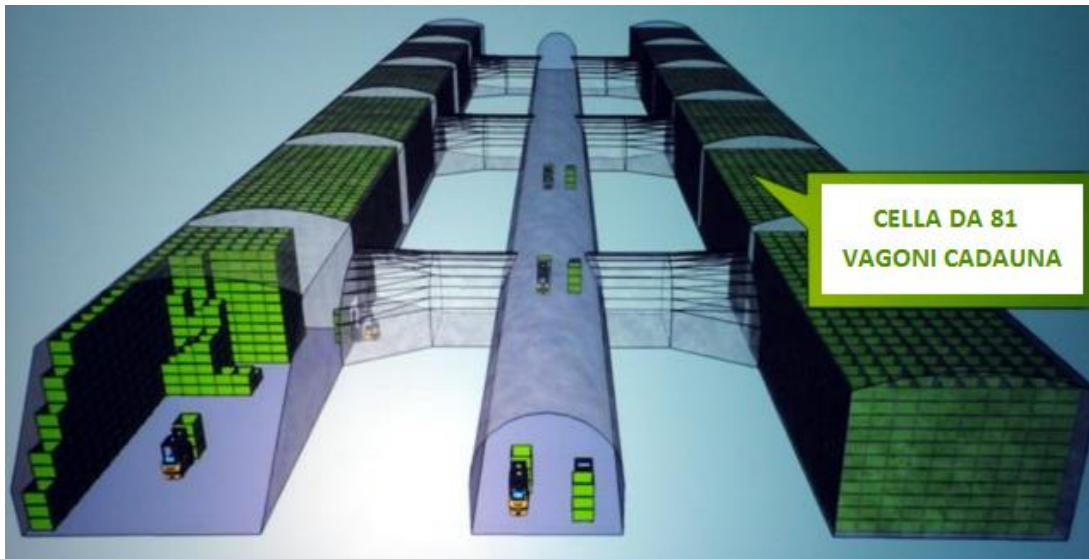


Fig. 2.7- Panoramica gallerie e disposizione cassoni

Questo riutilizzo di vuoti minerari consente un risparmio di territorio considerevole e un miglioramento del paesaggio, molto importante dato che si tratta di zone turistiche. Per magazzini fuori terra il consumo specifico di territorio è stato stimato in $0,45 \text{ m}^2/\text{ton}$ per la conservazione e $0,22 \text{ m}^2/\text{ton}$ per il deposito dei bins. Con quest' impianto si può destinare una superficie di 6500 m^2 ad altri scopi.

La stratigrafia della montagna in cui l' impianto ipogeo verrà realizzato è formata da un primo strato di 15 m di terriccio vegetale, un secondo strato di 60 m di roccia sedimentaria la quale è impermeabile e infine lo strato semi-infinito (molto profondo verso il basso) di roccia dolomitica: la Dolomia (Fig. 2.8). Le celle frigorifere si trovano a circa 135 m di profondità, circondate completamente dalla dolomite. Conoscere le caratteristiche di questa roccia è fondamentale per studiarne il comportamento termico, il quale è uno degli obiettivi di questa tesi e di conseguenza tali caratteristiche influenzeranno il funzionamento e la gestione dell' impianto.

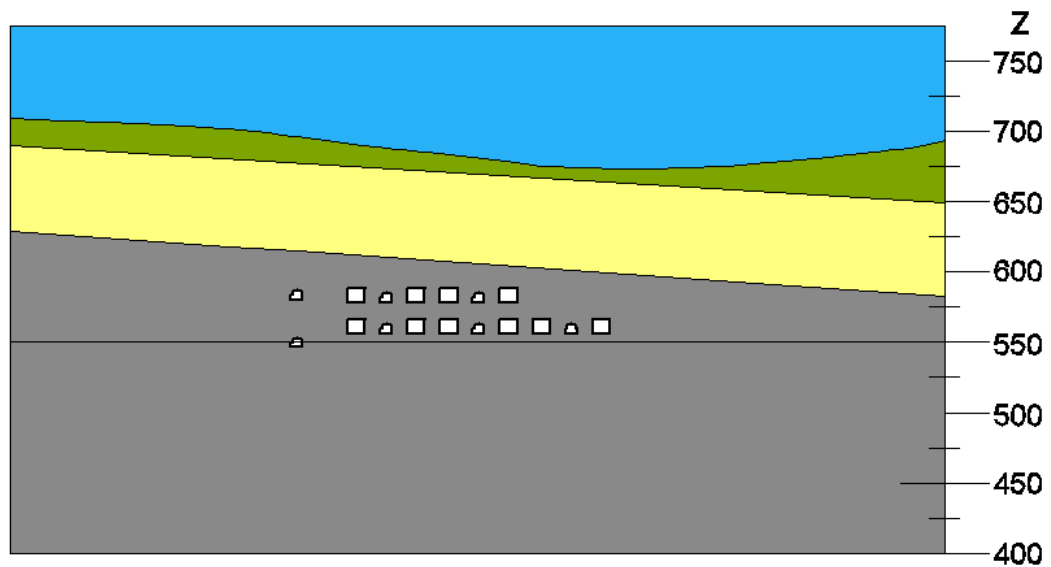


Fig. 2.8- Sezione della montagna

2.2 La dolomia

La dolomia è composta principalmente di minerale dolomite. E' una roccia sedimentaria e per questo è costituita da una moltitudine di strati orizzontali sovrapposti, hanno uno spessore di circa 30 cm, e fra loro qualora si presentino degli spazi vuoti si può trovare aria o roccia di materiale diverso.

Questo nello studio potrebbe creare piccoli errori in quanto data l' impossibilità di sapere esattamente dove si trovano queste disomogeneità si considererà tutto il volume omogeneo.

La Tassullo Materiali per stabilire le caratteristiche di questo minerale, vista la moltitudine di valori diversi presenti in letteratura, si è affidata ad un' università norvegese: la "Norwegian University of Science and Technology" (NTNU) di Trondheim, al "Department of Energy and Process Engineering". Sono stati inviati sei differenti campioni di roccia, formati da tre dischi ognuno del diametro di 8,3 cm e uno spessore di 3 cm (Fig. 2.9). Di questi oggetti ne verranno misurate le caratteristiche presso i laboratori della NTNU e della partner SINTEF (The Foundation for Scientific and Industrial Research), un centro di ricerca sempre della stessa città. Le misurazioni verranno fatte con diversi strumenti a differenti temperature. In particolar modo si determineranno: densità, porosità, calore specifico e conducibilità termica.



Fig. 2.9- Tre dei provini inviati per i test

La densità dei provini varia dai 2,73 ai 2,78 g/cm³, mentre la porosità dall' 1,13 al 3,73 %.

Per quanto riguarda calore specifico e conducibilità termica vengono fatti dei grafici a dispersione in funzione della temperatura, da cui si ricavano le rette di approssimazione del parametro in oggetto (Fig. 2.10).

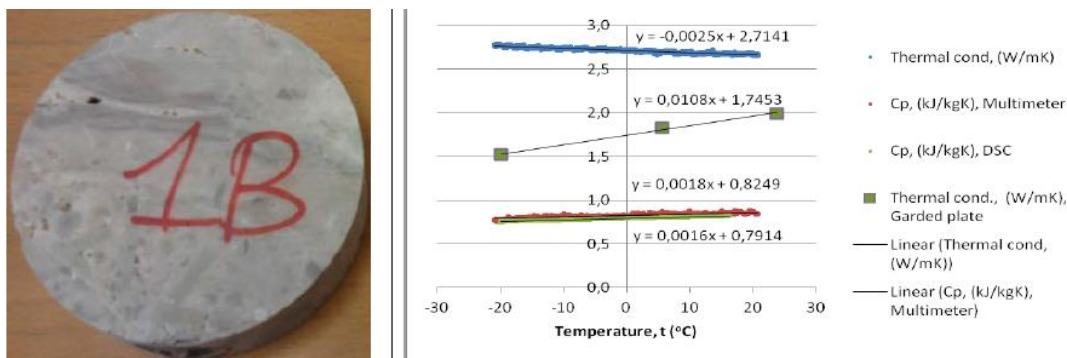


Fig. 2.10- Proprietà caratteristiche provino

A seguito di questo report, si è deciso di usare come valori caratteristici per la roccia secca:

- densità: $\rho = 2755 \text{ kg/m}^3$
- calore specifico a pressione costante: $c_p = 810 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
- conducibilità termica: $\lambda = 2,7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

Questo per quel che riguarda la roccia che si trova sopra la linea di falda, che è secca, ovvero si ha un' umidità relativa dello 0%. Però a circa 6 m sotto le gallerie si trova la falda, per cui ho roccia completamente saturata di acqua, e i parametri da considerare sono:

- densità: $\rho = 2790 \text{ kg/m}^3$
- calore specifico a pressione costante: $c_p = 1210 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
- conducibilità termica: $\lambda = 4,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

L' ultimo parametro da considerare, ma non meno importante, è la temperatura presente a tale profondità. Si hanno 12°C costanti tutto l' anno, questo lo si sa dai rilevamenti, ma era anche deducibile dalla letteratura. Perché fino a 10 m di

profondità la temperatura è influenzata da quella ambientale stagionale, dai 15 m si mantiene costante e andando più in profondità aumenta di 1°C ogni 33 m circa perché il flusso di calore è solo quello proveniente dal centro della terra. Si può tranquillamente ipotizzare che a queste profondità il terreno sia una sorgente di calore a temperatura costante, e che la massa entro la quale si va a scavare sia infinita.

3. Modello agli elementi finiti

Per studiare in modo approfondito il comportamento della roccia e quindi sfruttare al meglio le sue caratteristiche, si userà un software agli elementi finiti. Questa tipologia di programmi consente di costruire un modello che rispecchia il comportamento reale dell'oggetto in analisi.

Affinché un modello possa essere utilizzato per la simulazione dell'andamento reale del sistema deve essere validato. La validazione avviene confrontando i risultati ottenuti dalle simulazioni con i dati sperimentali, minore sarà la differenza tra essi e migliore sarà l'accuratezza del modello stesso.

Dal momento che nella letteratura non sono presenti dati riguardanti l'argomento in questione, si sono usati i valori ottenuti dalla cella sperimentale per confermare l'affidabilità del modello, e poi questo è stato applicato a quelle che saranno le celle vere e proprie, come vedremo nei capitoli successivi.

Viste le molte fasi e variabili da analizzare sono stati fatti diversi modelli, per effettuare studi mirati ai vari casi, ma le strutture utilizzate sono principalmente due. Una ha come scopo la verifica del comportamento della sola roccia, l'altra fa vedere le interazioni che vi sono tra le mele e la montagna.

3.1 Software utilizzato

Il software utilizzato è COMSOL Multiphysics 4.3, il quale è un programma commerciale che usa il metodo degli elementi finiti per modellare e risolvere vari problemi fisici utilizzando equazioni differenziali alle derivate parziali. È un software *multifisico*, ovvero permette di realizzare modelli numerici con vari fenomeni fisici che possono anche essere combinati fra loro.

Nel programma sono presenti vari moduli, ognuno dei quali rappresenta un fenomeno fisico, questi contengono già le equazioni e le variabili che lo descrivono senza dover necessariamente implementare il problema.

Un modulo usato è lo *Heat transfer module*, il quale permette di simulare i vari fenomeni che caratterizzano lo scambio termico quali conduzione, convezione e irraggiamento. Permette di studiare la generazione e la trasmissione di energia termica attraverso fluidi o corpi solidi.

L'altro modulo maggiormente sfruttato è lo *Fluid dynamics module*, che consente di risolvere i problemi di statica e dinamica dei fluidi, sia che siano liquidi, gassosi o composti da più fasi.

Il software giunge alla soluzione mediante solutori numerici diretti e iterativi, i quali risolvono problemi stazionari, transitori, lineari, non lineari, etc. Inoltre è possibile interfacciarsi con i vari programmi CAD utilizzati per la realizzazione della geometria del modello [9].

3.2 Modello di analisi della roccia

Si inizia con l'apertura del programma, nella sezione *Creatore modelli* si seleziona la dimensione spaziale *2D* e si preme sulla freccia *successivo*. Compaiono tutte le varie *fisiche* che si possono aggiungere al modello, si seleziona *Trasferimento di calore in solidi* (facente parte del modulo *Heat transfer module*) e si pigia

nuovamente sulla freccia *successivo*. Infine compare la possibilità di scegliere il tipo di *studio* che nel nostro caso è quello *Dipendente dal tempo* e si spunta il comando *fine* dal quale si accede alla compilazione vera e propria dell' *Editor modello* (Fig. 3.1).

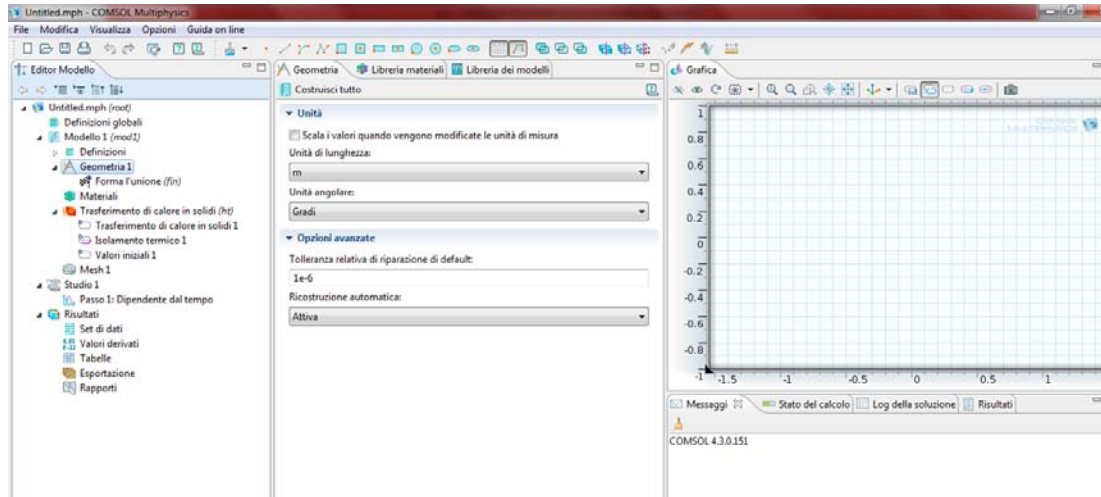


Fig. 3.1- Anteprima editor modello di COMSOL

Il passo successivo è definire la *geometria*, la quale è già stata disegnata precedentemente su programma CAD per cui è sufficiente importarla nel modello, col relativo comando *Importa*. Si useranno poi le operazioni Booleane di *unione* e *differenza* per avere la possibilità di dare le condizioni al contorno all' interno della geometria e il comando *dividi* per far in modo che ogni tratto si possa selezionare singolarmente.

Si passa alla definizione dei *materiali*, i quali sono stati già inseriti nella libreria utente precedentemente compilata con i valori già visti, basterà selezionare i due tipi di roccia: *dolomite secca* e *dolomite saturo* ed associarvi i relativi domini.

L' equazione che governa questa fisica e tutti i domini è:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \cdot c_p \cdot \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{eq} \cdot T) + Q$$

La parte cruciale arriva quando si devono definire le condizioni al contorno del modello, quelle impostate sono:

- *Isolamento termico*: sulle superfici esterne della geometria in quanto non presentano in ogni caso scambi di calore e per default su tutte le superfici su cui non si impongono condizioni al contorno, la cui equazione è :

$$-\mathbf{n} \cdot (-k_{eq} \cdot \nabla T) = 0$$

- *Valori iniziali*: di default si deve indicare una temperatura iniziale a ogni dominio
- *Raffreddamento per convezione*: alle superfici interne delle celle e delle gallerie di collegamento si possono definire i parametri che caratterizzano lo

scambio termico per convezione. Per rappresentare al meglio il fenomeno si può impostare manualmente il *Coefficiente di trasporto termico* e la *Temperatura esterna*, che sarebbe quella del fluido che lambisce la superficie, in tal caso l'equazione è:

$$-\mathbf{n} \cdot (-k_{eq} \cdot \nabla T) = h \cdot (T_{ext} - T)$$

- *Irraggiamento superficie-ambiente*: esso contribuisce assieme alla convezione allo scambio termico con le pareti di roccia, si dovrà definire l'*Emissività superficiale* e la *Temperatura ambiente*, la relativa formula è:

$$-\mathbf{n} \cdot (-k_{eq} \cdot \nabla T) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{amb}^4 - T^4)$$

Dopo di ciò si fa l'*Impostazione delle mesh*. Questo passaggio è fondamentale perché nella realtà i corpi sono continui con un numero infinito di punti, e se fosse così anche nel modello avrei dei sistemi con un numero di incognite infinito e quindi impossibile da risolvere. Questi software agli elementi finiti prevedono una discretizzazione del problema in modo da avere un numero finito di incognite e rendere risolvibile il sistema. La discretizzazione viene realizzata dividendo la geometria del corpo in un insieme più o meno numeroso di elementi di forma e dimensioni stabilite, l'insieme di essi viene chiamato *mesh*. Ognuno di questi elementi è delimitato da punti detti nodi ai quali vengono applicate le equazioni, più elementi ho e più incognite dovrò risolvere, ma avrò anche soluzioni più precise. Di conseguenza dovrò trovare un compromesso tra accuratezza della soluzione e tempo di calcolo del programma. Si sceglie una dimensione degli elementi *Estremamente fitta*, e manualmente viene infittita la maglia di nodi attorno ai contorni in esame (per ottenere ulteriore precisione), che porta ad ottenere circa 72000 elementi, la quale permette di avere una buona precisione (Fig. 3.2).

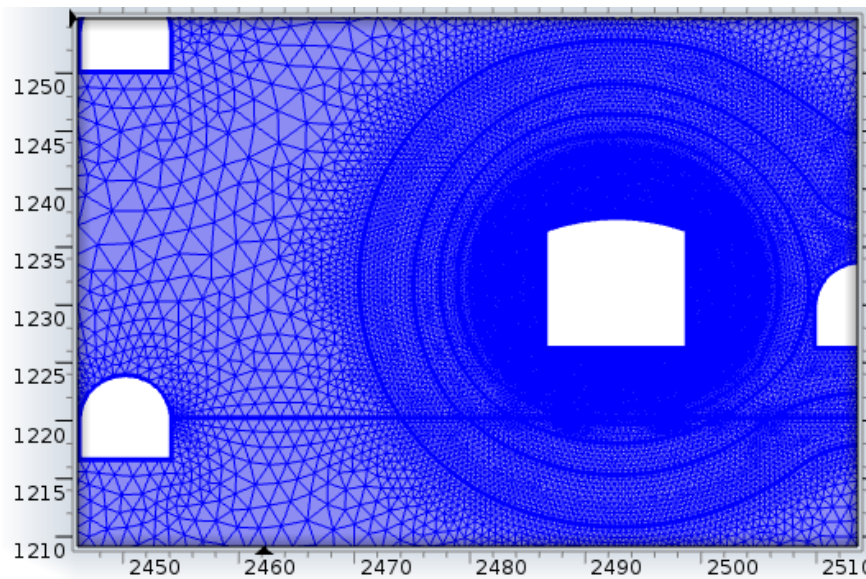


Fig. 3.2- Infittimento mesh attorno alle celle

La fase successiva è impostare lo *Studio*, in base a come lo si vuole condurre. Avendo precedentemente scelto uno studio dipendente dal tempo si vanno a definire i *Tempi: durata della simulazione e numero di valori* in output che si vogliono ottenere.

Si stabilisce la *Configurazione per il solutore*, usando come *Metodo* l' *Alfa generalizzato*, *Passo del solutore: libero* e come *Passo massimo* all' occorrenza si imposta 1000 secondi, perché se ho durante la simulazione delle variazioni alle condizioni al contorno avendo un passo troppo lungo si corre nel rischio che il solutore valuti in modo incompleto tale variazione.

COMSOL permette di monitorare il modello ottenendo un gran numero di risultati diversi e sotto ogni aspetto desiderabile. Per esempio si possono usare delle *Sonde* che vengono applicate ad ogni punto, contorno o dominio. Queste rilevano temperatura, flusso termico totale, per conduzione, convezione, irraggiamento, densità, entalpia, ed ogni altro parametro fisico che però deve essere compatibile con la *fisica*. Inoltre restituiscono una serie di valori che possono rappresentare a piacimento il valore medio, minimo, massimo o integrale ad ogni intervallo del solutore del parametro sondato. Alla fine della simulazioni ci si può ricavare nuovamente il valore medio, minimo, massimo, integrale, varianza, deviazione standard, etc. dei valori istantanei. Si ottengono i grafici delle sonde, le immagini della variazione nel dominio della variabile desiderata e pure delle animazioni. Tutto questo nell' intervallo temporale desiderato.

Per lo studio si sono usate principalmente *Sonde per un punto del dominio* allo scopo di monitorare la temperatura, *Sonde sul contorno* per quantificare l' andamento del flusso termico e la quantità di energia totale e *Sonde sul dominio* per verificare eventuali temperature massime e minime.

Infine dopo aver impostato le sonde a piacimento si passa al *Calcolo* della soluzione e si analizzano i risultati.

3.3 Modello di interazione mele-roccia

La creazione di questo modello si effettua in modo analogo a quello sopra descritto, per cui non si andrà a descrivere ogni singolo passaggio, ma verranno riportate solo le differenze.

La prima di queste diversità si presenta quando si va a scegliere la *fisica*, che in questo caso sarà *Flusso non-isotermo* del modulo *Fluid dynamics module*. *Geometria* e *materiali* si definiscono in modo analogo, seppur vi siano da aggiungere le mele e l' aria.

Le equazioni impostate dallo studio e dipendenti dal tempo sono:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \cdot c_p \cdot \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{eq} \cdot T) + Q + Q_{vh} + W_p \\ \rho \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \cdot (\mathbf{u} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p \cdot \mathbf{i} + \mu \cdot (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot (\nabla \cdot \mathbf{u}) \cdot \mathbf{i} \right] + \mathbf{F} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{u}) = 0 \end{array} \right.$$

Inoltre si spunta la selezione *Irraggiamento superficie-superficie* in modo che venga tenuto conto dell' effetto della radiazione all' interno dei domini in automatico, perché facendo parte tutto della stessa geometria non si possono definire condizioni al contorno di questo tipo sulle superfici interne.

In questo modello siamo quindi in presenza sia della trasmissione del calore nei solidi, sia nei fluidi e per le caratteristiche proprie dello stesso è necessario porre molta più attenzione alla definizione delle condizioni al contorno. Esse sono:

- *Fluidido*: di default si andrà a indicare quale dominio si dovrà considerare come sostanza fluida e relative caratteristiche, le cui equazioni sono:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{u}) = 0 \\ \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \cdot c_p \cdot \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{eq} \cdot T) + Q + Q_{vh} + W_p \\ \rho = \frac{P_a}{R_s \cdot T} \\ \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p \mathbf{i} + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} \cdot \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \cdot \mathbf{i}) \right] + \mathbf{F} \end{array} \right.$$

- *Trasferimento di calore in solidi*: onde evitare che tutti i domini vengano considerati come fluidi si selezionano quelli solidi, l' equazione sarà sempre:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \cdot c_p \cdot \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{eq} \cdot T) + Q$$

- *Isolamento termico*: di default a ogni contorno per cui non venga assegnata una condizione:

$$-\mathbf{n} \cdot (-k_{eq} \cdot \nabla T) = 0$$

- *Parete*: vengono indicate le pareti che delimitano fluido con solido e potendo scegliere come essa si comporta rispetto ad essi, verrà indicato come condizione, con *Scorrimento*:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0 \\ \mathbf{K} - (\mathbf{K} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n} = 0 \\ \mathbf{K} = [\mu \cdot (\nabla \cdot \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] \cdot \mathbf{n} \end{array} \right.$$

- *Valori iniziali*: sempre per default è necessario indicare quali siano i valori iniziali di temperatura per i domini che rappresentano materiale solido e per quelli che rappresentano fluidi anche pressione e velocità (quest' ultima sia nella componente dell' asse "x" che "y")

- *Ingresso*: per simulare un flusso d' aria prodotto da qualunque "macchina" si associa ad un segmento della geometria questa condizione, la quale rappresenterà l' uscita di quello che in questo caso è un aerorefrigeratore, ovvero sarà da dove "entra" il fluido nel dominio. Ci sono varie opzioni su

come definire tale input, si sceglierà un *Influsso laminare* per cui si imposterà la velocità media e la lunghezza d'entrata. La sua equazione è:

$$\begin{cases} L_{entr} \cdot \nabla_t \cdot [-p_{entr} \cdot \mathbf{i} + \mu(\nabla_t \mathbf{u} + (\nabla_t \mathbf{u})^T)] = -p_{entr} \cdot \mathbf{n} \\ \nabla_t \mathbf{u} = 0 \end{cases}$$

- *Temperatura*: quando si impone che la temperatura di un contorno rimanga costante, se il fluido entra dallo stesso segmento per cui si impone questa condizione esso avrà quel valore. Con relazione:

$$T = T_0$$

- *Uscita*: contorno dal quale il fluido può uscire, fondamentale perché il modello non dia errore e rappresenta nel nostro caso l'ingresso dell'aerorefrigeratore. Le opportunità di scelta sono le stesse dell'*Ingresso* ma in questo caso si è scelto *Pressione* nulla. Ovvero:

$$p = p_0$$

- *Sorgente di calore*: condizione da dare al dominio selezionato per rappresentare il calore emesso per respirazione, viene selezionata la modalità *Sorgente generale* da esprimere in W/m^3 e l'equazione è quella relativa alla trasmissione di calore nei solidi vista prima.

La *mesh* in questi casi è di circa 35 mila elementi e la si inspessisce manualmente nei domini che rappresentano le mele, per una maggiore precisione.

L'ultima differenza dal caso precedente è la *Configurazione del solutore*. La si modifica perché quando si lavora con i fluidi, proprio per le loro caratteristiche fluidodinamiche, il passo con cui il solutore giunge a convergenza non può aumentare con andamento "esponenziale", come avviene per il trasferimento di calore nei solidi. Questo perché nei solidi inizialmente si ha un passo piccolo per dare inizio al fenomeno senza avere errori di calcolo eccessivi, per poi aumentare il passo in modo rapido fino al passo massimo, perché in ogni caso si avrà un andamento regolare. Per i fluidi, soprattutto quando si riproducono moti con una certa velocità e su volumi elevati, questo passo deve restare piccolo per definire il fluido in modo dettagliato. Di conseguenza si hanno dei tempi di risoluzione che possono dare problemi pratici (il tempo che ci mette il programma ad arrivare a convergenza è superiore a quello simulato) seppur a livello di software l'errore sia accettabile. Di fatti nei modelli esemplificativi presenti nel programma le simulazioni trattanti fluidi hanno delle tempistiche dell'ordine dei secondi, contrariamente nel lavoro svolto dovrebbero essere di qualche giorno. In ogni caso si è arrivati ad un buon compromesso impostando come *Metodo* il *BDF*, con *Ordine BDF massimo* 5 e *Ordine BDF minimo* 2.

4. Cella frigorifera sperimentale

Nella fase iniziale del progetto, quando ancora si stava appurando la fattibilità dello stesso, si è deciso di comune accordo tra le parti di costruire una cella sperimentale per la conservazione delle mele dal momento che non è presente in letteratura materiale a riguardo.

La cella verrà sottoposta a diversi periodi di conservazione, verranno inserite delle sonde di temperatura nella roccia per monitorarne il comportamento, si registreranno i consumi di energia elettrica dell' impianto frigorifero, temperatura e quantità di mele, etc.. Servirà anche per stabilire la possibilità di conservazione dal punto di vista agroalimentare.

Al nostro lavoro sarà utilizzata per la validazione del modello agli elementi finiti.

La cella frigorifera di prova è stata costruita affianco a quelle che saranno le gallerie contenenti le celle vere e proprie. Ha lo stesso rivestimento superficiale, tipologia di impianto e la stessa porta impermeabile ai gas, ma solo di dimensioni inferiori (Fig. 4.1). Ha una lunghezza di 16 m, un' altezza e larghezza di 6 m, per una capacità di circa 370 cassoni, ovvero 120 ton di frutta (Fig. 4.2 [10] e Fig. 4.3).

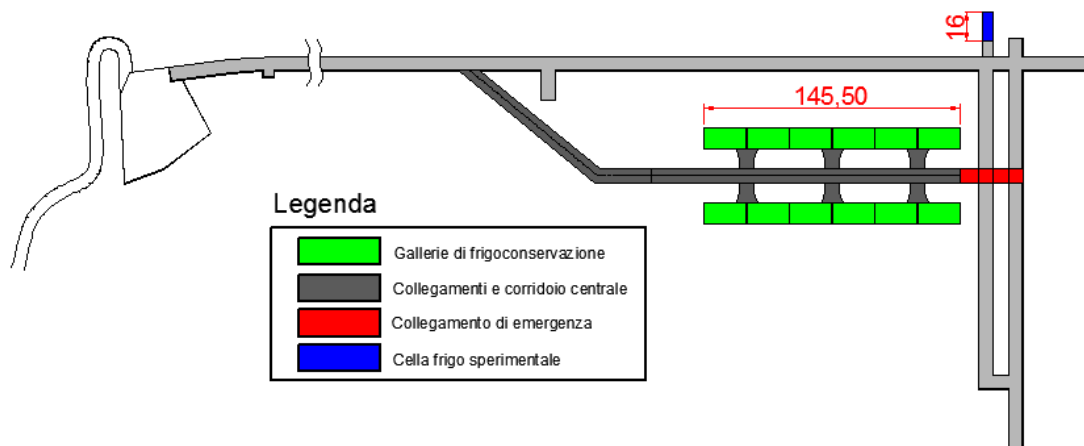


Fig. 4.1- Disposizione gallerie frigoconservazione e cella sperimentale



Fig. 4.2- Ingresso cella sperimentale



Fig. 4.3- Interno cella sperimentale

4.1 Dati sperimentali

I dati fornitoci per lo studio sono quelli inerenti alle prime tre prove di conservazione. Sono relativi al periodo dal 20 febbraio 2012 all' 1 agosto 2013. I tre cicli di sperimentazione effettuati hanno avuto una durata inferiore all' anno, contrariamente al ciclo naturale del prodotto, questo per far un numero rilevante di test in poco tempo.

La prima prova è iniziata con un breve preraffreddamento della roccia, per poi inserire le mele e abbassare contemporaneamente la temperatura di entrambe, infine il mantenimento. La seconda e terza sperimentazione hanno avuto, come avverrà in realtà, un periodo relativamente lungo di preraffreddamento, poi il carico e infine il mantenimento.

Solo che in queste prove l' impianto frigorifero ha continuato a funzionare, invece di essere lasciato spento durante la fase di riempimento della cella. La conduzione nella gestione di questi cicli di prova, è avvenuta in modo un po' diverso da come verrà gestito l' impianto. Questo potrebbe portare a delle conclusioni fuorvianti, come vedremo in seguito.

I dati fornitoci sono relativi ai valori giornalieri di:

- Consumo di energia elettrica dell' impianto frigorifero
- Temperatura delle sonde inserite nella roccia
- Temperatura dell' aria in cella (solo per la terza prova)
- Temperatura delle mele (solo per la terza prova)

Sono stati forniti, inoltre, temperatura e quantità di mele inserite nei vari carichi, caratteristiche dell' impianto frigorifero (solo l' ultimo in quanto è stato sostituito e

modificato più volte), disegni in programma CAD e dati di massima inerenti al futuro impianto di refrigerazione.

Vediamo più nel dettaglio le misurazioni.

Le sonde di temperatura sono state posizionate sopra la cella, per monitorare la temperatura a diverse profondità. Sono state posizionate facendo delle trivellazioni in discesa da un tunnel di collegamento soprastante, esse sono poste tutte a metà cella ma non in asse, ogni foro ha un punto di partenza diverso lungo il corridoio e quindi risultano sfalsate (Fig. 4.4).

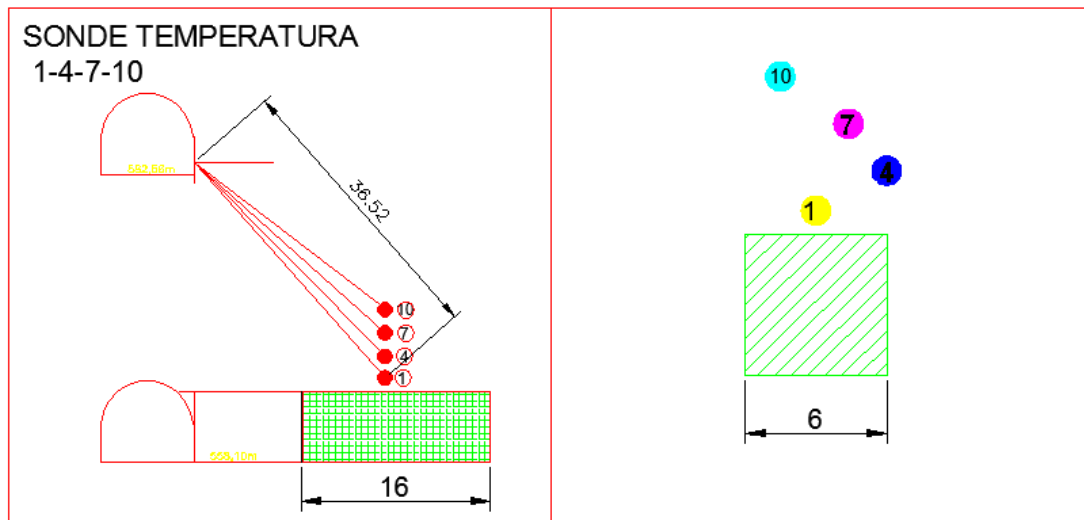


Fig. 4.4- Posizione sonde di temperatura sopra la cella sperimentale

Sono poste ad una distanza dal soffitto della cella pari a:

- Sonda 1: 1,20 m
- Sonda 4: 3 m
- Sonda 7: 5 m
- Sonda 10: 7 m

La numerazione delle sonde è stata mantenuta uguale a quella fornitaci nei dati, in modo da non incorrere in errori di sostituzione e per permettere a chi di interesse di confrontare i risultati delle simulazioni in modo diretto senza dover cercare la corrispondenza tra la numerazione di questa tesi con quella originale.

L'andamento della temperatura per le quattro sonde nel periodo considerato è riportato in Fig. 4.5:

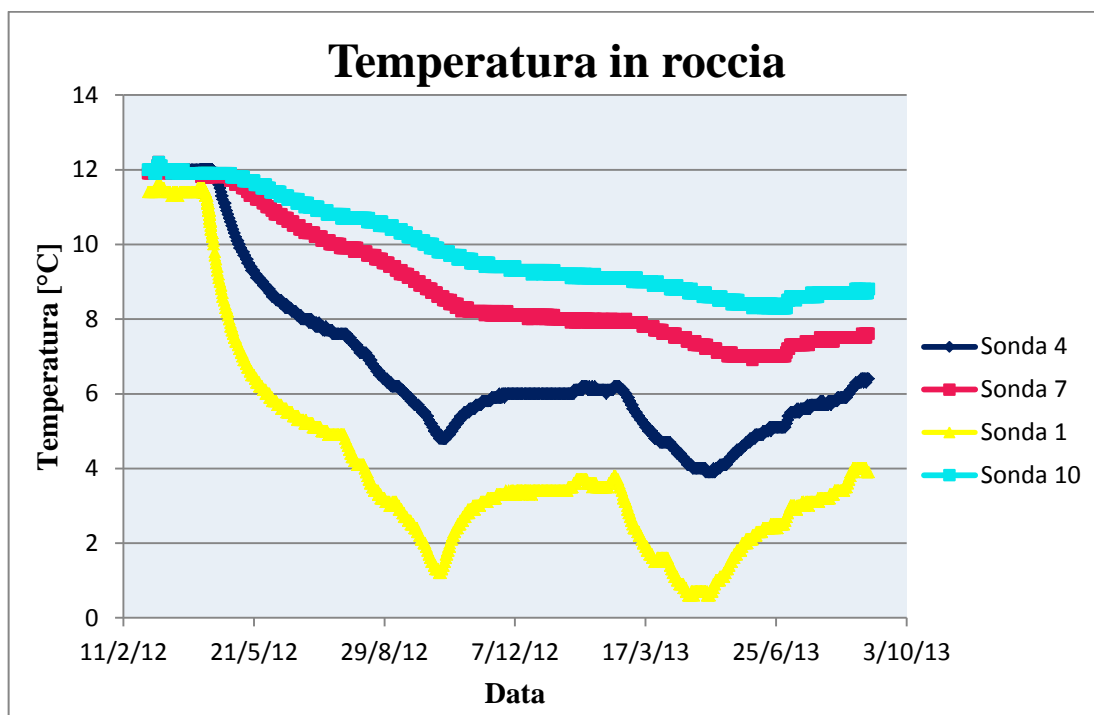


Fig. 4.5- Andamento di temperatura delle sonde nella roccia

Come ci si aspettava, l'andamento delle temperature all'aumentare della profondità è smorzato e shiftato nel tempo. Si distinguono nitidamente le varie fasi di sperimentazione soprattutto sulla sonda più vicina, che essendo solo a 1,2 m di profondità ha un ritardo rispetto al sistema di 3 giorni, deducibile confrontando consumi elettrici e temperatura.

Solo per la terza prova sono stati rilevati pure i valori di temperatura dell'aria all'interno della cella e delle mele (Fig. 4.6). Quest'ultima si riferisce alla temperatura di polpa di un frutto che si trova nella parte superficiale del cassone, quindi uno dei primi ad essere raffreddato.

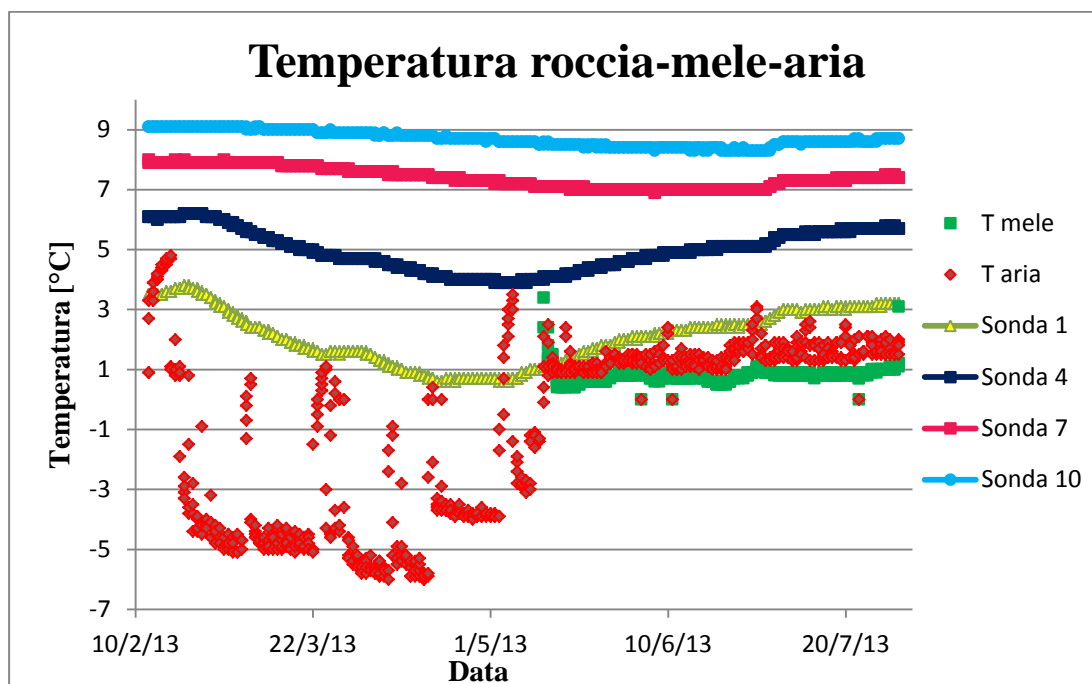


Fig. 4.6- Andamento temperature terza prova

Dal grafico si può osservare che le mele si raffreddano velocemente, questo per due motivi: primo perché come visto si fa riferimento a un frutto esterno e secondo perché vengono stivate con una temperatura media di circa 3 °C, quindi già quasi fredde.

Per quanto riguarda lo stato termico dell'aria si osserva che durante il mantenimento la sua temperatura è maggiore di quella delle mele, nonostante sia raffreddata dagli aerorefrigeratori, quando invece il suo compito sarebbe proprio quello di assorbire il calore della frutta. Si suppone che la sonda relativa a tale misurazione sia stata posizionata in modo non ottimale.

Ben più difficoltosa è l'analisi sui consumi energetici, non tanto per i valori relativi all'energia elettrica assorbita dall'impianto di refrigerazione, ma riguardo all'energia termica fornita dallo stesso. La quale influenza direttamente la temperatura nella roccia. Questo perché non si hanno informazioni precise riguardo il coefficiente di prestazione (COP) dell'impianto, col quale si trova l'energia termica da quella elettrica, se non per la terza prova. I consumi sono riassunti nel grafico di Fig. 4.7.

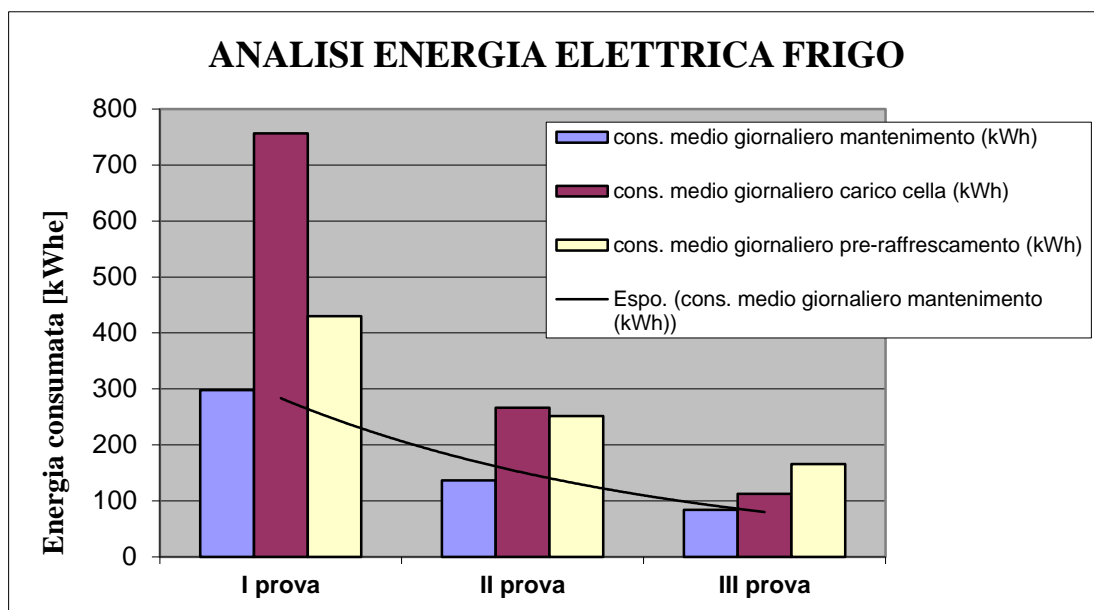


Fig. 4.7- Consumi energia elettrica gruppi frigoriferi

Da questo grafico si potrebbe giungere alla facile conclusione che i consumi in celle ipogee si riducano notevolmente in poco tempo. Ma bisogna considerare che la prima prova è servita fundamentalmente per raffreddare la roccia, anche durante il mantenimento. La seconda è quella più veritiera considerando che l'andamento della temperatura nella roccia (Fig. 4.5) in mantenimento va all'equilibrio in modo asintotico e le mele vengono immagazzinate a una temperatura più congrua rispetto alla stagione di raccolta (come si vedrà alla fine del paragrafo). Nella terza la frutta, come detto, viene stoccata quasi fredda e nel periodo di conservazione non si assorbe sufficiente calore dalla montagna per tenere le temperature costanti, difatti aumentano (Fig. 4.5), non si raggiunge una condizione di equilibrio. Quindi rispetto a quello che dovrebbe essere il funzionamento a regime della cella, nella prima prova si consuma troppo e nella terza troppo poco, ne risulta che i valori dovrebbero essere circa costanti in questo breve periodo di un anno e mezzo. Tali considerazioni valgono a livello qualitativo, per una considerazione quantitativa su come risponde la roccia alle sollecitazioni termiche bisogna valutare l'energia frigorifera messa in gioco dall'impianto. Essa la si ricava conoscendo il coefficiente di prestazione dello stesso, il quale è il rapporto tra il calore sottratto alla sorgente fredda e il lavoro esterno compiuto a tale scopo, secondo la relazione [11]:

$$COP = \frac{Q_f}{|W|} \quad (4.1)$$

Dove:

COP [ad.] = coefficiente di effetto utile

Q_f [kWh] = quantità di calore sottratto

W [kWh] = lavoro compiuto

Le caratteristiche dell' impianto di refrigerazione nella terza prova (per precisione dal 18 aprile 2013, quindi quasi al termine del pre-raffrescamento) sono note e riassunte nella tabella sottostante (Tab. 4.1) [12].

Tabella 4.1- Caratteristiche impianto di refrigerazione

Refrigeratore di liquido con condensazione ad acqua	
Potenza evaporatore	21,6 kW
Potenza assorbita	7,92 kW
Potenza del condensatore	29,6 kW
COP/EER	2,73
Refrigerante	R404A
Portata massa	627 kg/h
Temp. Evaporazione	-13 °C
Temp. Condensazione	35 °C
Sottoraffredd. Liquido	5 K
Surriscald. Gas aspirato	10 K
Serbatoio accumulo	500 l
Evaporatore	
Tipo	a piastre
Prodotto da refrigerare	acqua+glicole etilenico 35%
Temp. IN prodotto	-4 °C
Temp. OUT prodotto	-8 °C
Portata	5,259 kg/s
Condensatore	
Tipo	a fascio tubiero per acqua di pozzo
Temp. IN prodotto	15 °C
Temp. OUT prodotto	25 °C
n° passi	4
Portata acqua	3,1 m ³ /h
Temp. Vapore IN	63 °C
Aerorefrigeratore	
Potenza	56,1 kW
Temp. IN aria	4 °C
Temp. OUT aria	0,4 °C
Temp. IN fluido	-5 °C
Temp. OUT fluido	0 °C
Portata aria	38800 m ³ /h
Freccia aria	30 m
n° ventilatori	5
Diam. vent.	500 mm

Con questi dati e usando la relazione (4.1) si può agevolmente trovare la quantità di calore assorbito.

Per quel che riguarda la prima e la seconda prova si sa che la potenza termica dell' impianto era di 55 kW_t, raffreddato inizialmente ad aria con COP pari a 2 e poi si è passati a uno di pari potenza ma ad acqua. Sarà necessario fare delle valutazioni e successivamente delle ipotesi.

Innanzitutto quando avviene il cambio del gruppo frigo si ha un buco nella registrazione dei consumi di almeno 2 giorni, come è stato per la terza prova dove si conosce la data. Nell' elenco dei consumi giornalieri ci sono tre coppie di giorni nei quali non si sono rilevati i dati. Per cui la prima ipotesi è che si sia passati dal raffreddamento ad aria a quello ad acqua il 3 settembre 2012, quindi verso la fine del pre-raffrescamento seconda prova, in quanto l' altro intervallo sarebbe stato 20 giorni prima dell' ultima sostituzione nella terza prova, il che è improbabile. Inoltre si presume che il COP sia sempre pari a 2,7 come nella terza sperimentazione visto che entrambi sono raffreddati ad acqua. Quindi prima si è passati al raffreddamento ad acqua per aumentare il COP dell' impianto, ma poi la potenza era troppa e visto che funzionava poche ore al giorno si è installata una potenza inferiore. Con tale potenza l' impianto tenderebbe a funzionare in modo continuato, ma ciò non è possibile visto che periodicamente si fanno dei cicli di sbrinamento della batteria alettata, seppur brevi. Di conseguenza non si riesce ad assorbire l' energia necessaria dalla roccia e come visto sopra, la temperatura tende ad aumentare in essa. Lo storico dei gruppi frigo è stato riassunto (Tab. 4.2):

Tabella 4.2- Storico gruppi frigo

dal 12-4-2012 al 1-9-2012		
P evaporatore	55	kW _t
P assorbita	27,5	kW _e
COP	2	
dal 3-9-2012 al 17-4-2013		
P evaporatore	55	kW _t
P assorbita	20,1	kW _e
COP	2,73	
dal 18-4-2013 al 1-8-2013		
P evaporatore	21,6	kW _t
P assorbita	7,92	kW _e
COP	2,73	

D' ora in poi useremo, per confrontare i risultati delle simulazioni con quelli reali, l' energia termica media impiegata all' interno dell' ambiente considerato. Questo perché in base alla potenza dell' impianto, esso funzionerà un numero diverso di ore durante la giornata, ovvero impianti con potenze diverse possono fornire la stessa energia termica. I consumi elettrici inoltre dipendono dalle prestazioni dello stesso e

non si possono conoscere a priori, visto che l' impianto che verrà installato per le gallerie sarà molto più grande ed avrà tendenzialmente un COP maggiore.

I dati relativi all' immagazzinamento delle frutta forniscono data e ora di arrivo dei carichi, temperatura, quantità e provenienza degli stessi. Riassumendo ho che (Tab. 4.3):

Tabella 4.3- Carichi cella sperimentale

Prova	Giorno	Camion	Quantità			T media
			Cassoni tot	Mele	Mele tot	
				kg	ton	°C
1°	17-apr-12	3	141	46530	122,10	5,57
	18-apr-12	6	229	75570		
2°	08-ott-12	3	141	46530	121,44	12,96
	09-ott-12	3	142	46860		
	10-ott-12	2	85	28050		
3°	13-mag-13	6	252	83160	124,74	2,94
	14-mag-13	3	126	41580		

La frutta arrivando da altri magazzini, in cui era già in fase di conservazione, non si riscalda molto nel tragitto. Le temperature a cui probabilmente verranno immagazzinate le mele saranno superiori. Questo fatto è da considerare nella valutazione dei consumi di energia per abbassarne la temperatura.

In quest' analisi la temperatura delle mele in arrivo all' impianto verrà ipotizzata pari a 25°C, per essere in vantaggio di sicurezza. Ricordando che non arrivano direttamente dal campo, ma passano per il consorzio dove vengono immerse in acqua fredda per lavarle, selezionarle e movimentarle. Quindi anche se si riscaldassero nella tratta consorzio-magazzino in ogni caso non supererebbero i 25°C.

4.2 Modello cella pilota e confronto con dati sperimentali

Una volta analizzati i dati sperimentali, si procede con la creazione del modello agli elementi finiti mediante software, della cella sperimentale. Il quale dovrà simulare al meglio il comportamento del sistema da studiare. I risultati verranno confrontati e se verrà validato si potrà passare alla fase successiva, ovvero applicarlo alle celle più grandi.

Di modelli ne sono stati fatti più di uno, per studiare con maggior precisione ogni fase della conservazione, più uno che cerchi di simulare al meglio tutto lo storico. Ognuno di essi viene creato come descritto nel paragrafo 3.2.

Nello specifico le condizioni al contorno, da definire nei vari modelli di queste simulazioni sono:

- Temperatura di pre-raffreddamento: -3 °C in ogni simulazione e stabilito dalla temperatura media che si ha nella terza prova;
- Temperatura di mantenimento: 1,2 °C che è la media dei valori da noi posseduti (anche se superiore a quello che si dovrebbe avere);
- Emissività superficiale: 0,8 visto il rivestimento chiaro;
- Valori iniziali: le temperature da dare ai domini sono diverse e dipendono da caso a caso. Questo perché per dare un profilo di temperatura alla roccia diverso dai 12°C iniziali si son create delle superfici isoterme concentriche e qui non verranno riportati i singoli valori di temperatura;
- Coefficiente di trasporto termico: 0,85 valore medio da considerare su tutta la superficie della cella fornitoci direttamente dalla Tassullo.

La prima prova nella cella pilota è quella meno rappresentativa di quello che poi avverrà in realtà. Questo perché la fase di preraffreddamento dura solo 5 giorni, poi hanno fatto il carico e si è andati ad assorbire il calore della roccia con le mele già stipate e quindi con una temperatura dell' aria maggiore, per una durata di 97 giorni. Durante il carico l' impianto è sempre stato in funzione di conseguenza per fare il confronto con la simulazione si considera l' energia media del periodo senza distinguere le varie fasi. Per la creazione del modello e relative condizioni al contorno si fa riferimento a quanto precedentemente detto. La Tab. 4.4 (sotto), riporta i valori di confronto per quel che riguarda le temperatura delle quattro sonde e poi anche il grafico per confrontarne l' andamento (Fig. 4.8).

Tabella 4.4- Confronto temperature fine 1° pre-raffreddamento

Dati	T1	T4	T7	T10
	°C	°C	°C	°C
reali	4,9	7,6	10	10,8
simulazione	4,5	8,4	9,9	11,1
differenza	0,4	-0,8	0,1	-0,3

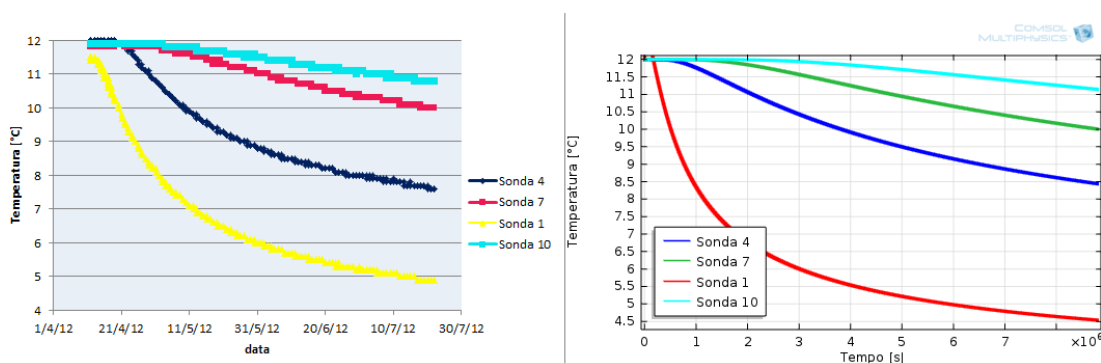


Fig. 4.8- Confronto andamento temperature 1° pre-raffreddamento

L' andamento della temperatura e i valori finali, sono comparabili.

Il confronto sull' energia non è immediato come con le temperature. Ai valori dati in uscita dalla simulazione, essendo in 2D, bisogna aggiungere quella riferita alla parete di fondo. Stimata in base all' energia specifica delle altre superfici, in quanto non è trascurabile per celle di dimensioni ridotte. Inoltre si somma la potenza di respirazione delle mele, nelle fasi in cui sono presenti, quantificata in 2,5 kW per tutte le simulazioni vista la quantità praticamente costante. Per ultima si aggiunge la potenza persa dalla parete di chiusura, ipotizzata di 1 kW. La tabella relativa è (Tab. 4.5):

Tabella 4.5- Confronto energia 1° pre-raffreddamento

Dati	P sim. media	P resp.	P media	E frigorifera	COP	E consumata
	W/m	kW	kW	kW _t		kW _e
reali			26,09	626,2	2	313,1
simulazione	1150	2,5	23,63	567,0		
errore %				10		

Anche in questo caso i due valori sono equiparabili.

Nella seconda e terza prova le condizioni al contorno non cambiano tra carico e mantenimento. Questo perché, come vedremo dopo, l' energia consumata copre il fabbisogno per raffreddare la frutta. La roccia contribuisce in quei giorni solo ad annullare le perdite, per poi continuare a cedere calore una volta che la frutta si porta a temperatura. Per cui la simulazione riguardante i consumi dei giorni di carico non viene svolta.

In ogni caso le temperature delle tre fasi sono verificate separatamente (Tab. 4.6 e Fig. 4.9).La seconda prova dura 198 giorni, di cui 73 di preraffreddamento e 125 di carico più mantenimento.

Tabella 4.6- Confronto temperatura 2° prova

Dati	T1	T4	T7	T10
	°C	°C	°C	°C
Fine 2° preraffreddamento				
reali	1,3	5	8,7	9,9
simulazione	1,27	6,3	8,37	10
differenza	0,03	-1,30	0,33	-0,10
Fine 2° carico				
reali	1,2	4,8	8,6	9,8
simulazione	1,39	6,27	8,33	9,98
differenza	-0,19	-1,47	0,27	-0,18
Fine 2° mantenimento				
reali	3,5	6,1	7,9	9,1
simulazione	3,45	6,36	7,74	9,11
differenza	0,05	-0,26	0,16	-0,01

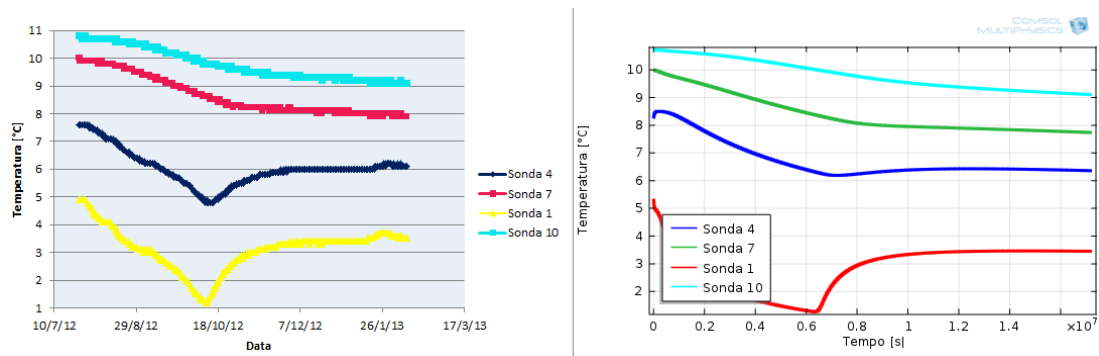


Fig. 4.9- Confronto andamento temperature 2° prova

Usando la relazione sotto troviamo la quantità di calore da assorbire da mele e cassoni:

$$Q = M \cdot c_p \cdot (T_{iniz.} - T_{fin.}) \quad (4.2)$$

Dove:

Q [J] = quantità di calore

M [kg] = massa

C_p [J/kg*K] = calore specifico

T [K] = temperatura

Il tutto riassunto in Tab. 4.7 :

Tabella 4.7- Energia secondo carico

	mele	cassoni	
massa	121440	12144	kg
c_p	3640	1200	J/kg*K
$T_{iniz.}$	12,96	12,96	°C
$T_{fin.}$	0,75	0,75	°C
E respirazione	178		kWh _t
fabbisogno E	1678	49	kWh _t
fabbisogno E tot	1727		kWh _t
E impiegata frigo	2184		kWh _t

Al surplus di energia impiegata rispetto al fabbisogno, seppur esigua, bisogna aggiungere il contributo della roccia nel raffreddare l'aria e nel non permettere dispersioni di calore. Questo calore "residuo" lo si perde nell'apertura delle porte durante il trasporto. Nelle altre due fasi ho (Tab. 4.8):

Tabella 4.8- Confronto energia 2° prova

Dati	P sim. Media	P resp.	P media	E frigorifera	COP	E consumata
	W/m	kW	kW	kW _t		kW _e
Preraffreddamento						
reali			24,44	590,1	2;2,73	251,4
simulazione	1283	0	23,45	562,9		
errore %				5		
Mantenimento						
reali			15,37	376,2	2,73	136,6
simulazione	561	2,5	13,27	318,4		
errore %				17		

L'andamento del flusso termico da grafico è rappresentato in Fig. 4.10, si vede che quando passo dai -3°C ai 1,2°C in cella ho che la roccia cede calore perché lo strato superficiale più freddo si riscalda, ovvero contribuisce a raffreddare l'aria.

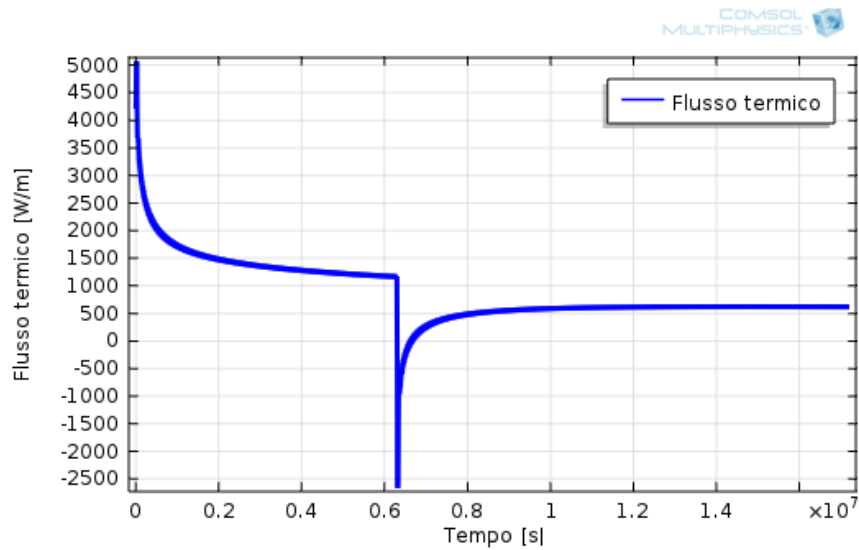


Fig. 4.10- Flusso termico superficiale 2° prova

Il software considera positivo il calore che assorbito dalla roccia e negativo quello ceduto, in accordo col 1° principio della termodinamica. Considerando che il sistema è la cella e l' ambiente la roccia, dal momento che il nome della condizione al contorno è “*Raffreddamento per convezione*”.

Il preraffreddamento della terza prova dura 89 giorni e il carico più il mantenimento 81. Le temperature risultanti, al primo agosto, data fino cui si possiedono anche i dati dei consumi elettrici, sono (Tab. 4.9 e Fig. 4.11):

Tabella 4.9- Confronto temperature 3° prova

Dati	T1	T4	T7	T10
	°C	°C	°C	°C
Fine 3° preraffreddamento				
reali	1	4	7,1	8,5
simulazione	0,7	4,9	6,8	8,6
differenza	0,30	-0,90	0,30	-0,10
Fine 3° carico				
reali	1,1	4,1	7,1	8,5
simulazione	1,14	4,8	6,7	8,55
differenza	-0,04	-0,70	0,40	-0,05
Fine 3° mantenimento				
reali	3,2	5,7	7,4	8,7
simulazione	3,2	5,69	6,9	8,3
differenza	0,00	0,01	0,50	0,40

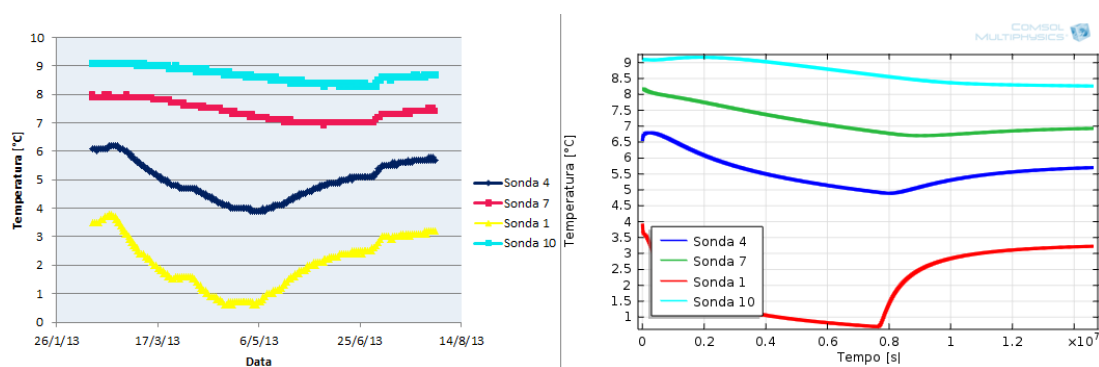


Fig. 4.11- Andamento temperature 3° prova

In questa prova, vista la bassa temperatura della frutta stivata, ho nella fase di carico un surplus di energia prodotta dall' impianto frigorifero. Seppur si è consumato meno che nella seconda prova (Tab. 4.10):

Tabella 4.10- Energia terzo carico

	mele	cassoni	
massa	121740	12174	kg
c_p	3640	1200	J/kg*K
$T_{iniz.}$	2,94	2,94	°C
$T_{fin.}$	0,75	0,75	°C
E respirazione	119		kWh _t
fabbisogno E	389	9	kWh _t
fabbisogno E tot	398		kWh _t
E impiegata	607,5		kWh _t

Mentre la tabella riassuntiva dei consumi è (Tab. 4.11):

Tabella 4.11- Confronto energia 3° prova

Dati	P sim. media	P resp.	P media	E frigorifera	COP	E consumata
	W/m	kW	kW _t	kW _t		kW _e
Preraffreddamento						
reali			18,66	452,9	2,73	165,9
simulazione	1268	0	23,19	556,6		
errore %				-20		
Mantenimento						
reali			9,55	231,8	2,73	84,9
simulazione	441,4	2,5	11,22	269,4		
errore %				-15		

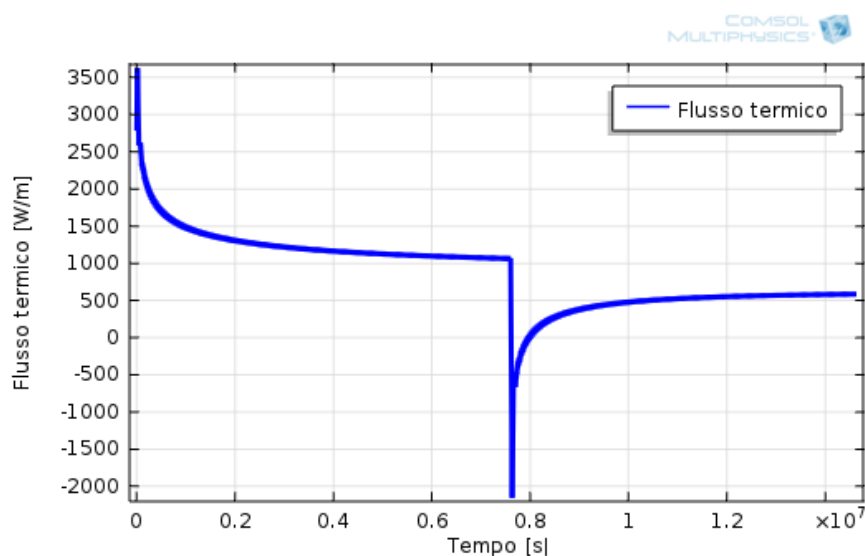


Fig. 4.12- Flusso termico superficiale 3° prova

In questa prova l' errore percentuale sull' energia assorbita è superiore a prima, grazie al fatto che riducendo la potenza dell' impianto la temperatura fatica ad arrivare al valore di regime.

Complessivamente l' andamento delle temperature fino all' 1 agosto, reali e simulate, è (Fig. 4.13):

Temperatura in roccia

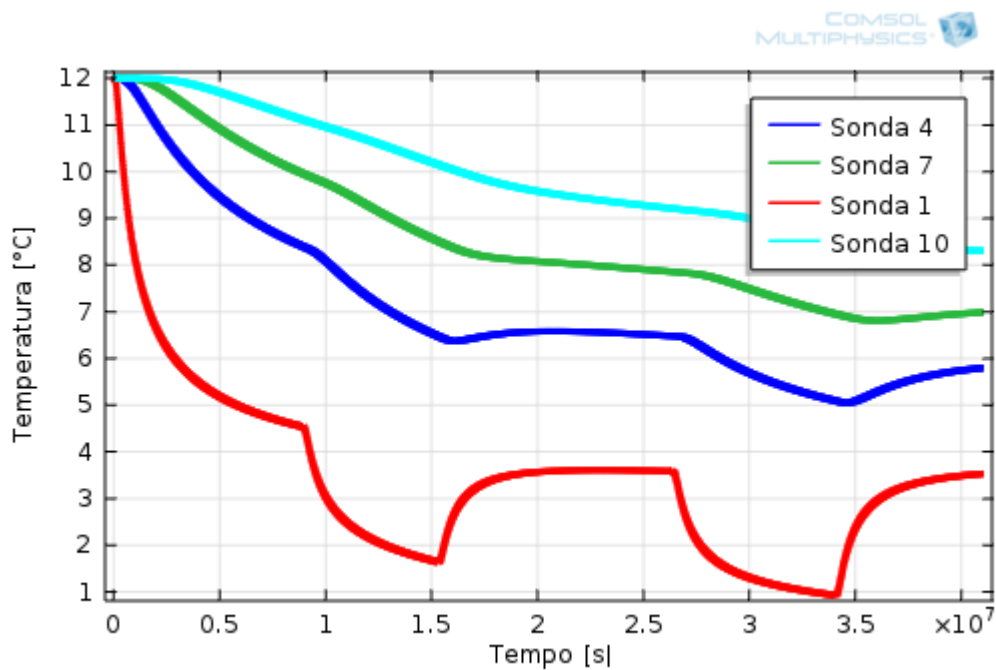
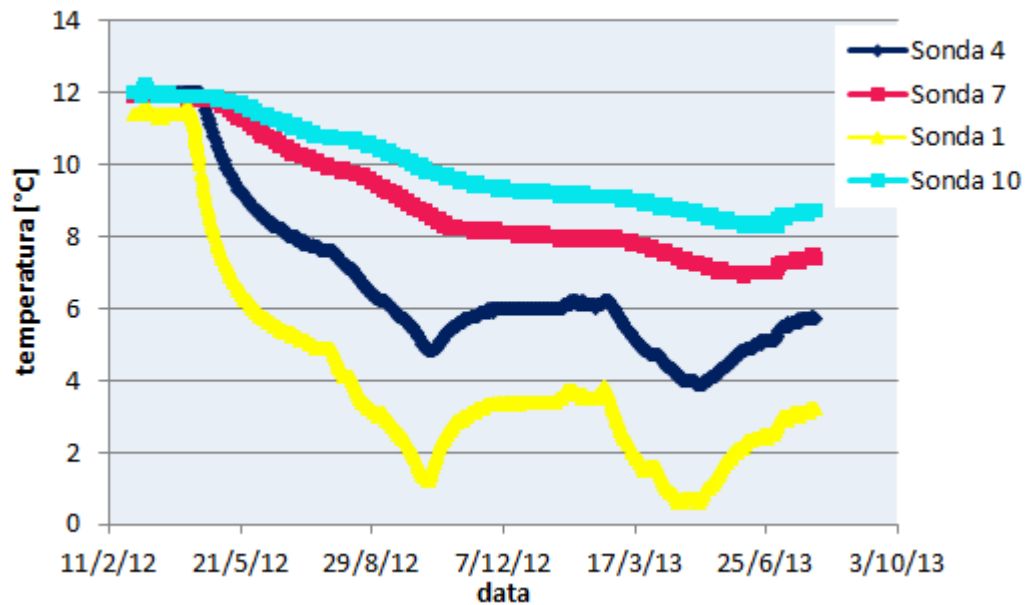


Fig. 4.13- Confronto andamento temperatura globale

I profili di temperatura sopra sono quelli reali, quelli sotto sono simulati. Una volta fatte tutte le simulazioni del caso si passa all' analisi dei risultati.

4.3 Validazione modello

I risultati ottenuti dalle simulazioni sono coerenti con i dati sperimentali.

In particolar modo le temperature delle sonde non si discostano mai oltre l' 1°C fra i due valori. Tranne che per la sonda 4 nella seconda prova e in generale proprio questa sonda è quella che ha il margine maggiore. Questo probabilmente per un mal posizionamento della sonda o una discontinuità all' interno della roccia che ne aumenta la diffusività termica, perché il suo andamento è come quello di una sonda a una profondità un po' superiore a quello che in realtà è.

Inoltre l' andamento di temperatura delle sonde più vicine alla superficie è "asintotico", questo perché si da una condizione al contorno continua. Invece i dati forniscono, a volte andamenti "asintotici" e altri più "rettilinei", ciò si spiega col fatto che l' impianto frigorifero non funziona continuamente e quindi si attenua l' andamento più ripido iniziale della curva facendone risultare quasi una retta.

Per quel che riguarda i consumi di energia, nel carico, si è già visto che si fornisce l' intero fabbisogno di "freddo" alle mele tramite l' impianto, non potendo fare delle valutazioni molto precise sull' energia restituita dalla montagna.

Nelle altre fasi i consumi non superano mai un errore relativo del 20%. Il modello non è stato modificato per ridurre quest' errore perché nella prima e seconda prova si sono rilevati consumi maggiori nei dati reali. Mentre nella terza prova risultano più consistenti quelli ottenuti dalla simulazione. Mantenendo il modello con tali condizioni ci si stabilizza in una condizione intermedia in modo che lo si possa applicare in ogni situazione, senza pretendere troppa precisione in alcune situazioni e troppo poca in altre.

Da notare anche che il calore assorbito in mantenimento e pre-raffrescamento nelle simulazioni della seconda e terza prova sono circa uguali, d' altronde come si può confrontare con il grafico delle temperatura reale la differenza di temperatura che subisce la roccia è simile nei due casi. Quindi a parità di andamento del profilo di temperatura nella roccia dovrebbero corrispondere consumi uguali. Invece in realtà i consumi misurati nella terza prova sono abbastanza più bassi, comportando un aumento graduale ma costante delle temperature come visto precedentemente e così si spiega anche il motivo di tali errori relativi percentuali.

A seguito di queste constatazioni possiamo affermare la validità del modello sviluppato per lo studio del comportamento della roccia. Si proseguirà con l' applicazione dello stesso alle gallerie adibite alla frigoconservazione futura.

5. Gallerie di frigoconservazione

Le gallerie previste per la frigoconservazione vengono analizzate con i modelli validati precedentemente. Si esaminerà il comportamento della roccia, stimando la quantità di energia necessaria e verrà fatta una valutazione complessiva dell'impianto per quanto riguarda consumi e gestione in funzione dei risultati ottenuti.

Il modello prevede una simulazione in 2D, per cui si analizzerà una sezione trasversale di galleria. Considerando una cella centrale, quindi non avendo flussi termici in senso assiale visto l'affiancamento fra esse, l'analisi della simulazione sarà semplificata in quanto basterà estendere i risultati ottenuti (che sono per unità di lunghezza) lungo l'asse della stessa.

L'impianto avrà delle tempistiche più distese rispetto alla cella sperimentale. Si effettuerà prima di tutto un pre-raffreddamento generale della roccia adiacente alle celle della durata di 4 mesi. I carichi avverranno sempre tra settembre e ottobre in corrispondenza della stagione di raccolta della frutta in oggetto. Il periodo di mantenimento potrà terminare, a seconda della cella, tra marzo e agosto. Questo perché vengono svuotate man mano che la merce viene acquistata dai clienti. Per poi riiniziare il ciclo con un nuovo pre-raffreddamento, ma più breve.

5.1 Primo pre-raffreddamento

Questa è la prima fase da realizzare e verrà svolta solo una volta visto che poi la temperatura della roccia sarà mantenuta bassa. Serve a creare uno strato di roccia fredda intorno alla cella, in modo che nel momento in cui vado ad immagazzinare le mele, essa contribuisca a raffreddarle e faccia sì che non vi siano dispersioni verso l'esterno. Potendo limitare la potenza dei gruppi frigo da installare, essendo il periodo nel quale si ha il maggior carico termico, nell'abbattimento della temperatura della frutta. Anche le gallerie che entreranno in funzione in futuro "vedranno" questa fase, ma solo in parte perché troveranno una montagna già parzialmente fredda. Di conseguenza se il progetto proseguirà con il suo ampliamento si saprà già che è meglio far entrare in funzione gallerie vicine a quelle già in servizio per limitare tali consumi, visto che sono molto rilevanti come osservato dalla sperimentazione.

Le condizioni al contorno da evidenziare sono la temperatura iniziale del dominio rappresentante la montagna che è di 12°C, e la temperatura dell'aria nell'ambiente di conservazione di -3°C. Questa temperatura è un valore medio ricavato dalla sperimentazione, quella minima rilevata è di -6 °C.

Sono state poste, nella simulazione, delle sonde al contorno per diversi domini di roccia circolari e concentrici onde trovare quanta energia termica viene interessata, nel tempo stabilito, in funzione della profondità.

Il calore da assorbire non sarà solo quello posseduto dalla roccia che si andrà a raffreddare. Ma anche quello che fluisce verso le zone a differente temperatura, la montagna tende nel tempo a ritornare in equilibrio termico, ed è necessario farci fronte per mantenere una condizione di stazionarietà.

Il profilo di temperatura che si ottiene ponendo una sonda rettilinea a metà cella, la quale fornisce la temperatura in funzione della profondità (che è pari alla sua lunghezza), è (Fig. 5.1):

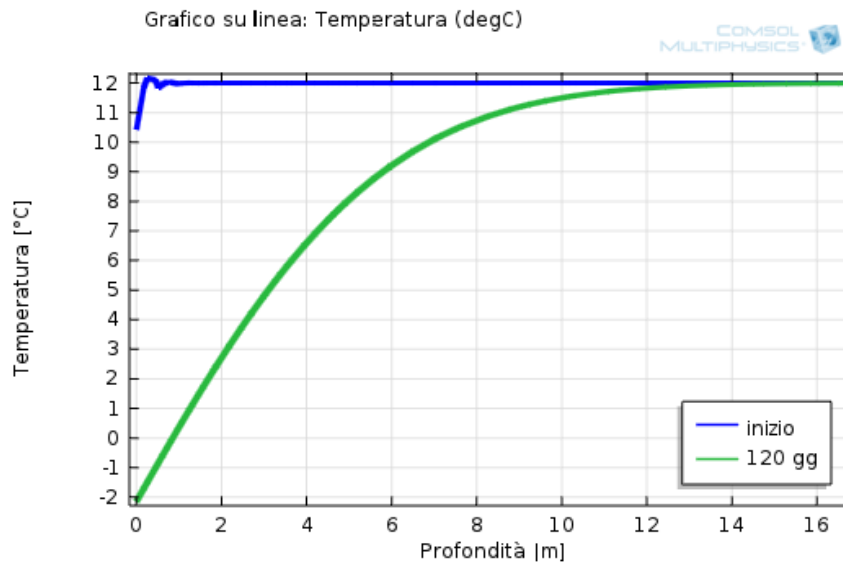


Fig. 5.1- Profilo di temperatura fine 1° pre-raffreddamento

Come si vede il profilo di temperatura non è rettilineo, questo perché la temperatura superficialmente cala veloce e man mano che si aumenta la profondità si abbassa sempre meno repentinamente. Inizialmente sarà un profilo molto iperbolico per poi raddrizzarsi lentamente. Con queste tempistiche si va ad interessare una profondità di 12 m.

Il grafico relativo all' andamento dei flussi termici a varie profondità è (Fig. 5.2):

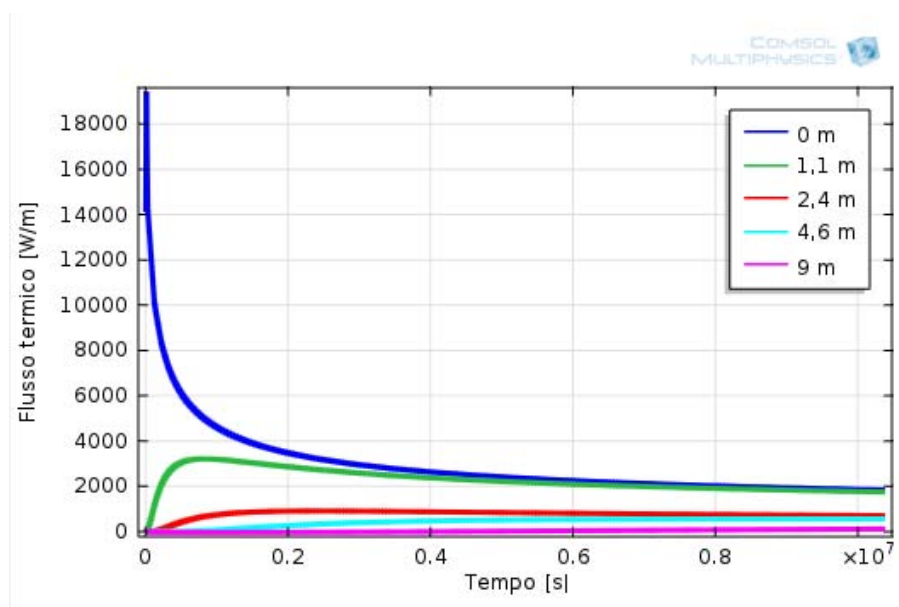


Fig. 5.2- Flusso termico a diverse profondità

Superficialmente il flusso è da subito massimo per poi diminuire. In profondità arriva in ritardo, con entità minore e distribuito su una superficie maggiore. Una volta quasi estinta la differenza di temperatura tra due circonferenze concentriche il flusso

che le attraversa è circa lo stesso, e sarà quello che serve a raffreddare strati più lontani di roccia. In questa simulazione lo scambio termico per radiazione è trascurabile, in quanto sarebbe circa l' 1%, d' altronde le superfici interne hanno tutte la stessa temperatura e l' ambiente per il momento è vuoto. I risultati sono riportati in Tab. 5.1:

Tabella 5.1- Energia assorbita a diverse profondità

Contorno	Profondità	P media	L cella	P media tot	E media	E circ.
	m	W/m	m	kW	kWh _t	%
1	0,00	2945	24	70,68	1696,32	100
2	1,00	2264	24	54,34	1304,06	76,88
3	2,50	768	24	18,43	442,37	26,08
4	4,50	423	24	10,15	243,65	14,36
5	9,00	26	24	0,62	14,98	0,88
E tot periodo =		203,56	MWh _t			

La potenza termica media da fornire con l' impianto di refrigerazione, in quei 4 mesi, è di 71 kW. Il quale giornalmente dovrà assorbire un' energia di 1700 kWh. Questi essendo valori medi corrisponderanno all' ipotesi di impianto sempre in funzione. Chiaramente non sarà così e per funzionare per una quantità di ore prestabilita si dovrà aver a disposizione una potenza superiore.

Con l' integrale del flusso termico in funzione del tempo si determina l' energia consumata per questa fase. Essa è stata valutata in 204 MWh, una quantità considerevole come ci si aspettava.

A questo punto sarebbe interessante valutare l' entità dell' energia per raffreddare la roccia, di quella per mantenere una condizione di stazionarietà e fare un confronto con i valori della cella prova.

Facendo una breve valutazione sulla prima, dimostrata al Cap. 6, è stata quantificata in 60 MWh, ovvero 21 kW di potenza media. Di conseguenza la seconda è di 50 kW, superiore alla prima e spalmata su una superficie cilindrica che a 10 m di profondità è di circa 2500 m² a cella.

Fare un paragone con la cella sperimentale per validare questi risultati è problematico, in quanto le temperature mantenute in cella sono diverse. E' stata fatta un' ulteriore simulazione per capire quanto influisca la temperatura in cella. Con una temperatura interna dell' aria di 1,2 °C nelle celle più grandi, in pre-raffrescamento ottengo una potenza media di 50 kW, divisa in 15,5 kW di potenza per il raffreddamento della roccia e 34,5 kW di potenza persa per mantenere il profilo di temperatura. In ogni caso l' energia persa verrà valutata meglio quando si studierà la fase di mantenimento.

La potenza media diminuisce all' aumentare delle temperature in cella di circa 5 kW/°C. Per concludere è stato effettuato un confronto sulle potenze ed energie specifiche (Tab. 5.2):

Tabella 5.2- Confronto energia e potenza 1° pre-raffreddamento

Energia specifica						
	Tcella	E media	Superficie	E/S	Volume	E/V
	°C	kWh	m ²	kWh/m ²	m ³	kWh/m ³
cella sperimentale	1,2	530	456	1,162	576	0,920
cella sper. Simulaz.	1,2	442	384	1,150	576	0,767
cella grande	1,2	1221	1085	1,126	3159	0,387
cella grande	-3	1696	1085	1,563	3159	0,537
Potenza specifica						
	Tcella	P media	Superficie	P/S	Volume	P/V
	°C	kW	m ²	kW/m ²	m ³	kW/m ³
cella sperimentale	1,2	22	456	0,048	576	0,038
cella sper. Simulaz.	1,2	18,4	384	0,048	576	0,032
cella grande	1,2	50	1085	0,046	3159	0,016
cella grande	-3	71	1085	0,065	3159	0,022

Per la superficie della cella sperimentale sono state considerate anche le superfici di principio e fondo, sottraendo i consumi per respirazione. Mentre per la simulazione della stessa e di quella grande solo l' area longitudinale.

L' energia specifica per unità di superficie si mantiene circa costante a parità di temperatura interna dell' aria, ma in realtà essendo inferiore per la cella grande, avremo un consumo di 1,5 kWh/m² . Per quel che riguarda i consumi specifici per unità di volume, all' aumentare della capacità i consumi si riducono notevolmente. Se confrontiamo le simulazioni delle due celle a parità di temperatura si è visto che, avendo un volume 5 volte maggiore dimezzo l' energia che metto a disposizione. Quindi se possibile è conveniente fare celle il più grandi possibili. Contrariamente a quello che si constaterà più avanti in fase di carico. Anche dal punto di vista costruttivo costa meno scavare gallerie grandi piuttosto che piccole, entro limiti ragionevoli. Le stesse considerazioni valgono per i valori delle potenze medie specifiche. Tali risultati sono intuibili considerando che indipendentemente dalle dimensioni dello spazio vuoto creato riesco a raffreddare/riscaldare sempre lo stesso spessore di roccia, in quanto la velocità con cui si trasmette il calore è funzione della diffusività termica, parametro costante.

Relativamente al primo pre-raffreddamento si verifica, mediante la seconda tipologia di modello agli elementi finiti (Cap. 4.3), l' ipotesi di impostare come temperatura con cui l' aria lambisce la roccia, un valore costante ed uniforme su tutte le superfici interne della cella. Questa è stata rappresentata in sezione longitudinale, perché gli otto ventilatori che verranno installati al soffitto, faranno fluire un' elevata portata d' aria verso il capo opposto della stessa. In aiuto ad essi verranno installati dei diffusori per indirizzare meglio il flusso. Una volta impostati i parametri nel modello, questi ventilatori essendo gli stessi della cella pilota (vedi Tab. 5.1), si è passati ad eseguire la simulazione. Come si può vedere in Fig. 5.3, il tempo che ci vuole perché la temperatura dell' aria si omogeneizzi, è dell' ordine dei minuti.

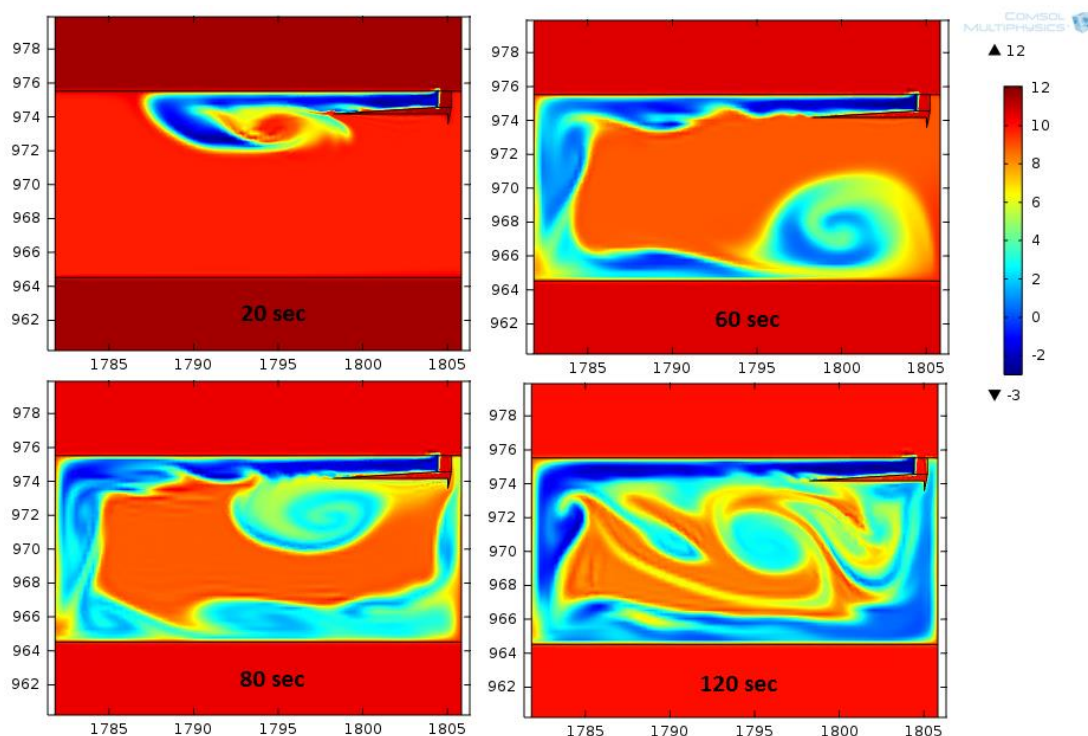


Fig. 5.3- Movimentazione aria fredda in cella

Di conseguenza, il transitorio con cui si modifica la temperatura ambientale, è trascurabile ai fini di questo studio e quindi considerare un valore per la convezione unico ed uniforme sulle superfici.

5.2 Mantenimento

La fase di mantenimento è quella successiva al carico e serve, una volta portata la frutta alla temperatura di conservazione ideale, a far in modo che questa non si deteriori nel tempo. La durata è variabile, ma verrà esaminato un periodo medio di 7 mesi, in accordo con i lunghi periodi di conservazione previsti.

Si parte da delle condizioni iniziali, in cui la roccia è relativamente calda nello strato più superficiale per aver assorbito parte del calore delle mele (ma ancora fredda in profondità), e la frutta è praticamente alla temperatura ideale. Considero una temperatura superficiale della roccia di 3 °C, e 0 °C a 1,1 m di profondità. Tuttavia dopo poco tempo, il quale è trascurabile rispetto al periodo totale, si giungerà ad una condizione di equilibrio che si manterrà stabile fino allo svuotamento della cella. Questo lasso di tempo determinerà una buona fetta dei consumi globali.

L'obiettivo è quantificare i consumi per mantenere almeno (come condizione minima) le temperature costanti e valutare l'eventuale riduzione degli stessi col passare del tempo.

Il profilo di temperatura che si ottiene (in Fig. 5.4 solo la fase iniziale e finale del primo mantenimento) evidenzia come la temperatura si omogeneizzi in poco tempo negli strati più superficiali e ci mette di più ad una profondità superiore. Inoltre l'avanzamento del flusso "freddo" alla fine del primo mantenimento arriva fino a circa

20 m, questo vuol dire che punti vicini mantengono una temperatura costante, mentre quelli più lontani si raffredderanno fino ad una condizione di quasi equilibrio. Tale flusso penetrerà sempre più lentamente e con sempre meno intensità. Il flusso risultante sarà comprensivo sia delle perdite vere e proprie, sia del calore utile sottratto agli strati lontani, che però sarà molto inferiore rispetto al primo visto l'esiguo salto di temperatura. Dopo 20 anni si arriverà a circa 75 m di profondità.

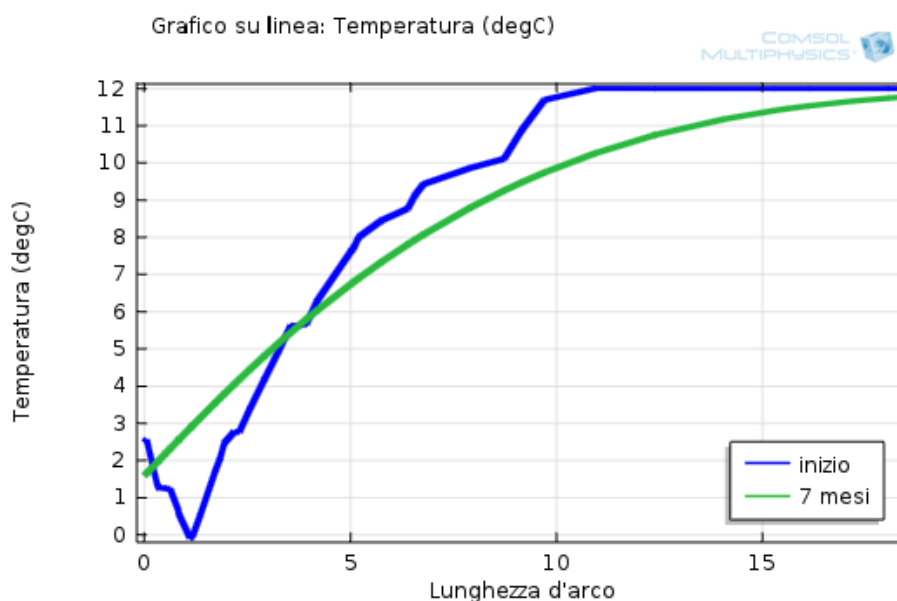


Fig. 5.4- Profili di temperature in mantenimento

Per la valutazione dei consumi, si ricorda, bisogna considerare il calore di respirazione. Dove per ogni cella è quantificato in 16,5 kW. I valori della potenza persa sono distinti in un valore massimo, medio nei 7 mesi e finale dopo 20 anni. I risultati riferiti a valori medi giornalieri sono in Tab. 5.3:

Tabella 5.3- Potenza media giornaliera persa in mantenimento

Valore	P media W/m	P media roccia kW	E persa kWh	P resp. kW	P tot imp. kW	E tot imp. kWh
P media 7 m	1293	31,03	745	16,5	47,56	1141
P max	1364	32,74	786	16,5	49,26	1182
P 20° anno	633	14,19	365	16,5	30,69	737
E tot periodo =		240	MWh/a			

L'andamento del flusso termico nel primo anno di mantenimento è riportato in Fig. 5.5.

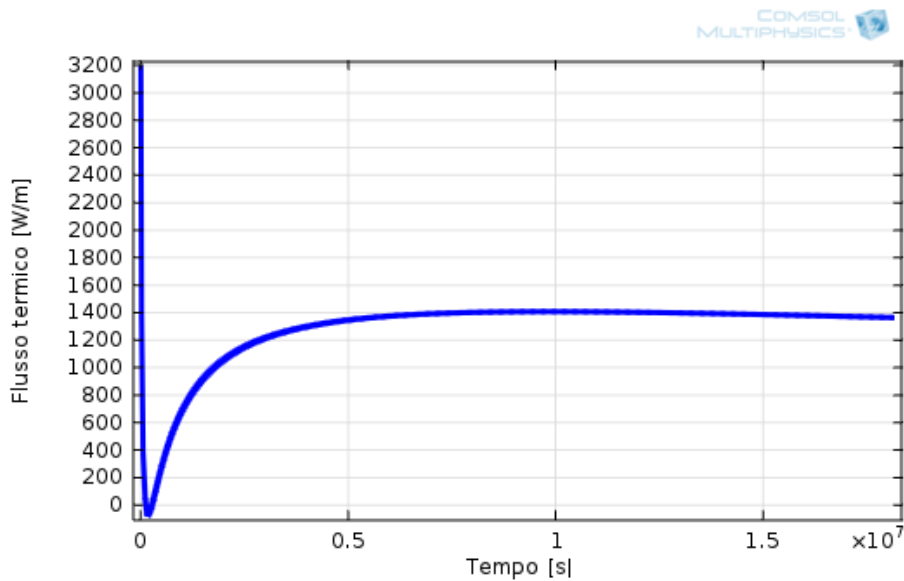


Fig. 5.5- Flusso termico in mantenimento

Inizialmente il flusso è elevato perché si deve riassorbire il calore che la montagna ha assorbito dalle mele. Poi cala fino a diventare nullo per via che aria e roccia superficiale hanno circa la stessa temperatura. Successivamente aumenta nuovamente fino a portarsi a regime assorbendo il calore sempre più in profondità.

Mentre per stabilire l' entità con cui la dispersione di calore nella montagna va estinguendosi, man a mano che la stessa si raffredda è riportata in Fig. 5.6. Nella simulazione relativa a questo grafico si è partiti da delle condizioni iniziali di roccia non pre-raffreddata, quindi la parte iniziale presenterà delle dispersioni notevoli date dal fatto che rappresentano il primo pre-raffreddamento ma a temperatura di mantenimento. Questo ci serve per fare un confronto con le dispersioni riscontrate nella cella sperimentale e per una maggior chiarezza sono esplicitate come potenza specifica per unità di superficie.

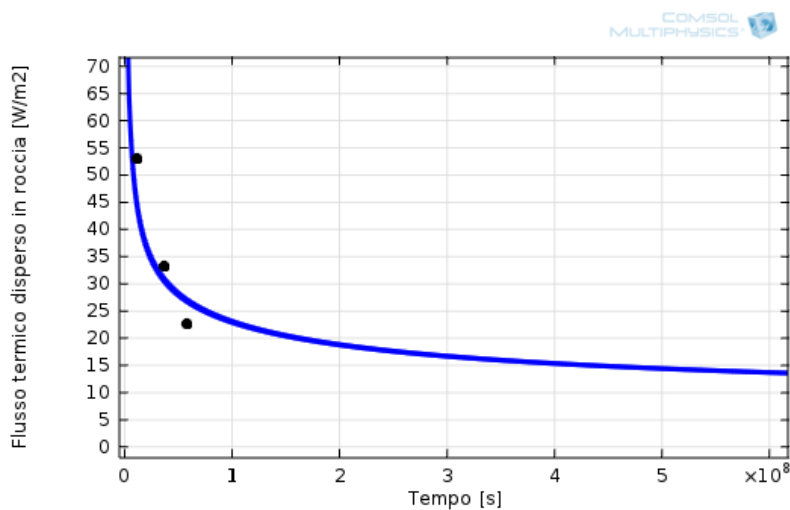


Fig. 5.6- Riduzione delle dispersioni in roccia in 20 anni

Come si può notare le dispersioni nella roccia calano velocemente, per poi mantenersi piuttosto costanti nel lungo periodo. I tre punti neri raffigurati sono i valori medi dei consumi (respirazione esclusa) in mantenimento delle tre prove sperimentali. I primi due coincidono, il terzo è inferiore ma come ricordiamo in quella prova le temperature nella roccia tendevano ad aumentare senza arrivare a regime, il che indica che i consumi dovrebbero essere superiori per mantenere le temperature in roccia costanti.

Quindi inizialmente si ha una potenza persa nella roccia di 31 kW (come constatato nel primo pre-raffreddamento) per poi calare fino ad un valore di 15 kW dopo 20 anni, che è quasi la metà. Questo per quel che riguarda il flusso disperso nella montagna. Rimane il calore da assorbire dalle mele. La potenza di respirazione, in mantenimento, influisce sempre di più sui consumi fino a rappresentare il 50% del carico. L' impianto di refrigerazione dovrà fornire un' energia termica media giornaliera di 1100 kWh, a calare fino a 760 kWh dopo 20 anni.

Si effettua sempre il confronto in Tab. 5.4 sulle energie e potenze specifiche (per la cella sperimentale ci si riferisce alla seconda prova):

Tabella 5.4- Confronto potenze ed energie specifiche

Energia specifica						
	P resp.	E media	Superficie	E/S	Volume	E/V
		kWh	m ²	kWh/m ²	m ³	kWh/m ³
cella sperimentale	no	316	456	0,693	576	0,549
cella spe. Simulaz.	no	258	384	0,672	576	0,448
cella grande	no	745	1085	0,687	3159	0,236
cella sperimentale	si	376	456	0,825	576	0,653
cella spe. Simulaz.	si	318	384	0,828	576	0,552
cella grande	si	1141	1085	1,052	3159	0,361
Potenza specifica						
	P resp.	P media	Superficie	P/S	Volume	P/V
		kW	m ²	kW/m ²	m ³	kW/m ³
cella sperimentale	no	13,17	456	0,0289	576	0,0229
cella spe. Simulaz.	no	10,75	384	0,0280	576	0,0187
cella grande	no	31,04	1085	0,0286	3159	0,0098
cella sperimentale	si	15,67	456	0,0344	576	0,0272
cella spe. Simulaz.	si	13,25	384	0,0345	576	0,0230
cella grande	si	47,54	1085	0,0438	3159	0,0151

Il confronto è stato fatto sia considerando la respirazione della frutta, sia senza. L' energia dispersa nella sola roccia rimane costante indipendentemente dalla grandezza della cella. Mentre se considero il calore emesso dalle mele i consumi dell' impianto per unità di superficie sono maggiori in una celle di dimensioni superiori, questo per i diversi rapporti superficie su volume delle stesse. Ma tale confronto è fuorviante,

meglio riferirsi ai consumi specifici per unità di volume. Essi sono superiori per volumi piccoli, di conseguenza come per il pre-raffreddamento, conviene avere celle grandi. Importante considerare che sia in questo caso, sia nel primo preraffreddamento, il rapporto tra i consumi per unità di volume è circa la metà nella cella grande rispetto a quella sperimentale. Le stesse considerazioni valgono per la potenza specifica.

Terminata la fase di conservazione si eseguirà un nuovo pre-raffreddamento per creare nella roccia le condizioni prestabilite, sulla quale si possono fare svariate considerazioni.

5.3 Ottimizzazione pre-raffreddamento

Nel capitolo precedente si era ipotizzato un periodo di mantenimento medio di sette mesi, il quale prevedeva lo scarico della cella in maggio. Ma le dodici celle non verranno svuotate contemporaneamente. Le mele si preleveranno in un periodo che va dai primi di febbraio alla fine di agosto. Quindi si rende necessario fare una valutazione più approfondita sulla gestione delle stesse. La prima modalità di gestione analizzata prevede di conservare la temperatura di mantenimento (1,2 °C) in cella costante, anche se priva di frutta, ed eventualmente abbassare la temperatura negli ultimi giorni in funzione della data di carico.

Nella seconda opzione ci si è interrogati sulla possibilità di spegnere l' impianto dopo lo svuotamento e valutare quanto in anticipo bisognerà iniziare il pre-raffreddamento già alla temperatura media di -3°C. Delle due verrà scelta solo la modalità più proficua.

Per eseguire una comparazione attendibile è stato scelto un obiettivo comune: ottenere un profilo di temperatura nella roccia uguale a quello che si ottiene dopo il primo pre-raffreddamento in modo da effettuare il carico in condizioni ottimali.

5.3.1 Ottimizzazione con impianto acceso

Questa modalità prevede, una volta scaricata la cella, di far restare l' impianto acceso per mantenere una temperatura dell' aria in cella di 1,2 °C costanti. Il carico sarà quindi inferiore, in quanto non ho più i 16,5 kW emessi dalle mele. Resteranno in ogni caso i 15-30 kW assorbiti dalla roccia a seconda degli anni trascorsi. Questo per mantenere basse le temperature nella roccia e abbassare la temperatura dell' aria in cella a -3°C, per ottenere il profilo desiderato, il più tardi possibile. Se i tempi saranno troppo stretti, in casi straordinari, si valuterà la temperatura adeguata in funzione del tempo (prima era il viceversa). La quale sarà ulteriormente inferiore.

Nella simulazione si andrà a modificare la condizione al contorno che definisce la temperatura dell' aria che raffredda la roccia sempre più vicino al momento di carico finché si arriva al tempo limite. Quello oltre il quale non si riesce più ad ottenere il profilo obiettivo con i -3 °C canonici. Oltre sarà necessario trovare la temperatura propizia. Nei due grafici sotto si vede come cambia il flusso termico scambiato (Fig. 5.7) e la temperatura nella roccia al variare della temperatura dell' aria di raffreddamento (Fig. 5.8). In particolar modo abbassando la stessa gli ultimi venti giorni, che come vedremo, sarà il tempo limite se non ci si vuole abbassare sotto i -3 °C. L' arco di tempo simulato sono gli ultimi tre mesi.

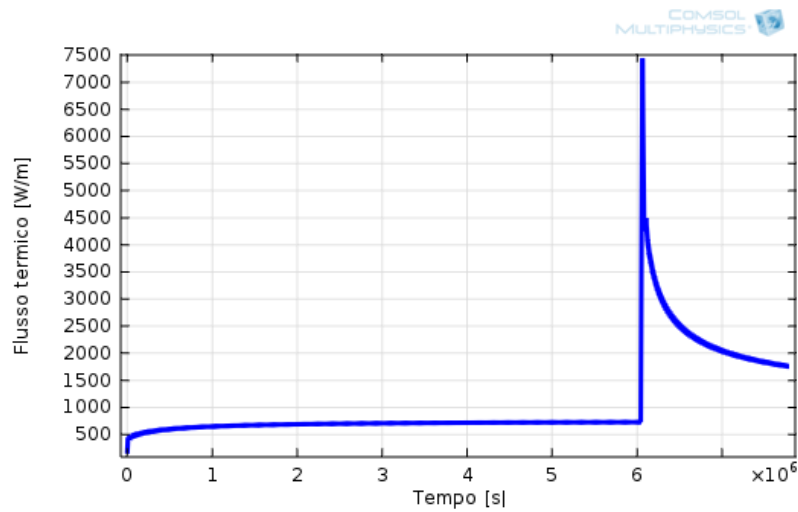


Fig. 5.7- Flusso termico inizio pre-raffrescamento

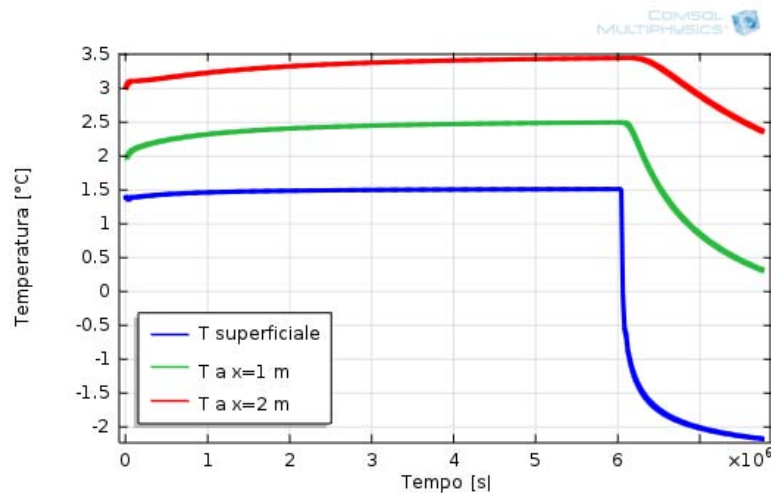


Fig. 5.8- Temperature roccia inizio pre-raffrescamento

Dal grafico del flusso termico scambiato si nota che inizialmente la potenza media persa è di circa 17 kW, come quella che si ottiene dopo circa vent'anni di raffreddamento perché facendo partire la simulazione da una condizione di equilibrio termico della roccia non ho inerzia nella stessa. E' inoltre un po' inferiore, tale flusso, ma di fatti le temperature nel secondo grafico aumentano leggermente. Mentre nel momento in cui abbasso la temperatura dell'aria si nota un repentino aumento di scambio termico, con altrettanto rapido abbassamento della temperatura nella roccia. In questa fase la potenza media assorbita dalla montagna è di 56 kW, in accordo con i valori trovati fin' ora. Si ricorda che la potenza persa a tale temperatura nel primo pre-raffreddamento era di 50 kW, i 6 kW che avanzano sono relativi al calore stesso della roccia. Le sonde di temperatura rilevano i valori: superficialmente, a 1 m e a 2 m di profondità; oltre non si monitorizzano in quanto nel carico non

vengono interessate. Di seguito verrà riportato il profilo di temperatura nella roccia: nell'istante iniziale, al giorno in cui si varia la condizione al contorno del dominio e quella finale del periodo (Fig. 5.9 e Fig. 5.10).

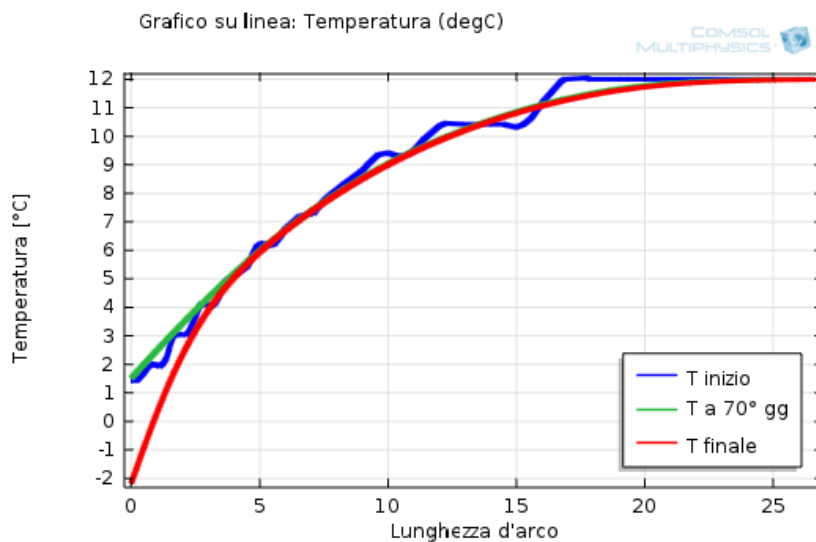


Fig. 5.9- Profilo di temperatura ottimizzazione pre-raffrescamento

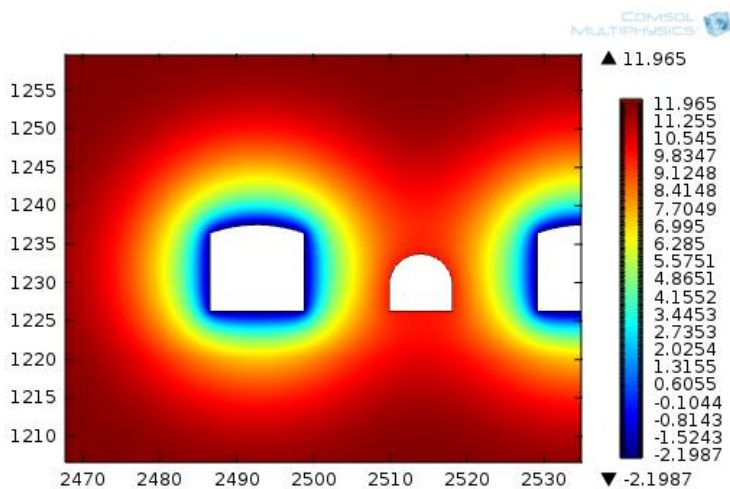


Fig. 5.10- Temperatura sezione delle celle fine pre-raffreddamento

Per comprendere appieno il fenomeno sono stati fatti numerosi tentativi. Di seguito verrà riportata una tabella riassuntiva (Tab. 5.5) contenente quelli più importanti (quella completa si trova in appendice D).

Tabella 5.5- Temperature di pre-raffreddamento in funzione del tempo

Pre-raffr. gg	T pre-raffr. °C	T sup °C	T a x=1 °C	T a x=2 °C	P media W/m	P media tot kW
T obiettivo		-2,18	0,335	2,7		
20	-3	-2,18	0,31	2,36	2324	55,78
15	-3,5	-2,52	0,34	2,55	2753	66,07
10	-4	-2,83	0,50	2,77	3267	78,41
5	-5	-3,27	1,15	2,28	4603	110,47

Nella prima colonna sono riportati i giorni prima del carico cui si rende necessario abbassare la temperatura dell' aria. La prima riga contiene le temperature obiettivo, per un miglior confronto. Fino a circa 15 giorni prima del riempimento della cella frigo riesco ad ottenere il profilo desiderato, in quanto in questo lasso di tempo assorbo calore in profondità nella roccia fino a circa 3 m, senza abbassare troppo la temperatura di raffreddamento. Se ho a disposizione meno di una decina di giorni non si ha il tempo materiale per abbassare la temperatura fino alla profondità desiderata senza far scendere eccessivamente la stessa sulla superficie. Ma nonostante questo il freddo stoccato ad un' esigua profondità può fornire al carico un' energia paragonabile a quella che si avrebbe col profilo obiettivo. Dove non si riescono ad ottenere le temperature volute si verifica mediante simulazione dedicata se si riesce ad ottenere comunque l' energia desiderata (Cap. 5.4.2.2). A livello teorico sarebbe anche meglio raffreddare gli ultimi giorni ad una temperatura molto bassa in modo da concentrare tutto il freddo entro la profondità utile ed avere anche meno perdite, ma si avrebbero in gioco potenze troppo elevate e l' impianto frigo dovrebbe essere predisposto al raggiungimento delle stesse. Inoltre si deve sempre tener conto che il flusso si divide sempre tra cella e montagna quando ho il punto di minor temperatura ad una certa profondità, quindi se ho una fascia di roccia intorno alla galleria stretta essa dovrà essere molto fredda.

Per una maggior chiarezza si riporta un grafico in cui si evidenzia come aumenta la potenza media all' abbassarsi della temperatura dell' aria desiderata (Fig. 5.11).

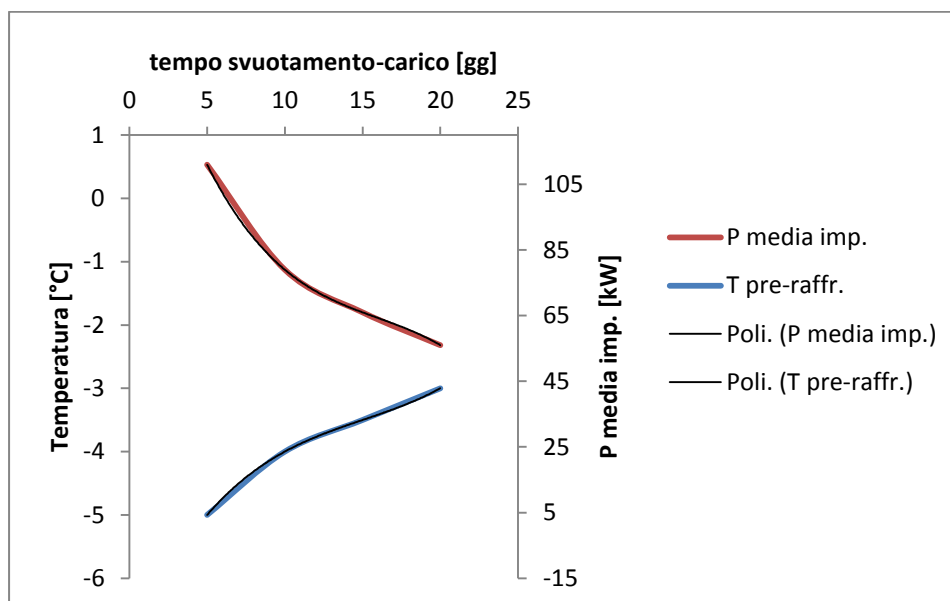


Fig. 5.11- Temperatura e potenza in funzione del tempo tra svuotamento e carico

Si vede come sarebbe meglio svuotare le celle entro 20 giorni dal carico successivo in modo che fino a tale data si mantengano gli 1,2°C in ogni caso, poi si abbassi a -3°C, per evitare di dover impiegare un' elevata potenza o avere temperature che potrebbero compromettere la conservazione.

5.3.2 Ottimizzazione con impianto spento

Visti i consumi elevati nel mantenere costante la temperatura in cella, anche se vuota, verrà verificata la convenienza nello spegnere l' impianto frigorifero subito dopo lo scarico. Di conseguenza si determinerà il tempo necessario per ripristinare il profilo di temperature obiettivo, ma questa volta considerando solo i -3°C. Risulterà determinante il tempo che ci metterà la montagna a tornare nella condizione di equilibrio originaria. In quest' applicazione la geotermia è un fenomeno negativo, contrariamente alle applicazioni convenzionali. Ma il flusso proveniente dal centro della terra approssimato a 90 mW/m² e le levate distanze a cui si deve trasmettere in questo tipo di roccia potrebbero consentire di fermare l' impianto frigo anche per 7 mesi senza dover riiniziare da capo il ciclo di raffreddamento.

Per svolgere la simulazione, inizialmente, non si dà al contorno interno della galleria una condizione al contorno, in modo che vi sia un andamento naturale del calore nella roccia. Successivamente, si è andati a modificare l' istante in cui si stabilisce la temperatura sul profilo della cella per tempi sempre inferiori fino ad ottenere il profilo obiettivo. Questo per l' arco di tempo in cui le celle verranno scaricate.

Prendiamo in esempio il caso in cui la cella in questione venga scaricata a inizio marzo. Quindi dal carico successivo ho un tempo di 180 giorni da gestire al meglio per risparmiare la maggior energia possibile e al tempo stesso creare le condizioni stabilite per l' immagazzinamento successivo. Per tentativi si trova che bisognerà riaccendere l' impianto almeno 43 giorni prima, in quella cella. Sono circa il doppio rispetto a prima, ma ho ben 137 giorni in cui posso tenere l' impianto spento. Questo

grazie al lento aumento delle temperature nella roccia e quindi superficialmente in cella. In figura sotto (Fig. 5.12) si riporta l'andamento di temperatura delle tre sonde poste rispettivamente sulla superficie, a 1 m e 2 m di profondità in una cella che resta vuota per 6 mesi:

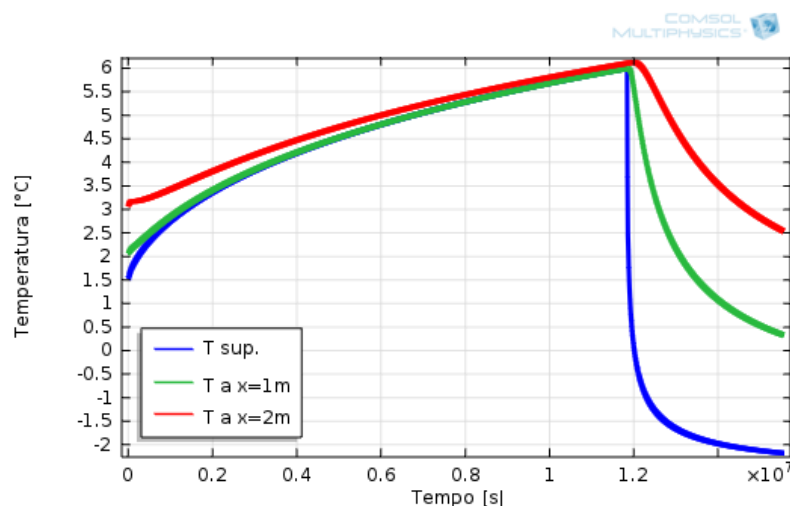


Fig. 5.12- Temperature in roccia spegnendo ed accendendo l' impianto

Come si vede il riscaldamento “naturale” è molto più lento del raffreddamento, questo è fondamentale per rendere favorevole questo approccio di gestione dell' impianto. Per comprendere meglio l' andamento del profilo di temperatura si riporta lo stesso per ognuno dei sei mesi simulati (Fig. 5.13).

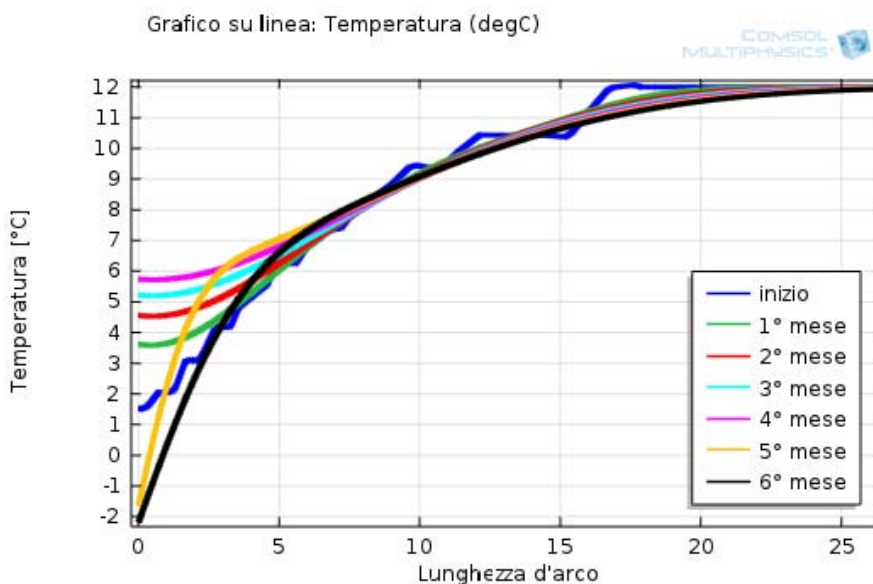


Fig. 5.13- Profili di temperature dallo spegnimento al carico

Il primo mese la temperatura superficiale aumenta di 2 °C, il secondo di 1 °C e poi via via sempre meno man mano il profilo si omogeneizza. E diminuisce anche col passare degli anni, all' aumentare degli strati di roccia fredda che si troveranno più in profondità. Quando raffreddo, in modo analogo, il calore della superficie lo assorbo

velocemente essendo direttamente a ridosso della cella e poi man mano che aumenta la profondità sempre meno.

Di seguito (Tab. 5.6) sono riportati i valori più significativi ottenuti dalle simulazioni (per la tabella completa vedi appendice E):

Tabella 5.6- Valori caratteristici ottimizzazione impianto

mese svuotamento	funz. P=0 gg	funz. P preraffr. gg	P media W/m	P media tot kW	E risparmiata MWh/cella
	210 gg (7mesi)				
febbraio	164	46	2688	64,51	102
marzo	137	43	2815	67,56	80
aprile	110	40	2750	66,00	63
maggio	83	37	2721	65,30	46
giugno	58	32	2686	64,46	31
luglio	32	28	2540	60,96	17
agosto	9	21	2417	58,01	5

Se la cella viene svuotata tardi non si hanno molte differenze rispetto all' altro metodo, difatti come giorni e potenza media sono circa uguali. Il grande vantaggio lo si ha quando si svuota presto la cella perché i tempi in cui si deve abbassare la temperatura si raddoppiano ma il tempo che posso tenere l' impianto spento sono di gran lunga superiori. La potenza media è circa di 64 kW, praticamente uguale per ogni mese. E' un valore intermedio tra la potenza necessaria nel primo pre-raffreddamento e quella prevista nel metodo precedente. Però in quanto a energia risparmiata si hanno grandi vantaggi, visibile nell' ultima colonna della tabella. Questa è stata valutata come la differenza di quella che si avrebbe con la metodologia prevista nel paragrafo precedente e questa. Non vi son dubbi sul fatto che questo metodo è più redditizio, per evidenziare il fatto si fa un grafico di confronto, sempre relativo al mese di marzo (Fig. 5.14). Sull' asse delle ordinate si trova la potenza, sulle ascisse il tempo e l' area sottesa rappresenta l' energia consumata.

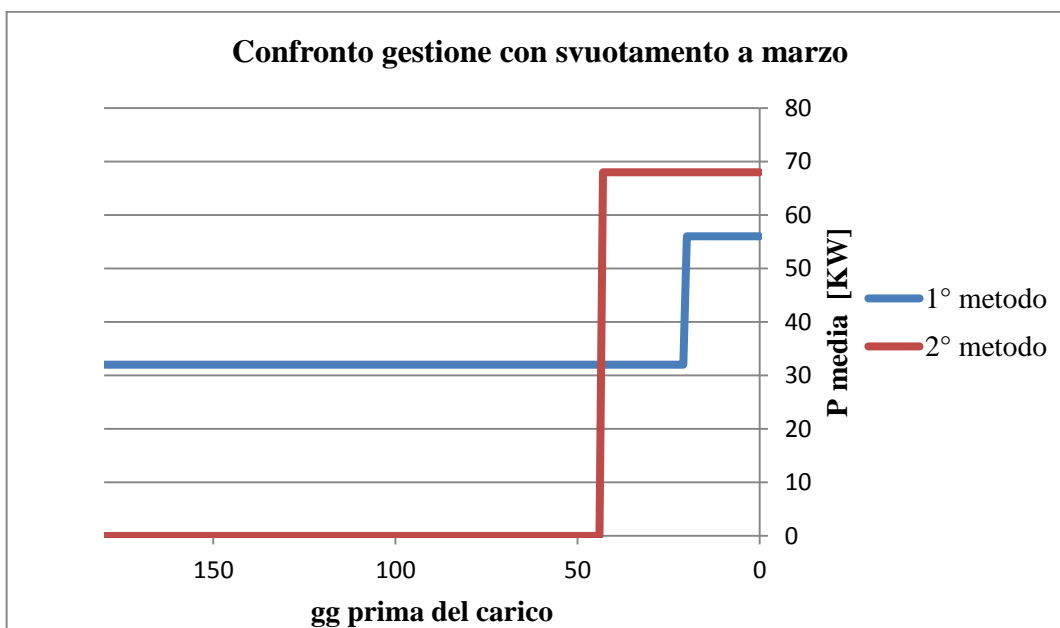


Fig. 5.14- Confronto energia consumata nelle due gestioni

Si è fatto anche un grafico (Fig. 5.15) in cui secondo il mese di svuotamento si può ricavare, per ogni cella, i giorni di preraffreddamento necessari e l' energia termica che si andrà a risparmiare.

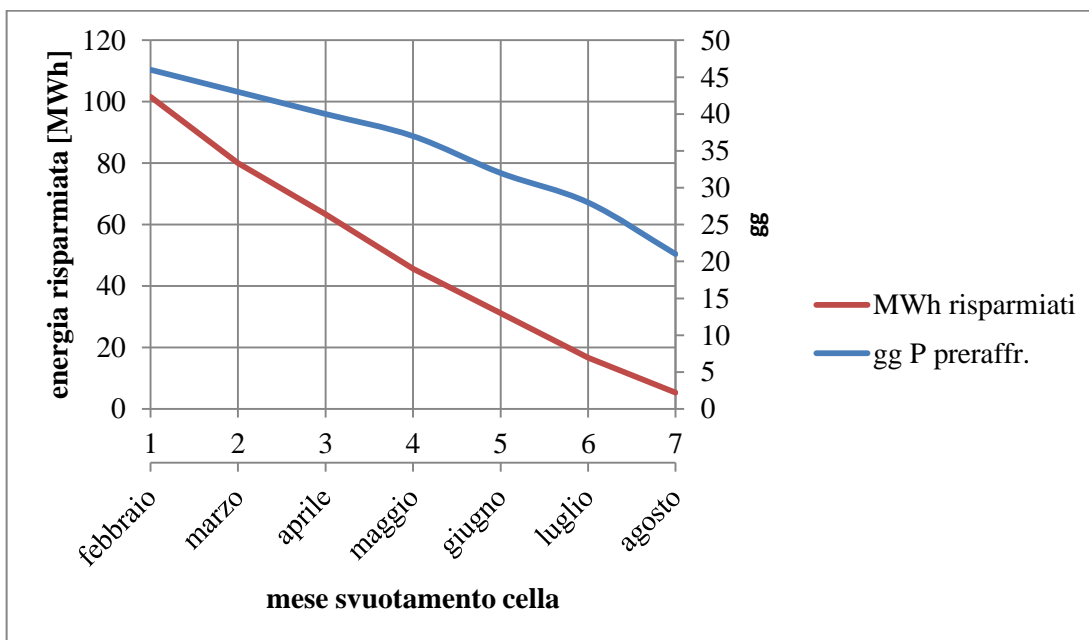


Fig. 5.15- Relazione energia risparmiata e giorni di pre-raffreddamento

Inoltre utilizzando sempre questo tipo di gestione dell' impianto si è andati a stabilire quale sia la riduzione del calore da asportare nel tempo. Ovvero poiché nel corso degli anni la roccia che si raffredda attorno alle gallerie diventa sempre maggiore, quando si va a spegnere l' impianto di refrigerazione, si ha man mano che la

superficie della cella si riscalda meno. Quindi è possibile avvicinarsi sempre più alla condizione ideale per cui la temperatura in sostanza non aumenta, e mi riporto alla condizione vista nel primo caso di pre-raffreddamento, mantenere la cella in condizioni di mantenimento ma senza il contributo dell' impianto. Potendo così raffreddare solo gli ultimi venti giorni. La riduzione dei consumi media per le due gallerie nel corso degli anni è rappresentata in Fig. 5.16. In cui si riporta anche il valore di minimo teorico in cui raffreddo nei venti giorni prima del carico tutte le celle impegnando solo i 56 kW_t trovati prima.

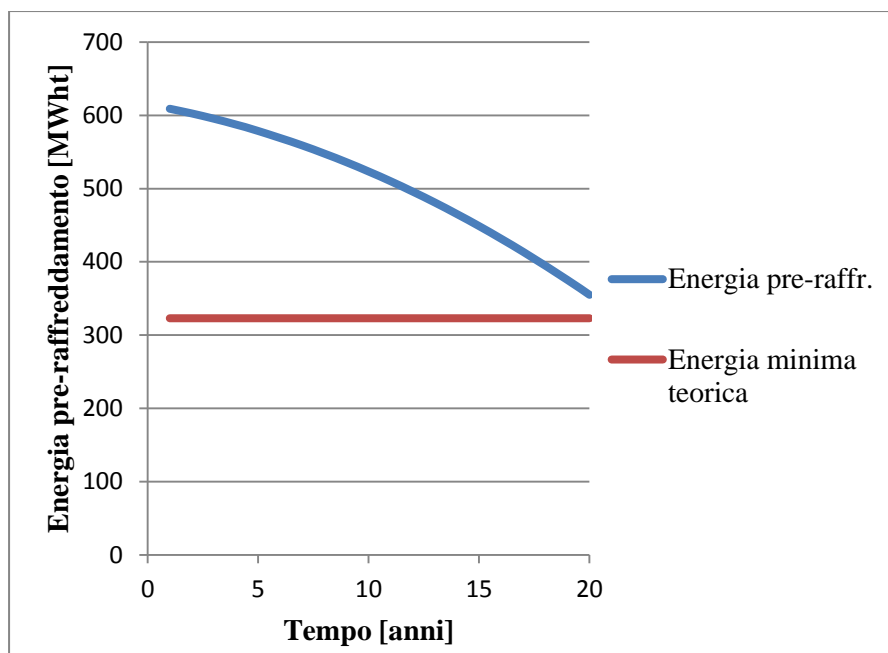


Fig. 5.16- Andamento dell' energia per il pre-raffreddamento negli anni

Si vede come la curva abbia un andamento quasi semi-parabolico e si raggiunga dopo i 20 anni quasi la condizione di minimo oltre la quale non si riuscirebbe più a ripristinare il profilo obiettivo di temperatura.

5.4 Carico cella frigoconservazione

Questo è il paragrafo principale del lavoro svolto. Dove si analizza la quantità di "freddo" che la roccia cede alle mele e le tempistiche di raffreddamento delle stesse. Il modo con il quale la frutta viene inserita nelle celle è stata scelta più per questioni pratiche che altro. Si procederà nel riempire tre celle per volta, suddividendo l' apporto giornaliero in modo equo tra le stesse. Nel tempo di tre giorni ogni cella è piena, ovvero si riempie per un terzo al giorno. Quindi le mele iniziano già a raffreddarsi nel frattempo, per poi chiudere le porte e creare l' atmosfera controllata. Simulare questo procedimento mediante software non è possibile, per diversi limiti tecnici e pratici. Primo fra tutto perché non è possibile inserire nel modello dei domini a simulazione iniziata, neppure se fatta in 3D. La rappresentazione stessa dei cassoni con le mele deve essere sintetizzata da un dominio unico equivalente, a meno che non venga fatta a parte, perché la scala delle dimensioni non può essere troppo diversa. La presenza di un flusso d' aria turbolento, tra mele e montagna, aumenta

notevolmente il numero di variabili da risolvere e iterazioni da eseguire, dilungando eccessivamente i tempi di risoluzione. Per questi ed altri motivi sono state fatte simulazioni semplificate, ma non per questo meno precise.

5.4.1 Valutazioni su cassoni e mele

Per prima cosa è stato fatto uno studio, su piccola scala, del comportamento dei cassoni. Questo è stato necessario perché non è possibile associare al dominio relativo alle mele direttamente i valori caratteristici di densità, calore specifico e conducibilità termica delle stesse. L'ammassare di frutta, che nel nostro caso ipotizziamo sferica, comporta avere dei piccoli spazi di aria che in volume percentuale non possono essere trascurati. Soprattutto dal punto di vista dello scambio termico, in quanto a livello globale l'aria stipata in piccoli spazi fa da isolante e lo scambio tra materiale "conduttore" di calore avviene su una piccola superficie. Il cassone si raffredderà quindi più lentamente che se si fosse ipotizzato un materiale omogeneo, e pure l'energia da asportare cambierà.

Si procede col trovare densità e calore specifico equivalenti, da attribuire ai domini della simulazione, per equivalere l'energia termica che si trova nella sezione profonda 1 m nella realtà, la stessa considerata dal programma di calcolo. I bins per sezione sono 130, con i dati in Tab. 5.7 e tramite la (4.2) si trova che per ogni sezione si dovrà sottrarre 960 kWh/m. Per la simulazione, dove ho 103,4 m³ di sezione (in 2D considera 1 m di profondità), ho che le condizioni più simili si verificano impostando come densità 575 kg/m³ e come calore specifico 2500 J/kg*K. Con questi valori avrò 991 kWh/m, approssimando in eccesso.

Tabella 5.7- Dati caratteristici mele e cassoni

	bins	mele	
massa	33	330	kg
cp	1200	3640	J/kg*K
T in	25	25	°C
T fine	1	1	°C
ρ	900	839	kg/m ³
k	0,2	0,513	W/m*K

In seguito si passa a definire, il più critico, coefficiente di conduzione termico. Per determinarlo si disegna una sezione di cassone raffigurando le singole mele, e si fa in modo che la sua rappresentazione equivalente (che sarà un semplice rettangolo) abbia al termine di un raffreddamento, le stesse temperature a parità di distanza dal bordo. Ipotizzando di associare una mela ad una sfera di 7 cm di diametro con una massa di 0,14 kg, si trova che il 44% in volume di ogni cassone è costituito da aria, le mele su una qualsiasi sezione sono circa 111 ed il volume delle mele se le compattassimo sarebbe di 0,42 m³.

Questa simulazione, oltre che per stabilire la conducibilità termica, ci permette di studiare il comportamento del cassone in modo dettagliato.

Per la creazione del modello si procede come spiegato precedentemente e definendo le stesse condizioni al contorno. Si rappresenta sulla destra il cassone con le mele e definendo negli spazi vuoti l'aria. Sulla sinistra il dominio con le caratteristiche equivalenti per verificare che le due parti si comportino in modo uguale. Come condizioni al contorno si sceglie sempre "Raffreddamento per convezione" sulla parte superiore e inferiore, ma invece di impostare direttamente il coefficiente di trasporto termico si sceglie "Convezione forzata esterna" in cui si può definire la lunghezza della piastra e la velocità del fluido (nota e pari a 1 m/s). Successivamente per tentativi è stato trovato che la conducibilità termica opportuna è 0,27 W/m*K. Di seguito si vede come (Fig. 5.17), con i valori sopra stabiliti, i livelli isoterme siano comparabili:

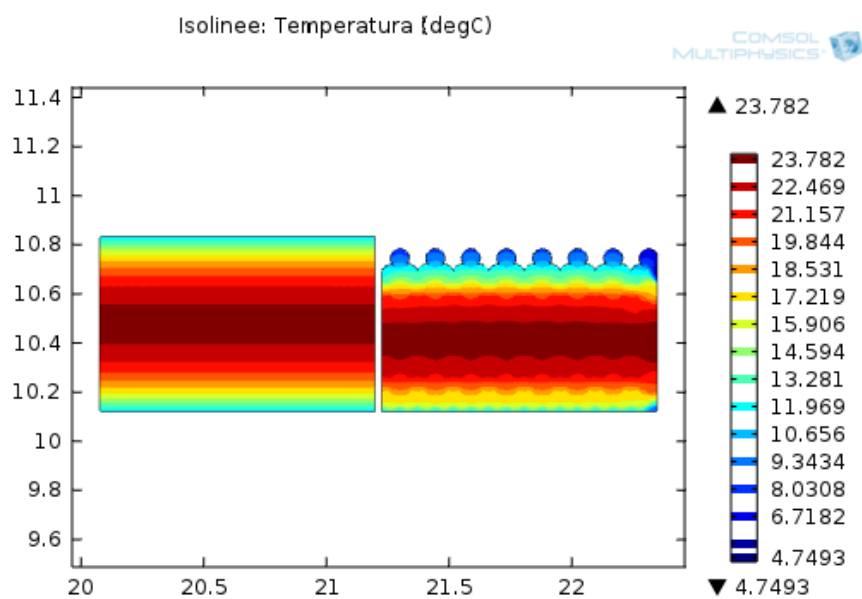


Fig. 5.17- Superfici isoterme nei cassoni

La parte superiore, dove le mele sono a contatto direttamente con l'aria, si raffredda di più di quella inferiore, questo grazie alla maggior superficie dissipante creata dalle stesse. Ma nonostante questo la fascia centrale più calda e quelle adiacenti oltre ad avere le stesse temperature hanno lo stesso spessore. Si mostrano anche due particolari della sezione (Fig. 5.18 e Fig. 5.19):

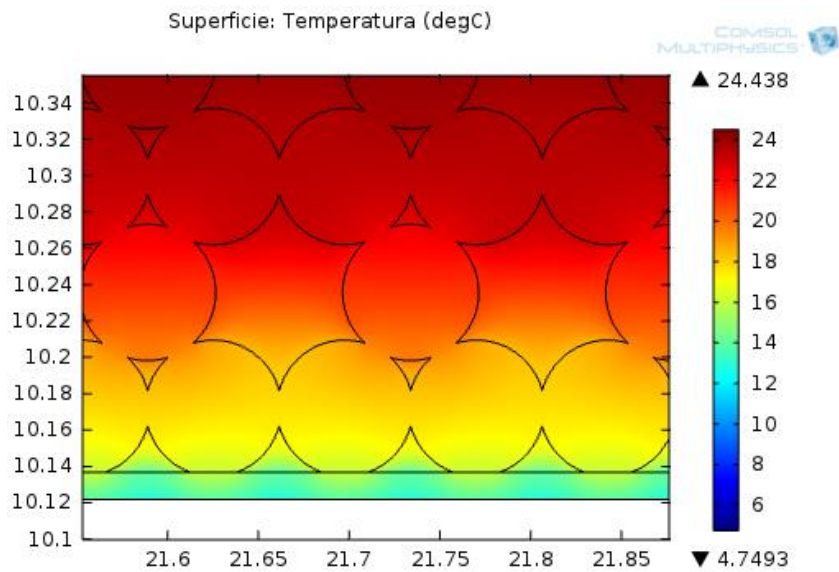


Fig. 5.18- Sezione del cassone

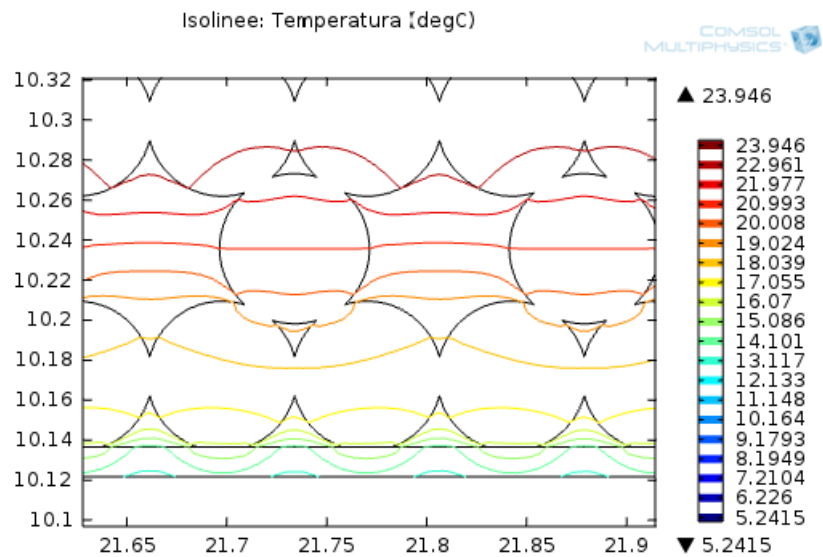


Fig. 5.19- Linee isoterme interne al cassone

Se si fosse considerato il materiale omogeneo, l' approssimazione effettuata sarebbe stata grossolana. Così facendo è stato possibile ridurre il numero delle variabili da risolvere senza compromettere i risultati. Si nota inoltre che la temperatura di raffreddamento è circa di 11 °C nel centro dell' intercapedine formata dai cassoni, valore plausibile come vedremo in seguito.

Quindi d' ora in poi i dati equivalenti da dare al dominio "mele" quando si faranno le simulazioni per quantificare il "freddo" restituito dalla roccia, sono quelle in Tab. 5.8:

Tabella 5.8- Valori caratteristici equivalenti dominio mele

densità	575	kg/m ³
calore specifico	2500	J/kg*K
conducibilità termica	0,27	W/m*K

Per analizzare il comportamento del cassone si pongono delle sonde di temperatura sull'asse verticale e sonde che misurano il flusso termico sulla parte superiore e inferiore. Ovvero dove si ha il passaggio d'aria, l'intercapedine orizzontale tra i bins impilati. Di fronte e dietro al cassone anche se vi fosse aria si considera ininfluyente.

Sono state fatte varie simulazioni al variare della temperatura delle mele inserite. Il tempo simulato è di 4 giorni ed i valori ottenuti sono relativi a: temperatura massima al centro del cassone, tempo per avere una temperatura interna di 0,8 °C (allungando il tempo della simulazione), energia assorbita dal cassone, percentuale energia assorbita rispetto a quella totale (senza calore di respirazione), potenza media e percentuale di temperatura massima interna rispetto a quella iniziale. Il tutto riassunto in Tab. 5.9:

Tabella 5.9- Risultati simulazione raffreddamento mele

T mele	T max int.	t x T=0,8	E ceduta	E c/E tot	P media	T max/T iniz
°C	°C	gg	kWh	%	W	%
25	14,2	19	7,024	85	73	56
20	11,3	18	5,640	86	59	55
15	8,36	17	4,256	88	44	54
10	5,67	16	2,783	90	29	54
5	2,97	12	1,311	94	14	55
3	1,89	7	0,685	99	7	56

Dalle simulazioni si può vedere come superficialmente le temperature si abbassino velocemente, mentre il centro del cassone tende a rimanere caldo e a raffreddarsi molto lentamente. I tempi per avere il completo raffreddamento del cassone sono abbastanza lunghi. Si pensi che nella cella sperimentale durante la terza prova le mele inserite a circa 3 °C e poste sulla parte superiore del cassone raggiungono gli 0,8 °C in 1 giorno e mezzo. Di conseguenza anche la percentuale di energia assorbita è inferiore con le mele più calde, mentre il rapporto percentuale tra la temperatura massima e iniziale rimane circa costante. Al centro di ogni bins riesco circa a dimezzare la temperatura in 4 giorni. In ogni caso è inferiore, seppur di poco, al tempo che ci mettono le mele a raffreddarsi completamente in magazzini fuori terra. Quasi totalmente in 1 settimana e completamente in 20 giorni [20]. Quindi a livello complessivo la potenza media asportata per convezione nei primi quattro giorni è di 180 kW. Questo è anche il valore che verrà usato per il dimensionamento dei gruppi frigo. Se prendessi un valore medio su un arco temporale più lungo risulterebbe inferiore in quanto man mano che raffreddo il cassone ho sempre meno flusso

termico. Inoltre nel processo di raffreddamento la potenza dell' impianto non è direttamente proporzionale ai tempi di abbattimento della temperatura. Primo perché non posso abbassare la stessa più di tanto pena il congelamento della frutta e secondo perché se il rilascio di calore da parte delle mele è lento si riesce a mantenere bassa la temperatura dell' aria anche con potenze modeste. Inoltre il flusso termico verso l' esterno diminuisce di intensità man mano che il cassone si raffredda, e di conseguenza influenza la velocità di raffreddamento, per via che la differenza di temperatura è sempre più esigua. Quindi credere di poter raffreddare completamente le mele nel giro di un giorno, qual' era l' obiettivo previsto, con questa metodologia non è possibile. In ogni caso a parità di gruppo frigo installato si hanno dei tempi di raffreddamento inferiori rispetto ad una pari cella frigorifera fuori terra, quindi da questo punto di vista è comunque una metodologia migliore.

5.4.2 Valutazione complessiva del sistema durante il carico

5.4.2.1 Energia termica restituita dalla roccia

Una volta studiato nello specifico il comportamento dei cassoni contenenti le mele si passa all' analisi complessiva dell' iterazione tra la roccia e la frutta.

Durante il carico l' impianto di refrigerazione non è in funzione, quindi le mele vengono inserite in un ambiente freddo, dove si sfrutterà l' elevata inerzia termica della roccia, già raffreddata precedentemente, per abbassare la temperatura delle stesse. Maggiore sarà il calore assorbito dalla montagna attorno alla cella e minori saranno i consumi elettrici dell' impianto frigorifero e i tempi di raffreddamento.

Dal momento che nella letteratura non sono presenti informazioni a riguardo si procede con cautela, delimitando in modo anche analitico i limiti fisici di queste iterazioni, per poi andare a determinare dei valori precisi.

Si ipotizza come condizione critica di avere frutta a 25 °C e in alcuni casi per una maggiore casistica anche a 15 °C. La quantità di mele considerata è quella che sarà presente al termine della giornata di carico. Le caratteristiche dell' aria considerate sono una densità di 1,225 kg/m³ e un calore specifico di 1030 J/kg*K.

Per prima cosa si va a stabilire, in modo analitico, quale potrebbe essere il contributo dell' aria e della roccia nel momento in cui inizio il riempimento della cella. Questa con un volume d' aria di 3100 m³ ad una temperatura di -3 °C, viene occupata giornalmente da 270000 kg di mele a 25 °C. Usando la relazione (5.1) secondo cui si trova la temperatura di equilibrio termico [13], derivata dall' uguaglianza dell' energia tra i due corpi, ottengo l' equilibrio a 24,89 °C. Praticamente l' aria non contribuisce al raffreddamento della frutta.

$$T_{eq} = \frac{M_1 c_{p1} T_1 + M_2 c_{p2} T_2}{M_1 c_{p1} + M_2 c_{p2}} \quad (5.1)$$

Dove:

T_{eq} [K] = temperatura di equilibrio

M_1 [kg] = massa corpo 1

M_2 [kg] = massa corpo 2

C_{p1} [J/kg*K] = calore specifico corpo 1

C_{p2} [J/kg*K] = calore specifico corpo 2

T_1 [K] = temperatura corpo 1

T_2 [K] = temperatura corpo 2

Per quantificare il contributo della roccia si determina l' equilibrio sia dopo un giorno, sia a cella piena. Rispettivamente si ipotizza di sfruttare 1 m e 1,25 m di spessore di roccia attorno alla cella. In questo caso la massa di roccia è molto superiore a quella della frutta, viceversa per il calore specifico. Le temperature risultanti sono di 6,04 °C e 11,26 °C (nel secondo caso ho una quantità di mele superiore). Quindi indipendentemente dal tempo a disposizione, se interessiamo solo un "piccolo" strato di roccia non è possibile avere il completo raffreddamento delle mele.

C'è da considerare anche che l' energia complessiva da assorbire (compresa quella dei cassoni ma senza il calore di respirazione) è di 20,3 MWh a cella, la quale non è poca. Si ricordi che nella cella sperimentale, grazie alla massa e temperatura inferiore, il calore da assorbire era di 1,5 MWh nella seconda prova e 250 kWh nella terza. Entrambe fornite dall' impianto di refrigerazione.

Realizzare il modello in 2D della sezione trasversale, per mantenere continuità con quelli fatti precedentemente, comporta avere un fluido in movimento tra i due domini solidi. Questo complica, come già detto, la simulazione. Quindi per mantenere dei tempi di risoluzione ragionevoli è stato scelto di considerare l' aria come un solido, ma si rende necessario alterarne le caratteristiche. Ovvero si compensa il fatto di non aver più dei moti naturali d' aria internamente alla cella, che con i ventilatori spenti si tratterebbe solo di convezione naturale, con l' aumento in modo opportuno della conducibilità termica della stessa. Si analizza quindi una condizione statica. Per fare ciò si utilizza sempre lo stesso modello usato precedentemente, ovvero quello in cui la cella è un dominio vuoto, in modo da poter impostare una condizione al contorno sulla superficie interna. E' stato utilizzato sempre il "*Raffreddamento per convezione*" in modo da stabilire quali siano le caratteristiche principali da usare nella comparazione. Quindi è stata impostata una "*temperatura dell' aria*" interna di 11,26 °C (pari a quella di equilibrio teorica) e un "*coefficiente di trasporto termico*" di 8,55 W/m²*K. Il tempo simulato è quello dei tre giorni di carico. I parametri di riferimento considerati sono: profondità utile, differenza di temperatura superficiale, differenza di temperatura alla profondità utile e energia frigorifera rilasciata dalla roccia. Inoltre si è andati anche a variare il "*coefficiente di trasporto termico*" per valutare l' attendibilità e quanto influisce il valore fornitoci dalla Tassullo Materiali.

La profondità utile è un parametro definito appositamente per tale studio e sta ad indicare la profondità nella roccia, partendo dalla superficie della cella, alla quale si trova la temperatura minima sul profilo di temperatura. Ovvero definisce lo strato di roccia dal quale si riesce a recuperare energia, quello per cui il flusso avanza verso la cella. Perché oltre tale valore, il flusso va verso la montagna. Non si deve confondere con la profondità massima alla quale si ha uno scostamento di temperatura dal profilo iniziale, che è superiore. Il tutto è esplicitato in Fig. 5.20, dove la linea blu rappresenta il profilo di temperatura iniziale e quella verde il profilo finale dopo 3 giorni :

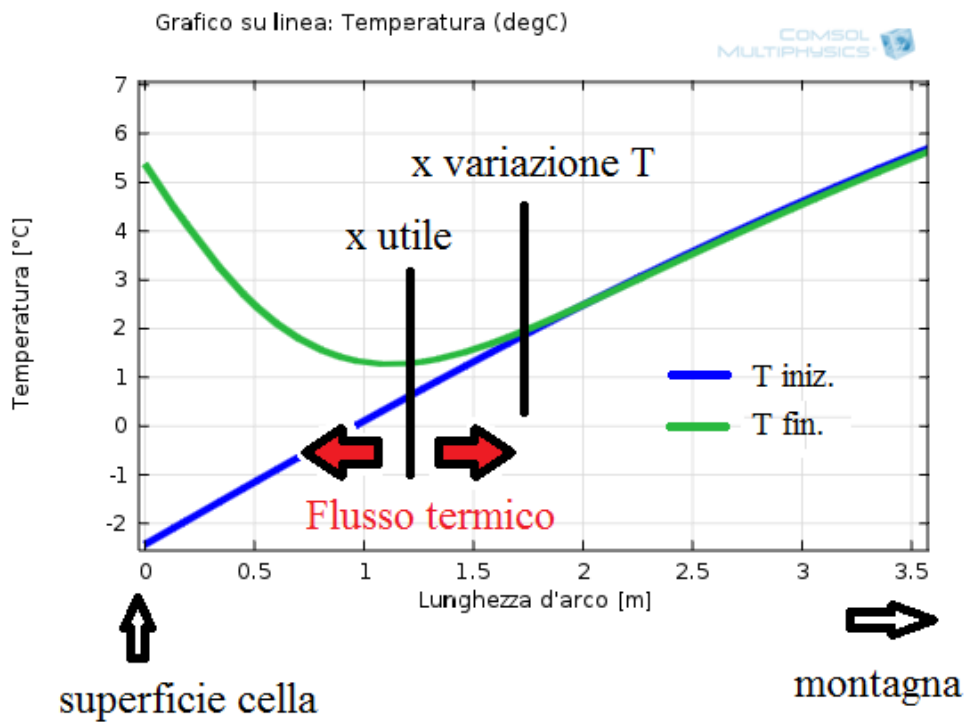


Fig. 5.20- Illustrazione profondità utile

Si riporta anche un grafico (Fig. 5.21) in cui si vede come si modifica il profilo di temperatura nel tempo. In prossimità della superficie la temperatura aumenta velocemente in un primo momento, per poi rallentare in prossimità della temperatura massima superficiale, funzione di quella dell'aria in cella. Più in profondità aumenta sempre meno. In blu è rappresentato il profilo iniziale, in verde, rosso e azzurro quello rispettivamente dopo il primo, secondo e terzo giorno.

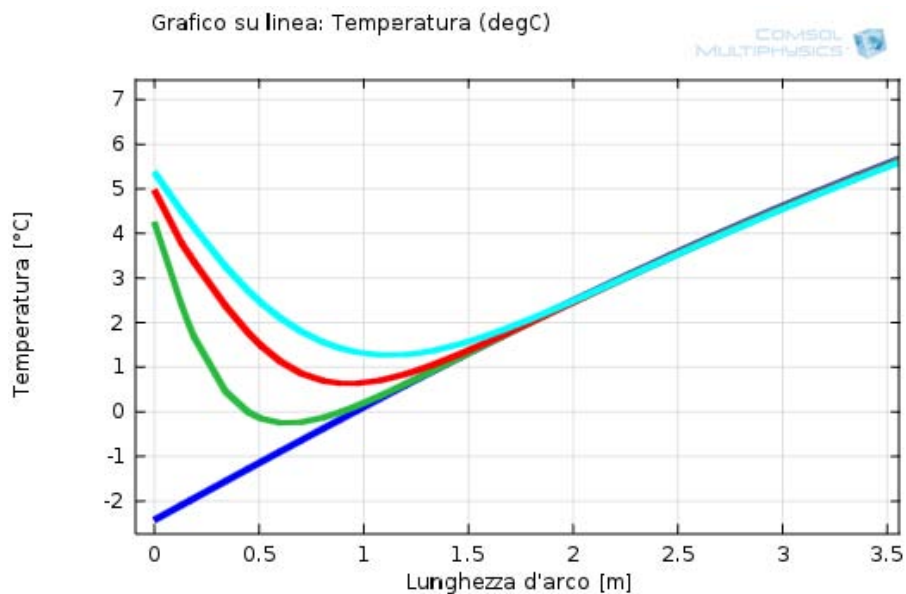


Fig. 5.21- Andamento del profilo di temperatura nei tre giorni

Il profilo completo dei grafici precedenti si rappresenta in Fig. 5.22.

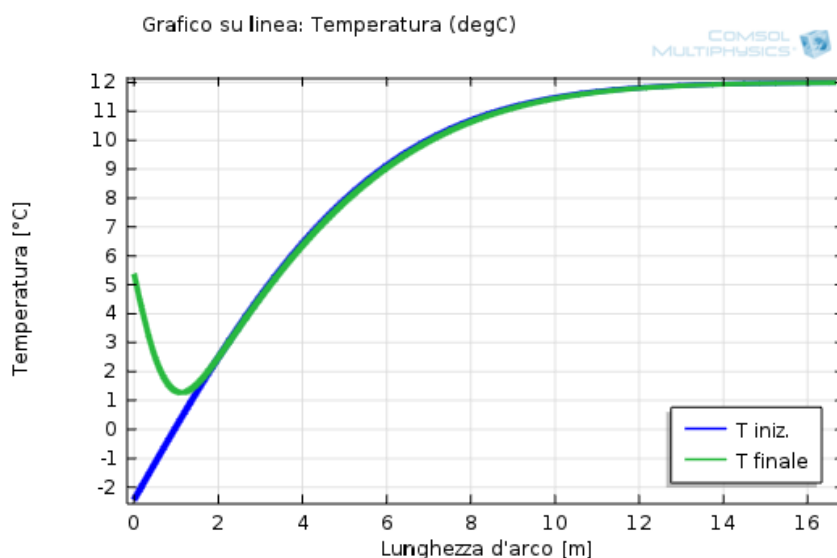


Fig. 5.22- Profilo di temperatura completo

I relativi risultati sono riassunti in Tab 5.10:

Tabella 5.10- Parametri al variare del coefficiente di scambio termico

α	x utile	P tot roccia	E tot roccia	ΔT sup	ΔT a x utile	M roccia
$W/m^2 \cdot K$	m	kW	kWh	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	t
0,1	0,15	1,32	95	1,61	1,25	458
1	0,7	11,55	832	3,77	1,5	2240
5	1,19	36,62	2637	8,47	1,05	3962
8,55	1,25	46,73	3364	10,17	0,96	4182
10	1,3	49,44	3560	10,57	0,9	4367
15	1,3	55,61	4004	11,47	0,96	4367
20	1,4	59,16	4260	11,92	0,65	4739
25	1,4	61,44	4424	12,22	0,6	4739
30	1,4	63,00	4536	12,42	0,74	4739
50	1,4	66,24	4769	12,82	0,78	4739

In azzurro sono evidenziati i valori che si confronteranno con la tabella in cui si andrà a variare la conducibilità. Si vede che con il tempo a disposizione la profondità utile è di 1,25 m, a cui corrisponde un' energia recuperata di circa 3,4 MWh. Ben lontani dai 20,3 MWh necessari. Quindi rispetto al totale, la quantità di energia assorbita dalla roccia è del 16,7%. Come si può vedere dai grafici sotto (Fig. 5.23), aumentare il coefficiente di trasporto termico oltre il valore assunto non implica grandi variazioni nei risultati. Un valore inferiore è da escludere, quindi si prende per buono quello forniti.

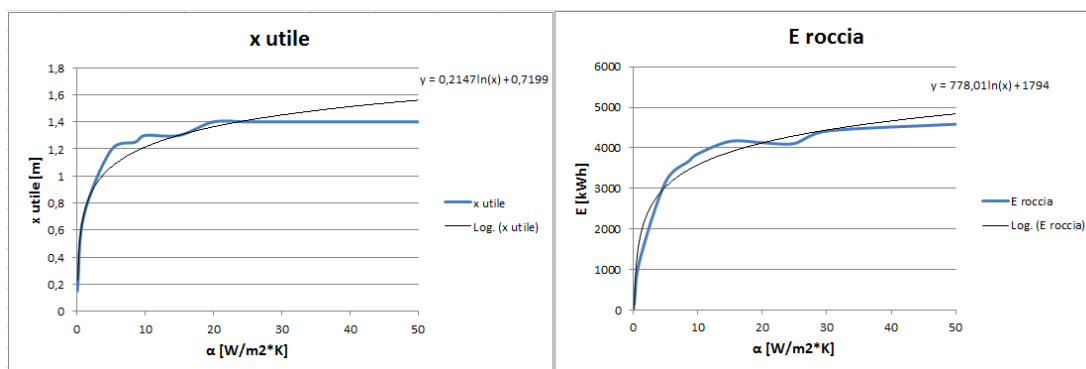


Fig. 5.23- Andamento parametri al variare del coefficiente di scambio

A questo punto per costruire il nuovo modello si aggiungono i domini delle mele con i dati trovati nel paragrafo precedente e l'aria con parametri da definire. Le dimensioni dei domini riguardanti i cassoni sono descritti nel capitolo dedicato. Condizioni al contorno non ce ne sono in quanto è un "blocco" unico e si imposta solo la temperatura dei domini nei "Valori iniziali". I risultati trovati al variare della conducibilità termica sono riportati in Tab. 5.11:

Tab. 5.11- Parametri al variare della conducibilità termica

K	x utile	P tot roccia	E tot roccia	ΔT sup	ΔT a x utile	M roccia
W/m*K	m	kW	kWh	° C	° C	kg
0,026	0,2	3,74	270	1,62	1	614
0,1	0,5	9,47	682	2,22	1,15	1574
1	0,8	24,93	1795	5,12	1,3	2581
6	1,1	37,09	2670	7,12	1,05	3637
8	1,19	38,94	2804	7,62	1	3962
10	1,2	40,45	2912	7,92	1,15	3999
15	1,22	43,33	3120	8,62	1,2	4072
18	1,25	44,70	3219	8,92	1,15	4182
20	1,3	45,54	3279	9,12	1,2	4367
100	1,4	62,14	4474	12,68	0,5	4739
1000	1,5	100,54	7239	16,38	0,65	5118
10000	1,53	123,97	8926	17,43	0,7	5232

Confrontando i risultati con quelli ottenuti in Tab. 5.10 si ottiene che la conducibilità termica da impostare per l'aria è di 18 W/m*K. D'altronde il valore reale sarebbe palesemente sbagliato in quanto è una quantità riconducibile a materiali isolanti, si avrebbe un errore di almeno un paio di ordini di grandezza. Con tale valore "corretto" la profondità utile e l'energia ceduta dalla roccia sono praticamente uguali. Mentre le temperature sono più omogenee nella roccia avendo nel

complessivo solo un comportamento per conduzione. Superficialmente risulta una differenza di temperatura minore, in quest'ultimo caso, mentre alla profondità utile è maggiore seppur di poco. Questo bilancia i due tipi di scambio di calore facendoli risultare molto simili. Se come fatto sopra mettiamo su grafico i due parametri principali quali profondità utile ed energia della roccia troviamo un andamento rettilineo degli stessi (Fig. 5.24). Però si deve far attenzione al fatto che, visto i diversi ordini di grandezza interessati, l'asse delle ascisse è in scala logaritmica.

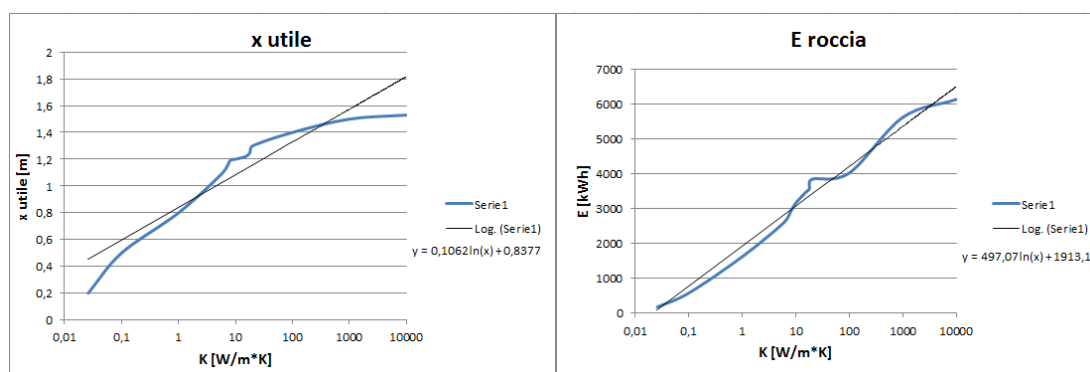


Fig. 5.24- Andamento parametri al variare della conducibilità

Se invece facciamo una sovrapposizione tra le due prove su valori papabili otteniamo circa lo stesso andamento (Fig. 5.25). Da questi grafici di sovrapposizione è possibile trovare un parametro in funzione dell'altro per diversi valori, se si volesse. In ogni caso nelle verifiche che verranno fatte si considererà solo il parametro scelto.

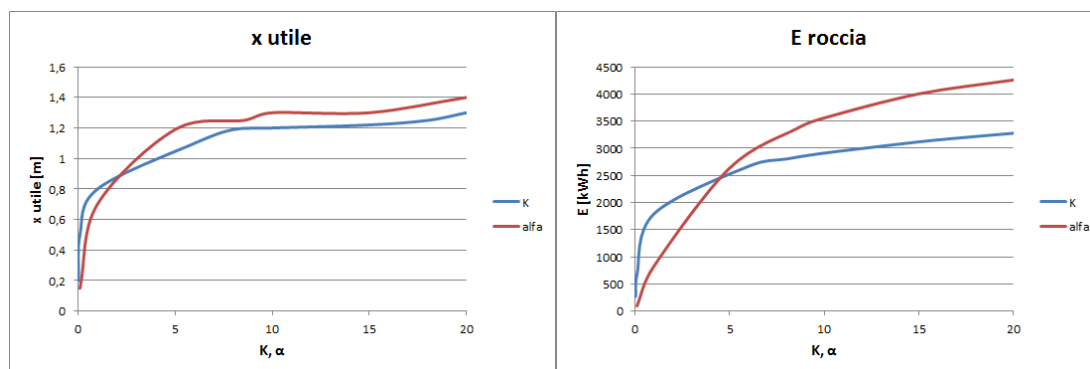


Fig. 5.26- Sovrapposizione parametri

A questo punto si considera lecita l'ipotesi fatta inizialmente di considerare l'aria come se fosse un solido.

La limitazione nel recupero del "freddo" immagazzinato nella montagna sta nel fatto che la velocità alla quale viene restituito è la stessa di quella con cui viene stoccato, di conseguenza avendo tempi molto inferiori, anche la stessa sarà notevolmente minore. Difatti il raffreddamento, col passare del tempo, interesserà strati sempre più lontani, ma la quantità di energia che si riuscirà a recuperare sarà sempre quella contenuta entro i primi 1,25 m di profondità (in 3 giorni).

Si precisa che tali valori considerano anche lo scambio per radiazione, il quale dipende dalla differenza di temperatura alla quarta delle due superfici affacciate. A livello teorico considerando la frutta a 25 °C e la roccia ad 1 °C, ottengo per unità di superficie 71 W/m², che complessivamente sono 66 kW. Una potenza non trascurabile. Ma questo solo all'istante iniziale, perché come si è visto le temperature superficiali si portano molto velocemente a circa la temperatura di equilibrio, quindi ho un repentino calo dello scambio per radiazione (Fig. 5.27).

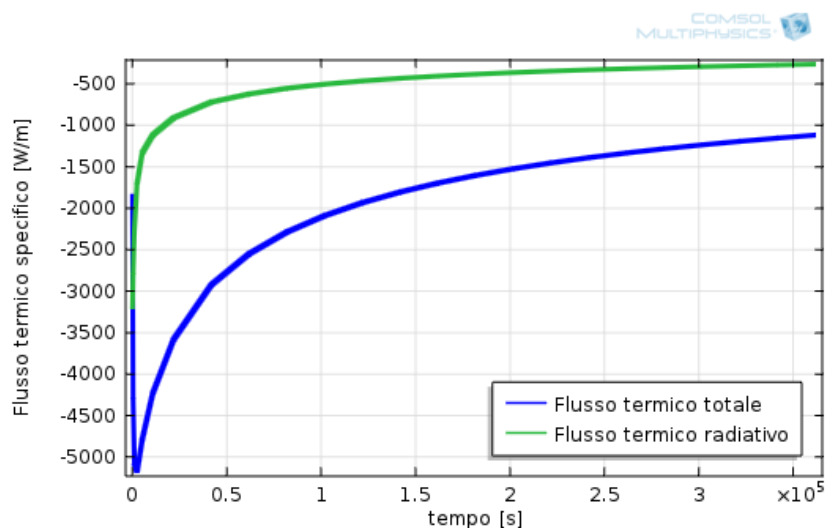


Fig. 5.28- Scambio per radiazione rispetto al totale durante il carico

Per quel che riguarda la roccia, come visto la potenza media totale è di 47 kW, dove solo 12 kW sono per radiazione rispetto ad essa, quindi contribuisce per un 25%. Relativamente poca, considerando che la superficie è la medesima. Questa radiazione sarà la stessa ricevuta dal blocco di cassoni. Ma su di essi influirà ancora meno, difatti rispetto ai 180 kW complessivi rappresenta solo il 7%. Inoltre contribuisce solo al raffreddamento dei “bins” esterni. La superficie dei cassoni raffreddata per convezione è 6,5 volte superiore a quella su cui si ha la radiazione con la montagna. Da questo si capisce anche l'importanza di far circolare aria all'interno delle intercapedini.

5.4.2.2 Influenza durata e temperatura di pre-raffreddamento

Vista la scarsa energia recuperata dalla roccia (3,4 MWh), sono state cercate soluzioni per poterla incrementare.

Mantenendo costanti i tempi di carico e la temperatura dell'aria per raffreddare le mele, le variabili su cui si potrebbe agire sono la durata e la temperatura con cui si effettua il pre-raffreddamento.

Come prima prova si è andati a verificare quanto incida il tempo di preraffreddamento, mantenendo la temperatura dell'aria media costante e pari a -3 °C. Nel modello si è dato un unico valore di temperatura per tutto il dominio rappresentante la montagna, ovvero è come se si ipotizzasse un preraffreddamento di durata infinita. Da questa simulazione determino quale sia il limite massimo di

potenza che posso ottenere dalla roccia e quale sia la profondità massima sfruttabile, con i vincoli sopra indicati. I risultati sono riportati in Tab. 5.12 sotto:

Tabella 5.12- Parametri in condizioni ideali

ΔT sup roccia	P tot mele	P tot roccia	E mele	E roccia	x utile
°C	kW	kW	kWh	KWh	m
8,1	40,24	36,07	3863	3463	2,4

Come si può vedere la profondità utile è quasi doppia in condizioni ideali, ma a questo fatto non corrisponde un altrettanto incremento dell' energia restituita, in quanto (come si vede in Fig. 5.29) l' incremento di temperature più in profondità è esigua.

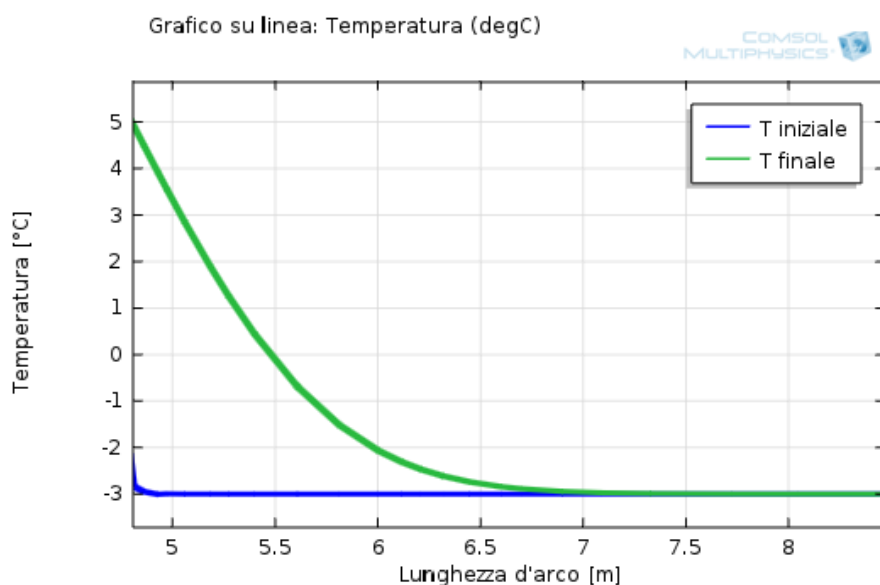


Fig. 5.29- Profili di temperatura in condizioni ideali

Dal momento che l' incremento di energia recuperata è esigua, nonostante si siano considerate condizioni ideali, si può giungere alla conclusione che prolungare oltre il dovuto i tempi di pre-raffreddamento non porta ai miglioramenti sperati.

Si passa di conseguenza a far variare la temperatura di pre-raffreddamento. Quindi nel modello dove si simula il primo preraffreddamento si imposteranno le temperature $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, il profilo ottenuto lo si riproduce nel modello in cui sono rappresentate anche le mele, si quantifica l' energia recuperata e la si confronta con quella ottenuta con i $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ standard. Le variabili principali riportate in Tab. 5.13 sono: profondità utile, potenza media necessaria nel preraffreddamento, potenza media restituita dalla roccia durante il carico, la corrispondente energia recuperata da quest' ultima e il rapporto tra potenza resa e fornita.

Tabella 5.13- Risultati ottimizzazione temperatura di pre-raffreddamento

T preraffr. °C	x utile m	P preraffr. kW	P resa kW	E resa kWh	P r/ P p	ΔT sup roccia °C
-1	1,30	61,25	42,50	3060	0,694	8,11
-3	1,25	70,68	44,70	3219	0,632	8,92
-4	1,25	75,41	47,04	3387	0,624	9,20
-5	1,25	80,11	48,54	3495	0,606	9,30

La prima cosa che si nota è che la profondità utile resta invariata, difatti dipende principalmente dal tempo e dal mezzo. Nel caso a temperatura inferiore aumenta leggermente ma è più un' errore di valutazione in quanto il profilo di temperatura avendo una concavità tendente all' orizzontale è di difficile interpretazione. Gli altri parametri migliorano abbassando la temperatura. Però questo richiede l' impiego di una potenza superiore, e dal momento che aumentano anche le perdite ho che il rapporto tra quello che "spendo" rispetto a quello che "ricavo" va via via diminuendo. Alla temperatura standard ho una potenza persa di 26 kW, in accordo con quanto trovato precedentemente. Con i -5 °C queste perdite arrivano a 32 kW. Inoltre se notiamo per ogni grado in meno o in più di temperatura ho una variazione di ±5 kW di potenza impegnata, costanti. Ma dal grafico seguente (Fig. 5.30) si vede che le pendenze sono diverse e la potenza resa aumenta meno velocemente di quella fornita.

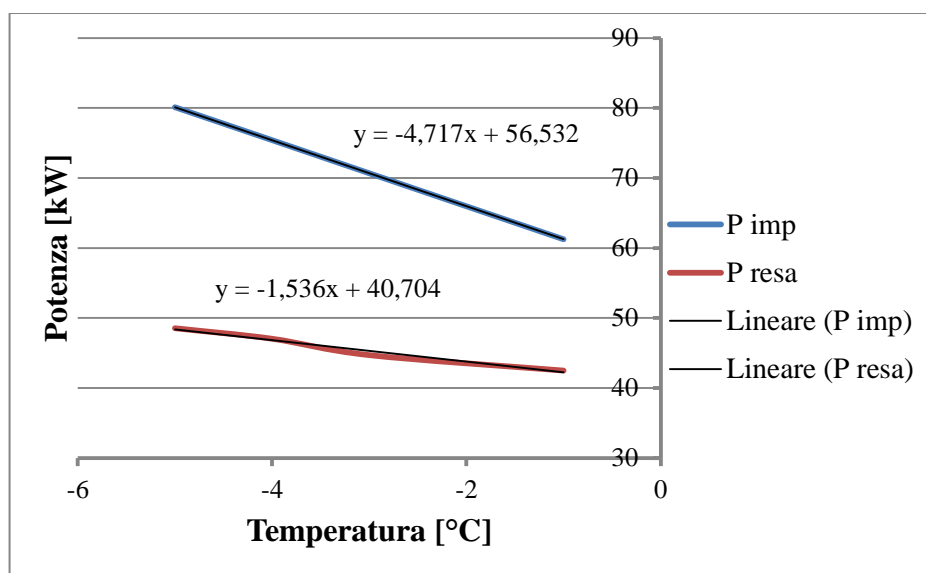


Fig. 5.30- Variazione potenza resa ed impiegata al variare della temperatura

Avere temperature basse comporta perdite elevate, mentre non abbassarle più di tanto comporta il non riuscire a recuperare sufficiente energia. Dall' ottimizzazione della temperatura di preraffreddamento risulta più opportuno mantenerla sui -3 °C, come è stato fatto nella cella sperimentale, anche perché è sempre una valore medio.

Questa metodologia di lavoro è stata usata anche per verificare l'energia recuperata nell'ottimizzare i pre-raffreddamenti successivi, quando non si ha il tempo di ripristinare il profilo obiettivo (Cap. 6.3.1). Di seguito si riporta la tabella relativa con i parametri principali (Tab. 5.14), da confrontare con i 3219 kWh che si ottengono col profilo obiettivo:

Tabella 5.14- Energia recuperata ottimizzazione pre-raffreddamenti successivi

T preraffr.	tempo	ΔT sup roccia	P tot roccia	E resa	x utile
°C	gg	°C	kW	kWh	m
-4	10	9,14	34,08	3272	1,20
-5	5	10,00	33,60	3226	1,15

Così facendo otteniamo almeno la stessa energia senza però rispettare il profilo obiettivo.

5.4.2.3 Carico con raffreddamento notturno tramite impianto

Uno dei due obiettivi principali del progetto, come visto, è quello di ridurre i tempi di raffreddamento della frutta. Dal momento che con il solo contributo della roccia, il quale sarebbe in ogni caso insufficiente, le tempistiche si allungerebbero, si valuta l'opzione di far funzionare i gruppi frigoriferi la notte. Questo perché con essi si raffreddano più velocemente e quindi dal momento in cui chiudo ermeticamente la cella, istante da cui inizio a conteggiare i giorni di abbattimento della temperatura, parto da una condizione migliore. Per queste simulazioni si considerano mele sia a 25 °C che a 15°C. Volendo determinare in modo preciso l'energia in gioco ci si è andati a determinare in ogni situazione la temperatura dell'aria interna alla cella. Dove la notte sarà costante perché imposta dall'impianto. Durante le tre giornate in cui si porta la frutta in cella, la temperatura sarà funzione della quantità di mele e dell'energia scambiata fino a quel momento dalla montagna. Quindi è stata valutata in modo iterativo allungando di volta in volta i tempi delle simulazioni. Per necessità si farà uso del modello in cui non è presente il dominio "mele", questo per poter impostare all'occorrenza la temperatura di raffreddamento per convezione desiderata. La durata di ogni fase è di 12 ore anche se la giornata lavorativa dura meno. Utilizzare maggior precisione risulta superfluo perché altrimenti si dovrebbe tener conto anche di molte altre variabili del tutto aleatorie. I risultati sono riportati in Tab. 5.15, e riassumono l'energia assorbita o ceduta dalla roccia.

Partiamo col determinare la temperatura dell'aria all'equilibrio utilizzando sempre la relazione (5.1). Il primo giorno si inseriscono 270 ton di mele che alla temperatura di 25 °C corrispondono a 6770 kWh di energia da assorbire. Considerando che in 12 ore, si interessa roccia fino a 0,7 m di profondità, e che questa ha una temperatura media di 271,7 K ottengo l'equilibrio a 7,84 °C. Che è inferiore rispetto a quando si considera il carico completo perché le mele sono meno, e la roccia essendo più superficiale ha una temperatura media inferiore. Ne risulta che assorbo circa 600 kWh durante il giorno. La notte, quantificando la potenza rilasciata dalla frutta in 150

kW per quella temperatura, assorbo 1800 kWh, che è tre volte l' energia assorbita durante il giorno.

Al secondo giorno mi restano 4347 kWh di calore da asportare, il quale corrisponde ad una temperatura media di 16 °C. A questo punto arriva un carico di frutta equivalente a quello già presente, la temperatura media delle mele risulta 20,5°C, per un complessivo di 11117 kWh. Considerando sempre uno spessore di roccia di 0,7 m, il quale ha una temperatura media di 0,05 °C, mi da che l' equilibrio lo ho a 10,66 °C. Con questa temperatura ottengo durante la giornata circa 700 kWh, un valore superiore a quello trovato nel primo giorno. Questo perché ho una temperatura di equilibrio superiore, dal momento che la montagna si è già un po' scaldata e la frutta è mediamente più fredda, la quale mi permette di avere una differenza di temperatura tra roccia e aria superiore ottenendo più energia. La notte a queste temperature le mele rilasciano 140 kW, ovvero 1670 kWh. Valore molto superiore rispetto ai 175 kWh circa di calore assorbito dalla roccia che era ad una temperatura superiore.

Al terzo giorno ho un' energia residua di 8737 kWh, corrispondenti ad avere mele mediamente a 16 °C. L' ultimo carico porta la frutta a circa 19 °C medi, per un totale di 15507 kWh. Lo strato di roccia è a 0,8 °C. Con un equilibrio dell' aria a 12 °C ottengo 730 kWh. Durante la terza notte assorbo la stessa energia della seconda. Questo significa che a partire dal primo giorno in cui si inizia a conteggiare il tempo di raffreddamento ho un calore residuo di circa 13000 kWh, che è poco più della metà del totale teorico (65%).

Se facciamo lo stesso tipo di calcolo anche per mele a 15°C, risulta che si riesce ad assorbire quasi la metà dell' energia, anche in questo caso.

Di seguito si riporta la tabella (Tab. 5.15) in cui sono riassunte le quantità di calore scambiate con la roccia, i valori negativi sono nel caso in cui la roccia si riscalda e quelli positivi quando si raffredda. Come prevede la convenzione nel caso in cui l' ambiente cella sia il sistema di ingresso/uscita del flusso di calore. Inoltre si riportano pure i casi in cui la temperatura di equilibrio è stata considerata costante.

Tabella 5.15- Energia assorbita e ceduta durante il carico

T mele °C	T aria gg °C	E 1°gg kWh	E 1°notte kWh	E 2°gg kWh	E 2°notte kWh	E 3°gg kWh	E 3°notte kWh
25	11,26	-843,24	117,10	-731,05	200,43	-661,18	238,96
15	6,04	-504,74	27,09	-416,20	90,70	-367,04	129,21
25	variabile	-622,09	61,50	-716,89	176,48	-732,90	239,23
15	variabile	-395,12	3,76	-383,81	72,77	-365,03	113,02

Si inserisce pure la tabella riguardante l' energia totale (Tab. 5.16):

Tabella 5.16- Energia totale scambiata

T mele	T aria gg	E tot giorno	E tot notte
°C	°C	kWh	kWh
25	11,26	-2235,47	556,49
15	6,04	-1287,97	246,99
25	variabile	-2071,88	477,20
15	variabile	-1143,96	189,55

Dalle tabelle si vede come durante il giorno la roccia fredda a contatto con l'aria calda si riscalda assorbendo il calore delle mele. Durante la notte invece la roccia più calda dell'aria si raffredda, quindi si dovrà raffreddare sia la frutta che la dolomia. Ma quest'energia non va sprecata, seppur esigua, perché viene restituita il giorno successivo. E' un modo per dare una piccola "ricarica" di freddo che non mette in crisi l'impianto.

Se le temperature di equilibrio si ipotizzano costanti l'energia recuperata diminuisce nel corso delle giornate, al contrario di quella assorbita la notte. Nel caso sia variabile la temperatura, l'energia dipende da quest'ultima, se aumenta più o meno sensibilmente, come visto sopra. Difatti con mele a 15°C va di poco diminuendo, perché la temperatura dell'aria aumenta ma non molto.

Rispetto al caso in cui non si fa funzionare l'impianto la notte, si ha a disposizione per recuperare energia, la metà del tempo. Però la quantità di energia recuperata è più della metà rispetto a prima. E' poco più del 60%, in quanto recupero come visto 2072 kWh rispetto ai 3219 kWh, il 10% del totale da asportare. Complessivamente si vanno ad aggiungere i 5100 kWh che fornisco con l'impianto, per un totale di 7200 kWh. Più del doppio rispetto a quello che assorbivo prima. Questo perché il flusso di calore, nel caso precedente, cala abbastanza velocemente. Mentre in questi casi ha un andamento (solo per quello che riguarda la roccia) come in Fig. 5.31:

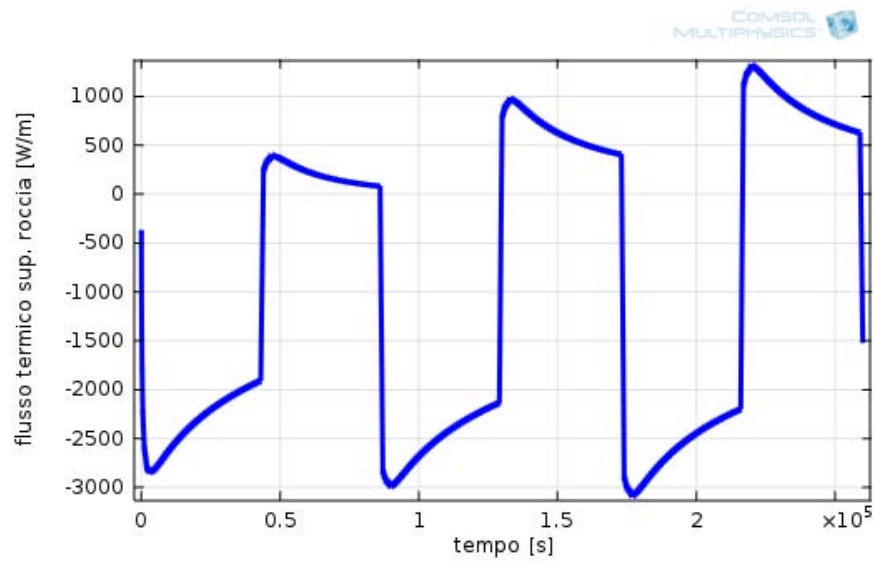


Fig. 5.31- Calore per convezione scambiato con la roccia

Dove la temperatura sulla superficie della roccia ha un andamento come in Fig. 5.32:

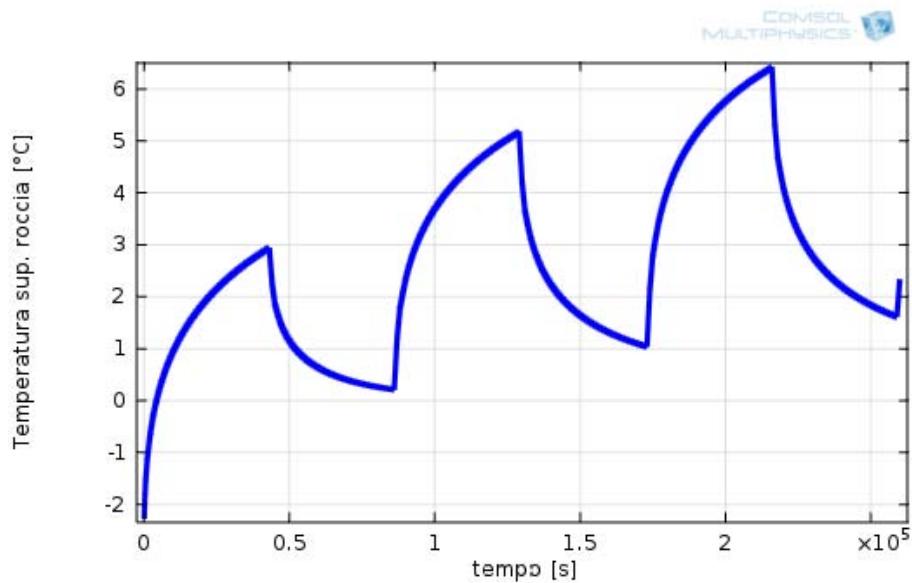


Fig. 5.32- Andamento temperatura superficiale

A seguito di queste valutazioni è stato stabilito che adottare questa tipologia di gestione dell' impianto comporta sostanziali vantaggi rispetto al metodo ipotizzato inizialmente. Quello in cui si lasciava l' impianto di raffreddamento spento per tutto il carico.

Si passa all' eseguire una simulazione in cui si veda l' iterazione tra le mele e la montagna. A seconda della temperatura dell' aria si verifica anche quale sia il flusso termico predominante tra quello radiativo e per convezione (ottenuto per differenza tra quello totale e per radiazione). I due flussi sono confrontati in Fig. 5.33 e Fig.

5.34, i giorni simulati sono quattro, quindi con anche il primo della fase di mantenimento per capire quale sarà l'andamento nei giorni successivi.

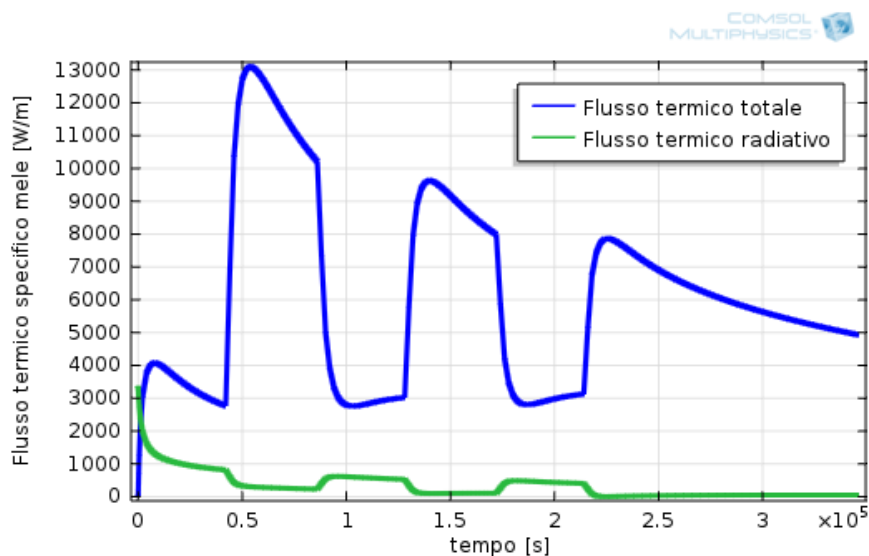


Fig. 5.33- Flusso termico totale e per radiazione delle mele

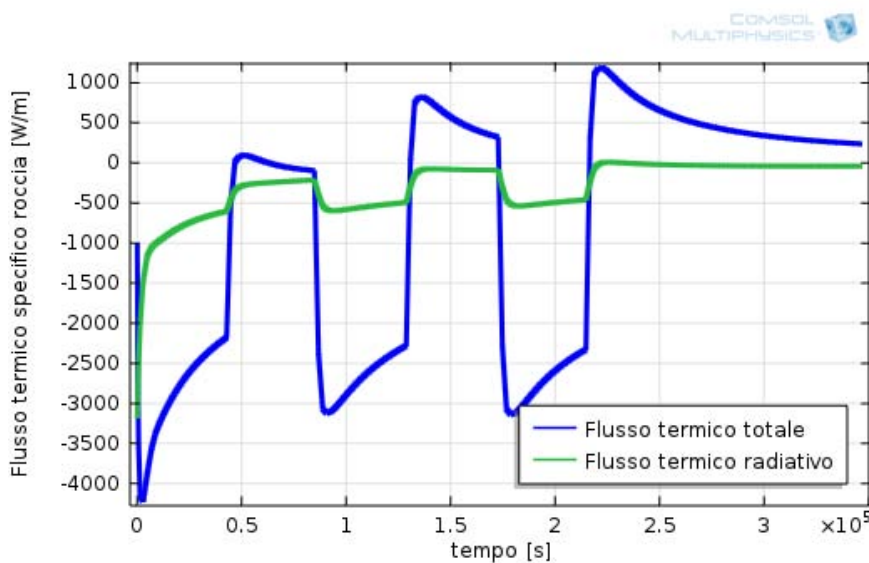


Fig. 5.34- Flusso termico totale e per radiazione della roccia

Se osserviamo i due grafici del flusso termico si vede come durante il primo giorno e la prima notte il calore scambiato è elevato, mentre nelle due giornate di carico successive è molto inferiore. Il motivo è che durante la notte con temperatura bassa le mele superficiali si portano a tale valore, nel momento in cui l'aria passa alla temperatura di equilibrio ad impianto spento che è più elevata, si ha una differenza di temperatura esile che rende minimo il flusso termico. Inoltre lo scambio per radiazione da parte della roccia, come si vede, è uguale in entrambi i grafici e questo rende lo scambio totale durante il primo giorno superiore rispetto ai successivi, come

era in Fig. 5.31. Per questo motivo le mele si raffredderanno prima, riducendo lo scambio che avviene negli altri due giorni. Ciò fa sì che la Fig. 5.34 abbia un flusso totale uguale a quello per convezione della Fig. 5.31.

Durante questi 4 giorni simulati, si asporta un'energia pari a 10,5 MWh. Il che vuol dire, che così facendo, dopo un solo giorno dal momento in cui inizio a contare il tempo che ci metto a raffreddare la frutta ho già dimezzato il carico termico. Nei successivi due giorni riuscirò ad assorbire il 90% circa dell'energia totale, per poi completare il raffreddamento la settimana successiva.

A livello complessivo le giornate necessarie ad abbattere gran parte della temperatura sono le 3 in mantenimento, più le tre notti nel carico, quindi quattro giorni e mezzo. Contrariamente alle celle convenzionali in cui occorre una settimana. Si ottiene quindi, seppur di poco, una riduzione dei tempi di abbattimento della temperatura della frutta. In accordo con quanto richiesto, seppur non raggiungendo le 24 ore, quale era l'obiettivo.

5.4.2.4 Confronto tempi di risposta con celle fuori terra

Si procede col cercare quali possano essere ulteriori caratteristiche vantaggiose, da poter sfruttare per migliorare la funzionalità del sistema.

Una possibile caratteristica da poter sfruttare, è l'enorme capacità termica della roccia e al relativo effetto volano, il quale permette di avere delle dinamiche di scambio termico molto lente. Si cerca di ottimizzare la gestione della potenza dell'impianto frigorifero dal momento che ci si trova ad avere condizioni stabili e prevedibili, studiando più nel dettaglio le tempistiche sulla trasmissione del calore nel sistema.

In parallelo si faranno dei confronti qualitativi rispetto ad una cella frigorifera convenzionale fuori terra delle stesse dimensioni. La quale sarà isolata da dei pannelli in poliuretano da 20 cm.

La propagazione di un campo termico in condizioni non stazionarie viene descritta dalla caratteristica intrinseca del materiale quale la diffusività termica [14]. Essa è definita dal rapporto tra conducibilità termica e il prodotto tra densità e calore specifico del corpo in oggetto, come in relazione (5.2):

$$\alpha = \frac{k}{\rho * c_p} \quad (5.2)$$

Dove:

α [m^2/s] = diffusività termica

k [$W/m*K$] = conducibilità termica

ρ [kg/m^3] = densità

c_p [$J/kg*K$] = calore specifico

La diffusività dei componenti principali è:

- Roccia secca: $\alpha = 1,21 * 10^{-6} m^2/s$
- Mele eq.: $\alpha = 1,88 * 10^{-7} m^2/s$
- Aria: $\alpha = 2,06 * 10^{-5} m^2/s$
- Poliuretano: $\alpha = 5,31 * 10^{-7} m^2/s$

Si vede come vi siano tre ordini di grandezza diversi. L'aria, con diffusività maggiore, sarà quella che trasmetterà più velocemente il calore, al contrario delle mele che hanno il valore più piccolo. Quindi come visto prima il limite fisico è dato dai tempi di rilascio del calore dalle mele.

E' stato fatto un confronto, tra cella ipogea e fuori terra, a parità di potere coibentante. Si ipotizza di considerare in ambedue una superficie piana. Quindi facendo equivalere le due resistenze termiche, rapporto tra spessore e conducibilità termica, è stato trovato che quei 20 cm di poliuretano corrispondono a circa 21 m di roccia. Ma in quest'ultima il calore si trasmette più velocemente. Se si suppone di avere poliuretano ad 1 °C e di far aumentare la temperatura su una delle due facce a 20 °C istantaneamente (vedi Cap. 7 e appendice), si ha tempo due ore perché la temperatura sull'altra superficie aumenti di 0,42 °C, come si vede sotto (Fig. 5.35).

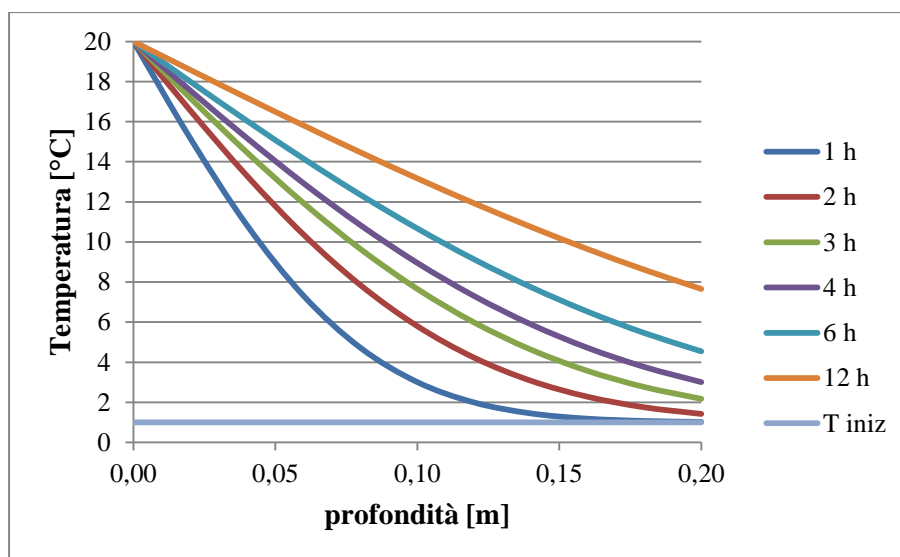


Fig. 5.35- Riscaldamento poliuretano cella convenzionale

Se invece faccio aumentare la temperatura da 20 °C a 25 °C ho che questa perturbazione ci mette un po' meno di due ore ad attraversare l'isolante, quindi senza fare calcoli approfonditi consideriamo come tempo di reazione della cella fuori terra due ore.

Dal momento che il rapporto tra le due diffusività è di 2,28, facendo una simulazione dedicata per la roccia si ottiene che appunto a 20 cm di profondità la stessa temperatura aumenta in meno della metà del tempo. Ma avendo uno spessore circa cento volte superiore, nella roccia, ho dei tempi di reazione circa cinquanta volte superiori. Questo a livello teorico, perché nella roccia non ho differenze di temperatura così elevate. C'è anche da tenere in considerazione che per arrivare a raffreddare la roccia fino a tale profondità ci vuole un po' di tempo, visto che nel primo pre-raffreddamento arrivo solo a 7-8 m. Inoltre vi è anche il calore geotermico che rallenta l'avanzamento del flusso "freddo". Quindi nel primo periodo di funzionamento dell'impianto non avrò molto potere coibentante.

Facendo un confronto reale, è stato determinato quanto tempo ci vuole perché aumenti sempre della stessa temperatura, la superficie della cella ipogea quando si va

a spegnere l' impianto frigo. E' stato trovato che ci vogliono 48 ore. Poi man mano la temperatura aumenta sempre meno, difatti come si è visto in mantenimento, dopo lo scarico conviene spegnere l' impianto. In Fig. 5.36 si vede quanto lentamente la temperatura nella montagna ci mette ad omogeneizzarsi.

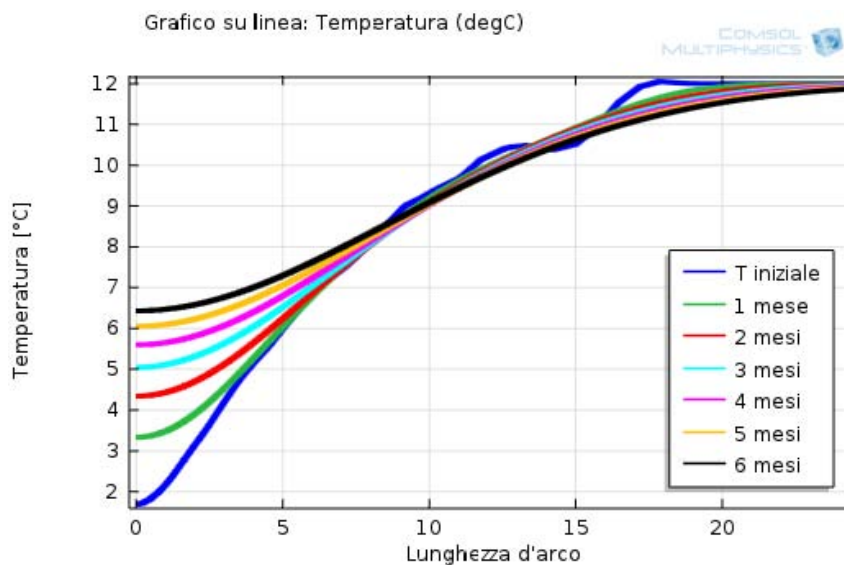


Fig. 5.36- Aumento naturale di temperatura nella roccia

Quindi un rapporto delle tempistiche veritiero, senza considerare il calore di respirazione della frutta, è di circa 25 volte a favore della montagna.

Se invece consideriamo anche la potenza di respirazione delle mele, che con queste quantità ammonta a 16,5 kW a cella, si ha che esse, aumentano in modo spontaneo di temperatura in ambienti freddi di 0,5 °C ogni 24 h. Come si può vedere in Fig. 5.37, la temperatura delle mele aumenta più velocemente di quella sulla superficie della roccia seppur questa sia in parte riscaldata anche dalla frutta.

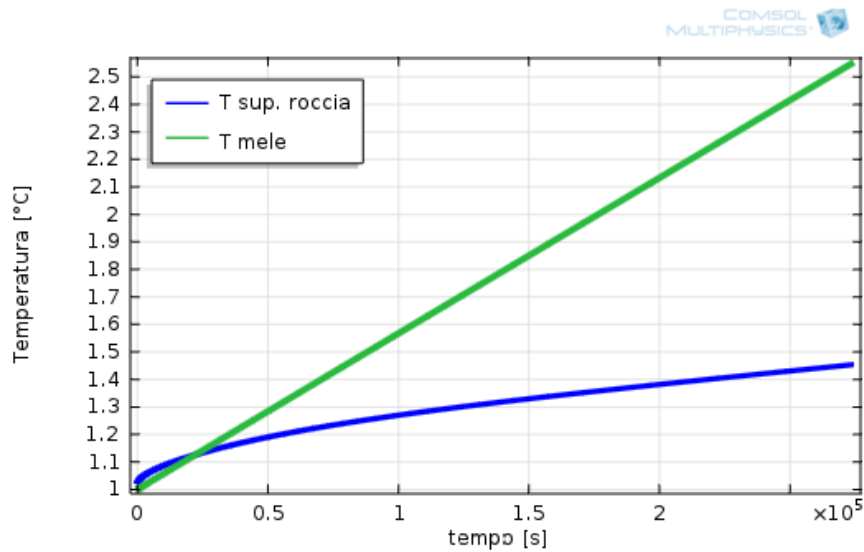


Fig. 5.37- Aumenti di temperatura in cella

Quindi ho che la velocità con cui aumentano di temperatura le mele è di $0,5 \text{ } ^\circ\text{C/gg}$, mentre la roccia di $0,25 \text{ } ^\circ\text{C/gg}$, cioè la metà. Per mantenere una certa qualità di conservazione si considera che le mele non possano riscaldarsi più di $1 \text{ } ^\circ\text{C}$ oltre la temperatura ottimale. Si ha quindi la possibilità di spegnere l' impianto volontariamente o involontariamente (oppure magari a causa di un black out) per due giorni prima di incorrere in danneggiamenti del prodotto conservato. Quindi la dinamica di una cella ipogea è dominata dal calore stesso delle mele piuttosto che dall' ambiente che le circonda.

Nel caso di cella fuori terra i tempi di reazione dipendono dall' ambiente esterno, quindi sono di difficile previsione. Perché nel caso si verifichi un fuori servizio di qualunque tipo, se la temperatura esterna è alta (ad esempio in estate) avrò a disposizione le due ore precedentemente trovate, se è bassa (inverno) avrò una situazione simile alle celle ipogee se non migliore. Ma in ogni caso non è sicuro fare pianificazioni precise e a lungo termine sulla gestione dell' impianto avendo come variabile le condizioni meteo.

Al seguito di queste considerazioni si è notato come, il dover conservare frutta/ortaggi, i quali rilasciano calore e inoltre li si deve mantenere all' interno di un "range" di temperature relativamente sottile, non sia la scelta migliore per questo tipo di impianto. Se invece di conservare prodotti con metabolismo proprio, inserissimo alimenti che non generano calore, come ad esempio carne/pesce o prodotti surgelati, avremo che in tal caso le tempistiche verranno dettate dal sistema. Se ipoteticamente abbassassi la temperatura superficiale a $-10 \text{ } ^\circ\text{C}$, avrei che potrebbero passare anche mesi prima che si decongelino (con impianto frigo spento).

5.4.2.5 Temperature in cella negli istanti iniziali

Viste le dinamiche lente di mele e roccia si prende anche in considerazione la possibilità di far funzionare le celle in modo alternato, così facendo posso ridurre il numero dei gruppi frigo e la potenza installata complessivamente. Ma l' aria in cella,

vista l' elevata diffusività termica, in aggiunta ai moti convettivi e data la scarsa capacità termica, aumenterà velocemente la sua temperatura. Si rende necessario effettuare uno studio approfondito sul' andamento della temperatura della stessa in cella. I ventilatori dell' aerorefrigeratore giocano un ruolo importante. Questi sono posti sul soffitto in prossimità della parete di fondo. Vengono dotati di un diffusore abbastanza grande in modo da indirizzare l' aria in uscita verso la testa della cella, la quale scenderà e attraverserà in senso contrario la stessa tra le intercapedini che si formano con l' impilamento dei cassoni (di circa 13 cm), per poi essere prelevata sulla parete di fondo. Questi aerorefrigeratori sono gli stessi usati nella cella sperimentale (vedi Tab. 5.1.1), ma sono otto invece di cinque.

Per poter simulare tramite modello il comportamento dell' aria si è dovuto usare la simulazione descritta al Cap. 4.2 e rappresentare la cella lungo l' asse longitudinale. Questo modello, per i motivi già descritti, permette di avere dei tempi simulati dell'ordine dei secondi, ma come vedremo questo è sufficiente per portare a regime la temperatura.

Movimentare l' aria è fondamentale per asportare calore dai cassoni. Difatti se non ho movimento d' aria, come detto precedentemente nelle simulazioni statiche, la potenza che dissipa è dell' ordine dei 35 kW ed arrivo a regime di temperatura dopo qualche ora. Questo perché si forma uno strato d' aria calda attorno ai bins la quale non ha sufficiente spazio per ricircolare e all' interno del blocco dei cassoni è praticamente ferma. Mentre se la movimento riesco ad asportare circa 200 kW, vista l' elevata superficie offerta anche nelle intercapedini, oltre al coefficiente di convezione superiore. In queste condizioni la temperatura dell' aria in ogni punto della cella arriva a regime entro 10 minuti. Perché grazie all' elevata portata dei ventilatori elaboro tutta l' aria della cella in circa 5 minuti. Mediante il modello sopra, sono state fatte varie simulazioni, dalle quali si posso riprodurre svariate situazioni di esercizio. La Fig. 5.38 sotto riguarda un particolare di cella senza movimentazione d'aria e dopo 10 minuti si vede come vi sia poco ricircolo.

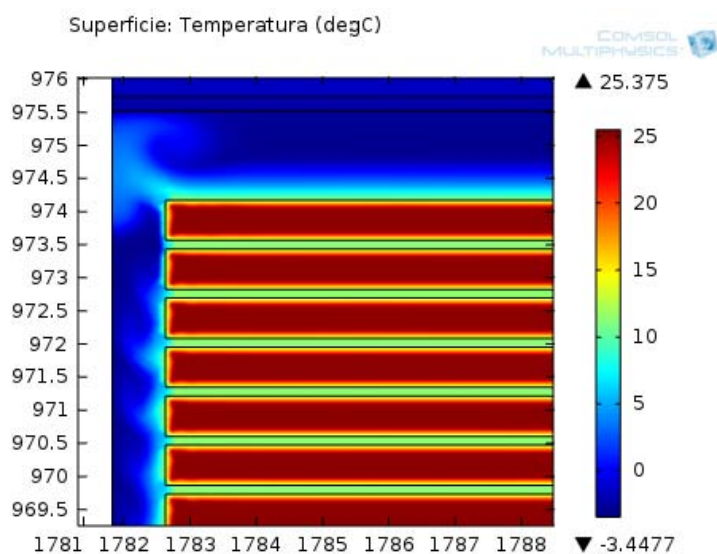


Fig. 5.38- Particolare cella con ventilatori non funzionanti

In seguito si verifica che il modello rispetti le velocità dell'aria. Dai ventilatori esce una portata d'aria a 2,75 m/s ricavata dalla portata e dal diametro degli stessi. Da misurazioni direttamente in cella, in prossimità delle pareti, si hanno 1,4 m/s e nelle intercapedini da 1 a 1,2 m/s. Dalla Fig. 5.39 sotto si vede come tali velocità sono rispettate. I domini di colore bianco sono quelli rappresentanti i solidi.

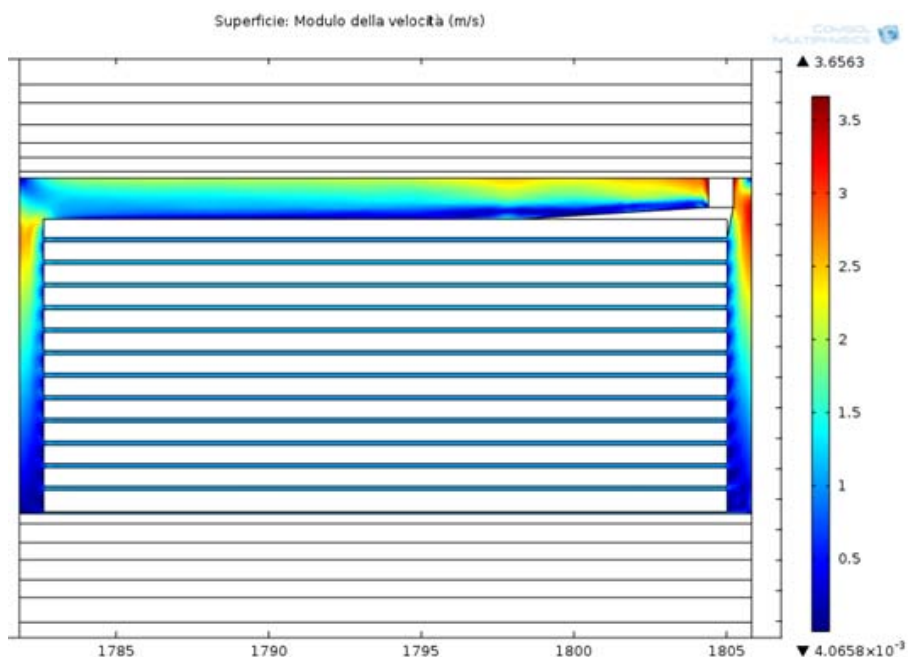


Fig. 5.39- Velocità dell'aria in cella

Nella prima simulazione si vede quanto velocemente l'aria aumenta di temperatura facendo funzionare i ventilatori, ma senza raffreddarla.

Si parte da mele calde ed aria fredda. In queste simulazioni la potenza di respirazione è ininfluyente viste le tempistiche ridotte. Vengono posizionate quattro sonde (Fig. 5.40) e ne vengono rilevati i valori (Fig. 5.41):

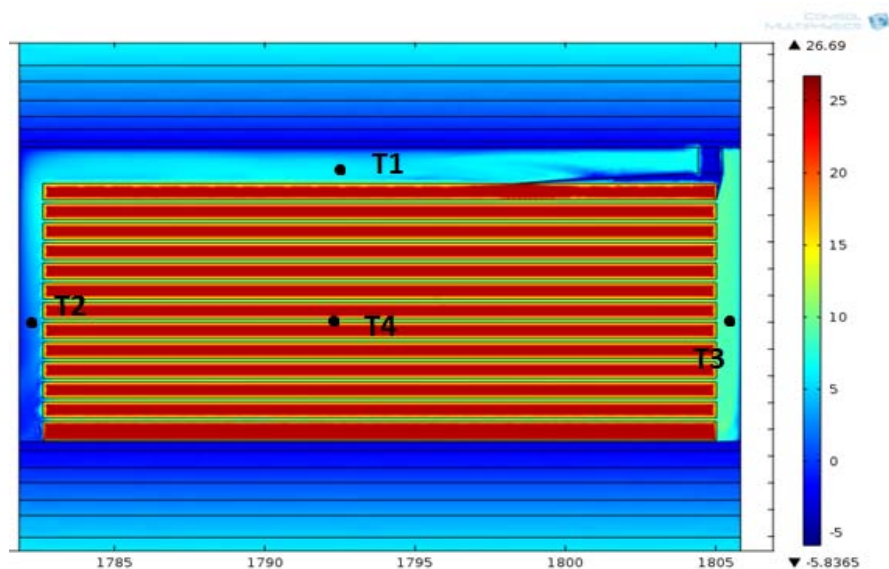


Fig. 5.40- Sezione longitudinale cella e posizionamento sonde

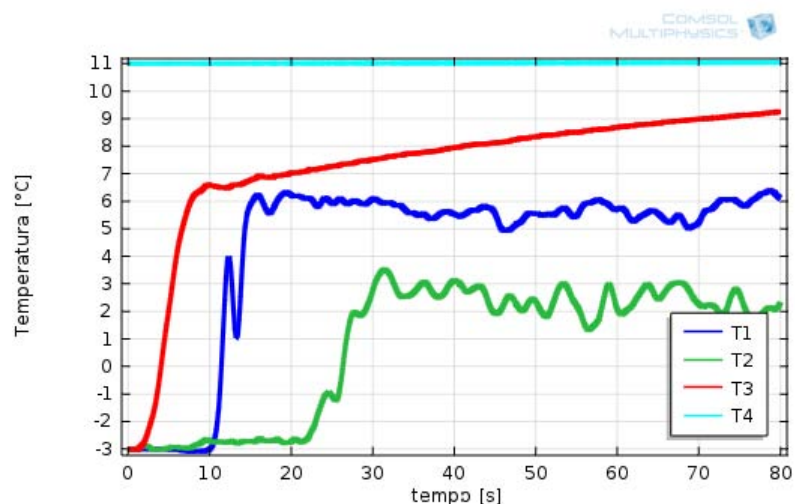


Fig. 5.41- Andamento temperature in cella prima simulazione (solo ventilazione)

La temperatura tra i cassoni (T4) resta praticamente costante, quella sotto l' aspirazione dei ventilatori (T3) esce già calda e si vede come nel gito di cinque minuti arriverà circa al valore di T4. Sulla sonda sulla parte superiore della cella (T1) arriva l' aria calda non appena viene elaborata quella in uscita dalle intercapedini, e successivamente arriva anche a T2.

Inizialmente la temperatura dell' aria in cella è quella di pre-raffrescamento ($-3\text{ }^{\circ}\text{C}$), supposizione fatta e stabilita attraverso le condizioni iniziali. In realtà sarà superiore, in quanto come dimostrato da questa simulazione, l' aria aumenta la sua temperatura molto velocemente.

Si ripete la simulazione appena fatta ma questa volta si raffredda l' aria che si immette in cella, non la si rielabora più alla stessa temperatura di aspirazione. Si ottiene (Fig. 5.42):

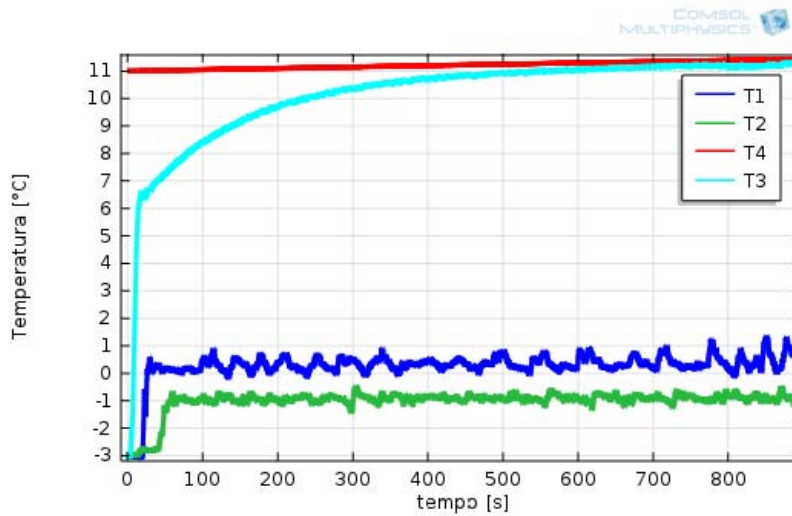


Fig. 5.43- Andamento temperature in cella seconda simulazione (ventilazione e raffrescamento)

La temperatura in ingresso agli aerorefrigeratori (T3) ci mette poco meno di 15 minuti ad arrivare a regime, più lentamente che se ho i soli ventilatori funzionanti. La T4 resta costante ed uguale a prima. Anche T1 e T2 restano costanti, ma a valori inferiori a prima. La prima oscilla tra gli 0 °C e 1 °C, temperatura alla quale viene immessa in cella. La seconda misura -1 °C perché nel frattempo è stata raffreddata dalla roccia, che come condizione iniziale ha una temperatura di -3 °C. Quando l'obiettivo è raffreddare la frutta, idealmente sarebbe meglio avere l'impianto sempre in funzione. Ma volendo impegnare la minor potenza possibile, visti i tempi con cui si riscalda l'aria, sarebbe meglio avere degli "intervallini" in cui l'impianto raffredda celle successive il più piccoli possibile, teoricamente entro il minuto. Questo è impossibile da un punto di vista pratico. Un gruppo frigo funziona almeno un'ora per cella, per cui si sceglie di dividere le celle in gruppi di tre e raffreddarne due per volta facendo ruotare la terza. Questo perché si ricorda come il calore asportato dalle mele dipende dalla temperatura superficiale delle stesse sul perimetro del cassone e da quella dell'aria che le lambisce nell'intercapedine. Ma se non faccio fluire con continuità aria fredda quest'ultima si porterà quasi alla temperatura delle mele riducendo al minimo il flusso di calore. Però il fatto che un'ora su tre l'aria in cella sia più calda permette di recuperare "freddo" dalla roccia, quello immagazzinato le due ore prima. Inoltre in questo lasso di tempo, in cui i ventilatori verranno mantenuti in funzione, si permetterà lo sbrinamento delle batterie alettate, qualora ve ne sia necessità. Questo processo è molto veloce, nell'ordine della decina di minuti e viene eseguito mediante sbrinatori elettrici. Curioso il fatto che sulle batterie si formi brina solo nella fase di carico, quanto si hanno temperature relativamente calde. Durante il mantenimento, quando tutto ha una temperatura fredda non si ha consistente formazione di brina. Quindi si capisce come la temperatura dell'aria sia un parametro da gestire fondamentale. Se essa è relativamente alta recupero "freddo" dalla montagna ma non assorbo il calore delle mele. Se è fredda abbasso la temperatura della frutta ma la roccia essendo anch'essa fredda non si riscalda. E' necessario avere mediamente una condizione intermedia. Quindi se mediamente ho 200 kW a cella (con la potenza di respirazione), così

facendo impiego 400 kW per le tre celle caricate, anche se allungo un po' i tempi di raffreddamento. Si verificherà successivamente la contemporaneità di carico con altri gruppi di celle, perché se per impiegare meno potenza in un gruppo di celle poi si va a sovrapporsi con altre a pieno carico il tutto risulta inutile.

Ora vediamo, contrariamente a prima, un caso di raffreddamento partendo da aria calda a 10 °C e mele a 12 °C. Poi osservo cosa succede dopo 30 secondi, 1 minuto e a 5 minuti, ovvero a regime (Fig. 5.44).

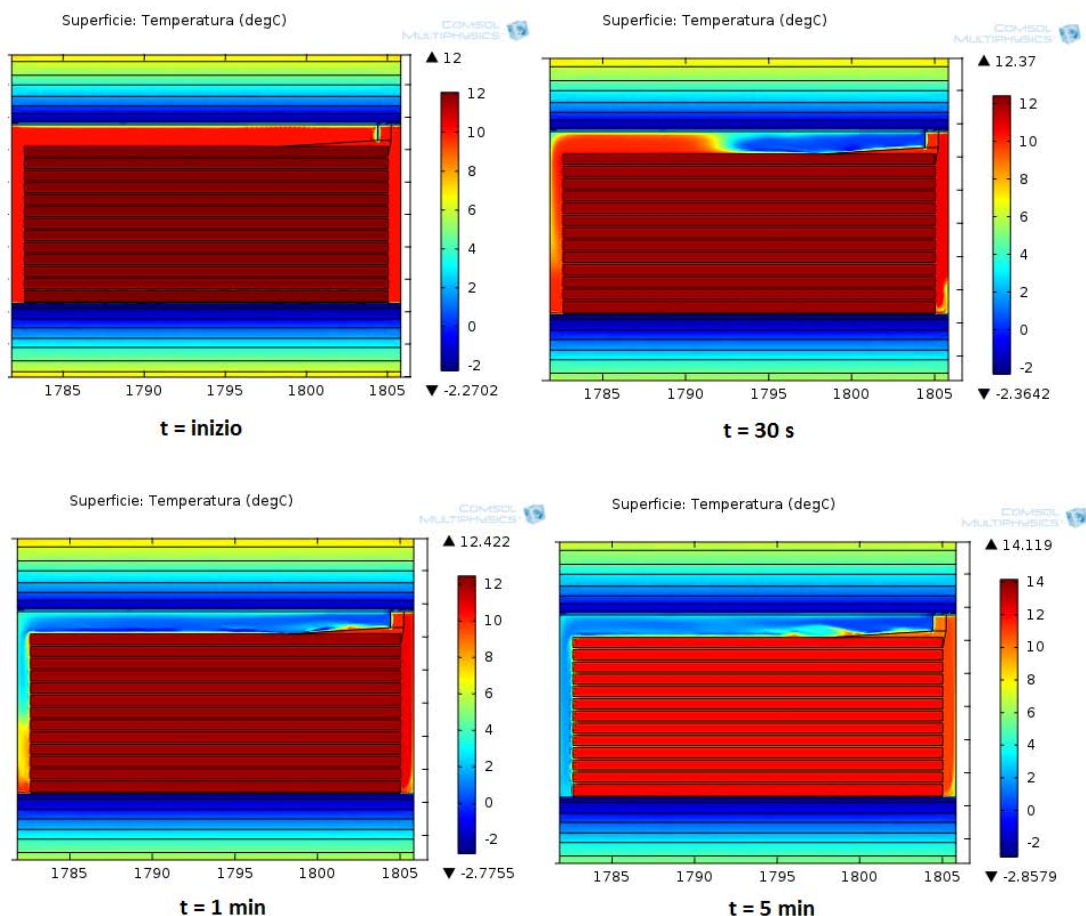


Fig. 5.44- Avanzamento del flusso di aria fredda dagli istanti iniziali alla condizione di regime

Come si vede la temperatura si abbassa solo nella parte superiore e sulla parete di testa della cella, nell' intercapedine, e in ingresso all' aerorefrigeratore si mantiene circa alla temperatura superficiale delle mele (Fig. 5.45).

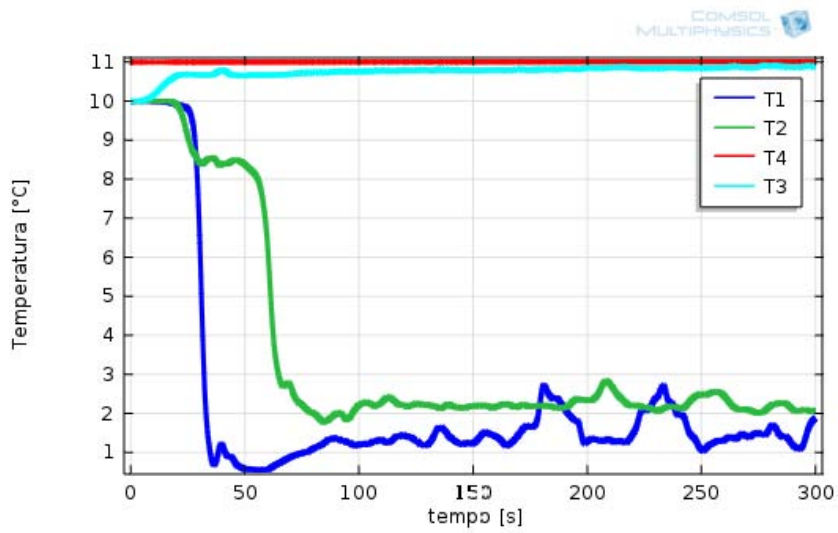


Fig. 5.45- Andamento temperature terza simulazione (raffreddamento e ventilazione)

Quindi se non si raffredda a rotazione una cella, per impegnare meno potenza e recuperare energia dalla roccia, i tempi transitori prima che le temperature arrivino a regime sono trascurabili.

6. Dimostrazione analitica parametri

In letteratura non è stato trovato nulla a conferma dei risultati ottenuti riguardo l'andamento dei profili di temperatura nella roccia e la profondità utile. Si è cercato quindi di dimostrare in maniera analitica la veridicità degli esiti ottenuti.

6.1 Diffusività termica

La propagazione del calore nei solidi è regolata dall'equazione di Fourier.

$$\frac{1}{\alpha} * \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} * \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} * \frac{\delta^2 T}{\delta z^2}$$

Dove α è la diffusività termica del materiale, e pari a :

$$\alpha = \frac{k}{c_p * \rho}$$

Nel nostro caso la dolomia satura ha una diffusività di $1,2099 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Si ipotizza quindi di avere un provino di lunghezza semi infinita, in cui il calore si propaga in modo unidimensionale nel mezzo omogeneo, mediante riscaldamento per conduzione di una faccia dello stesso a temperatura costante [15]. In queste condizioni è possibile risolvere l'equazione di Fourier, la quale risulta:

$$\frac{T(x, t) - T_{iniz}}{T_{sup.iniz} - T_{iniz}} = 1 - \text{erf}\left(\frac{x}{2 * \sqrt{\alpha * t}}\right)$$

Ovvero, esplicitando la temperatura al variare della profondità fissando il tempo, cosa che ci permette di ottenere il profilo di temperatura nella roccia, troviamo:

$$T(x, t) = T_{sup.iniz} + \text{erf}\left(\frac{x}{2 * \sqrt{\alpha * t}}\right) * (T_{sup.iniz} - T_{iniz}) \quad (6.1)$$

Dove:

T [K] = temperatura

x [m] = profondità

α [m^2/s] = diffusività termica

t [s] = tempo

ed "erf" è la cosiddetta "funzione errore" [16].

L'argomento della funzione errore si trova mediante:

$$X = \frac{x}{2 * \sqrt{\alpha * t}}$$

Dove:

X [ad.] = argomento della funzione errore

Questa, per definizione, è:

$$\operatorname{erf}(X) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} * \int_0^X e^{-t^2} dt$$

dove essendo un integrale è stata approssimata dalla serie di Taylor, con buona approssimazione (n=41):

$$\operatorname{erf}(X) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} * \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n X^{2n+1}}{(2n+1)n!}$$

Quindi la relazione (6.1) ci permette di ottenere in maniera analitica i profili di temperatura nella roccia in funzione del tempo e della profondità.

6.2 Profondità utile nel caso ideale

In questo paragrafo verifichiamo il caso ideale, in cui avendo un tempo di preraffreddamento infinito, si ha la roccia ad una temperatura costante e si va a riscaldare la stessa a due differenti valori. In queste analisi il tempo a cui si vuole verificare la propagazione del calore è sempre di tre giorni (Fig. 6.1). Per non appesantire troppo la lettura, la tabella con i valori relativi, viene riportata in appendice (appendice F).

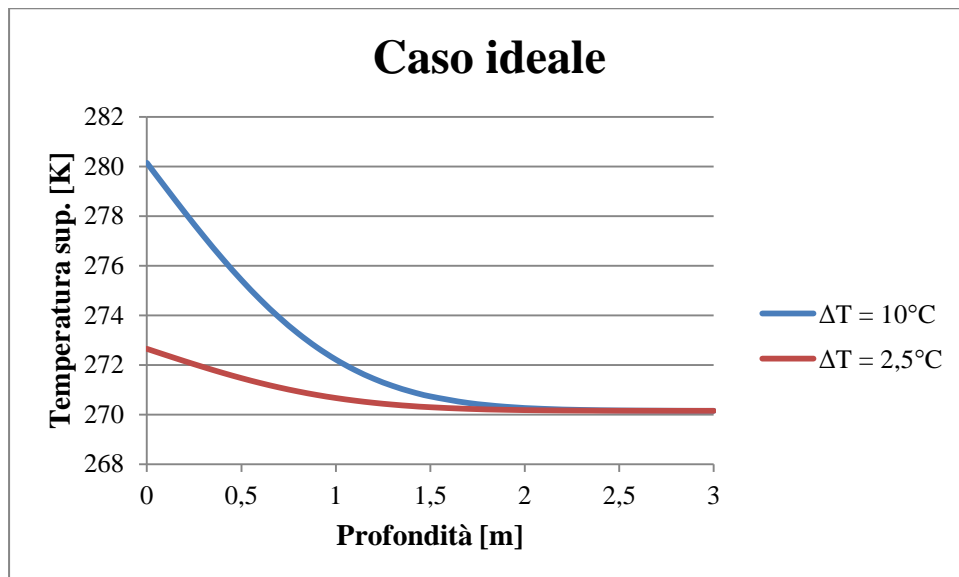


Fig. 6.1- Profilo di temperatura analitico caso ideale

La profondità che si riesce a sfruttare, come già trovato è di circa due metri, ed essa non dipende dalla differenza di temperatura superficiale ma dal tempo.

6.3 Primo pre-raffreddamento

Dal momento che per la verifica della profondità utile si deve partire da un profilo di temperatura e quello definito “obbiettivo” è quello di primo pre-raffreddamento, è stata eseguita anche questa prova. Si fa notare come la temperatura alla quale viene messo a contatto il provino “virtuale” è stata ipotizzata di circa un grado in più (o meno a seconda della prova) rispetto alla temperatura media dell’aria nella specifica situazione. Anche in questo caso la tabella è riportata in appendice (appendice F) ed il profilo risultante è (Fig. 6.2):

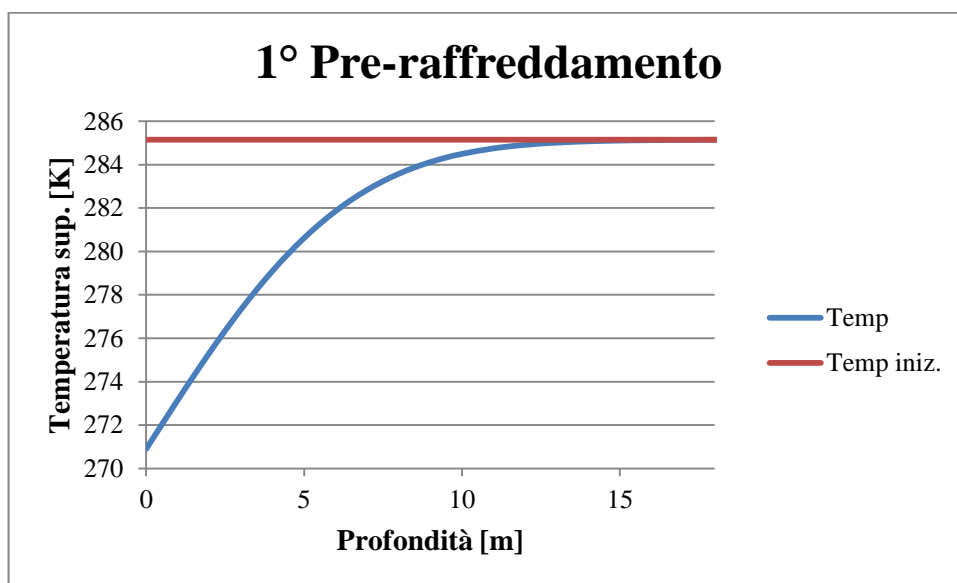


Fig. 6.2- Profilo analitico di 1° pre-raffreddamento

Se si fa il confronto col profilo ottenuto dalle simulazioni si nota come questi corrispondano, tuttalpiù si scostano di mezzo grado. Questo è dovuto ad approssimazioni ed alle ipotesi sopra fatte, cosa che nelle simulazioni non si hanno. E’ stata inoltre valutata l’entità delle energia utile necessaria in questa fase. Ovvero l’energia che si deve asportare per ottenere il profilo di temperatura visto sopra, sempre per via analitica. Questo è stato possibile suddividendo la roccia circostante la cella in un numero cospicuo di strati “concentrici” (mantenendo in ogni caso la forma originale della galleria). Per ognuno si è assegnato la temperatura media dello stesso e di conseguenza è stato possibile stabilire la differenza di temperatura necessaria rispetto alle condizioni iniziali. Attraverso la determinazione della lunghezza, profondità e spessore di ogni strato, è stato possibile ricavarne la massa. Ed infine, mediante il calore specifico misurato dai test in laboratorio, è stato possibile ricavare l’energia termica da assorbire da ogni singolo strato fino alla profondità a cui si ha scostamento di temperatura. Si è sommato ogni valore, il quale dividendolo per il tempo di preraffreddamento, ci ha fornito il valore medio di potenza per una cella, pari a 20,78 kW. Per un’energia totale di 60 MWh (appendice F).

6.4 Profondità utile ed energia recuperata

Per verificare la profondità utile, che è il parametro caratteristico principale, si parte dal profilo ottenuto sopra (Fig. 6.2) e si verifica che la roccia si riscaldi come precedentemente trovato durante il carico. Per questa prova si riporta una tabella con un numero limitato di righe (Tab. 6.1), quella completa è in appendice (appendice F).

Tabella 6.1- Risultati profilo temperatura al variare della profondità

profondità m	T sup. in K	T iniz. K	tempo s	Arg. erf	erf	T (X,t) K
0	279,15	270,90	259200	0,0000000	0,0000000	279,15
0,1	279,15	271,13	259200	0,0892841	0,100479	278,34
0,2	279,15	271,35	259200	0,1785681	0,199371	277,60
0,4	279,15	271,81	259200	0,3571362	0,386488	276,31
0,6	279,15	272,26	259200	0,5357044	0,551310	275,35
0,8	279,15	272,71	259200	0,7142725	0,687569	274,72
1	279,15	273,15	259200	0,8928406	0,793292	274,39
1,2	279,15	273,60	259200	1,0714087	0,870279	274,32
1,25	279,15	273,60	259200	1,1160508	0,885512	274,23
1,3	279,15	273,82	259200	1,1606928	0,899300	274,36
1,7	279,15	274,69	259200	1,5178290	0,968170	274,83
2,1	279,15	275,53	259200	1,8749653	0,991989	275,56
2,5	279,15	276,35	259200	2,2321015	0,998405	276,35
2,9	279,15	277,13	259200	2,5892378	0,999982	277,13
3	279,15	277,32	259200	2,6785218	0,999995	277,32
4	279,15	279,10	259200	3,5713624	0,999998	279,10
5	279,15	280,62	259200	4,4642030	0,999999	280,62
6	279,15	281,86	259200	5,3570436	0,999999	281,86

A cui segue il grafico (Fig. 6.3):

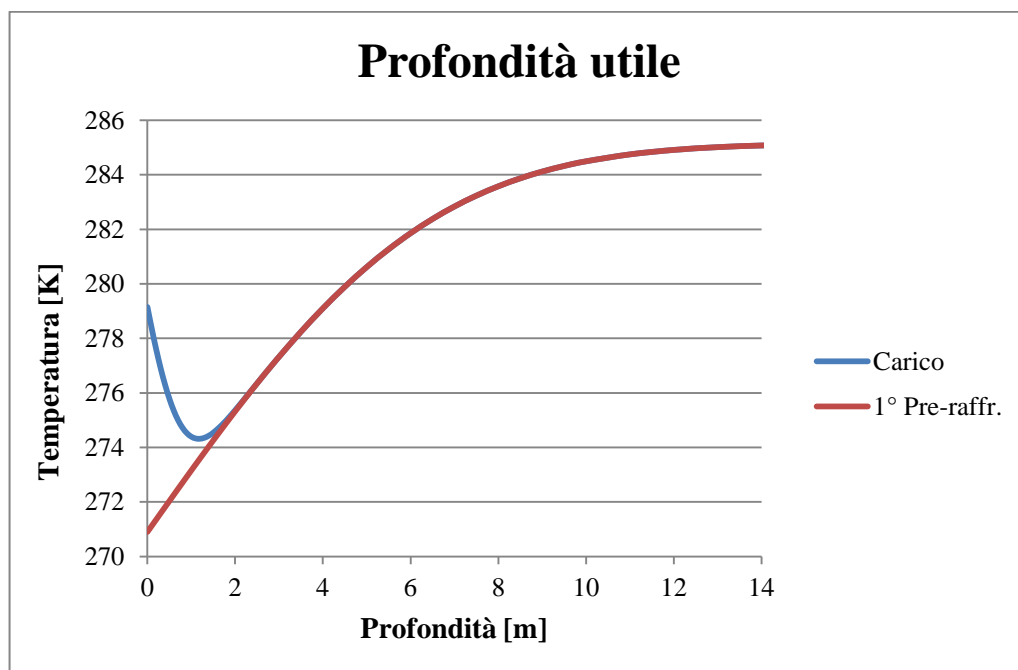


Fig. 6.3- Verifica analitica profondità utile

Da tabella si vede come la profondità utile risulta di 1,25 m, come da simulazione. Si è verificato anche che la profondità utile che si raggiunge in 12 ore è di 0,7 m. Inoltre si possono fare delle valutazioni di massima sull'energia scambiata, lasciando appunto la roccia alla temperatura di equilibrio (considerata costante) per tre giorni con mele a 25°C. Per fare questo è stato utilizzato lo stesso metodo (descritto al Cap. 6.3) secondo cui si stabilisce il calore da assorbire durante il primo pre-raffreddamento. Con questo metodo si ottiene che, in tali condizioni, si può assorbire un'energia pari a 3,3 MWh. Inoltre man a mano che il tempo passa, il punto a cui corrisponde la profondità utile si sposta sempre più in profondità, ma al tempo stesso aumenta la sua temperatura rispetto al profilo iniziale. Si avranno ulteriori dispersioni nella montagna, seppur esigue. Quindi si ha un'ulteriore conferma con quanto trovato nelle simulazioni.

6.5 Considerazioni sulle dispersioni di calore

Per valutare le dispersioni di calore nella roccia, si associa la galleria ad un cilindro cavo, il cui spessore di isolante aumenterà nel corso degli anni.

In particolar modo facendo riferimento alla Fig. 5.6, si valuta la dispersione per unità di superficie al secondo anno, quando questa vale 25 W/m².

Dopo questo lasso di tempo la profondità nella montagna alla quale si ha un significativo discostamento della temperatura dal valore iniziale è di 30 m, risultante sia dalle simulazioni che per via analitica.

Si fa notare che la curva di dispersione di Fig. 5.6 non rappresenta solo le dispersioni vere e proprie, come comunemente si intendono, ad esempio relativamente ad uno strato di isolante. Dove queste sono il calore da fornire (o in questo caso assorbire) per mantenere una determinata differenza di temperatura tra due superfici. Ma

comprendono pure il calore, non trascurabile, da assorbire dall' enorme massa di roccia. Come pure un qualcosa in più, che mi consenta di avanzare con il "fronte freddo" nella montagna, fondamentale per arrivare sempre più in profondità ed ottenere i vantaggi già visti nel momento in cui si andrà a spegnere l' impianto a celle vuote.

E' stato calcolato il coefficiente di trasmissione globale, di uno strato cilindrico, riferito alla superficie interna:

$$K_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{r_i * \ln(r_e/r_i)}{\lambda}}$$

Dove:

K_i [W/m²*K] = coeff. di trasmissione globale riferito alla superficie interna

α_i [W/m²*K] = coeff. di convezione superficie interna

r_i [m] = raggio interno cilindro

r_e [m] = raggio esterno cilindro

λ [W/m*K] = conduttività termica

Dal momento che all' esterno di questo strato, è presente ancora roccia, il coefficiente di convezione esterno normalmente presente in questa formula, è stato omissso.

Approssimando il valore del raggio interno a 6 m, e utilizzando i valori dei parametri già utilizzati in quest' analisi, si trova che questo coefficiente di trasmissione globale vale 0,271 W/m²*K. Il quale se viene moltiplicato per gli 11 °C di differenza di temperatura tra i due strati di roccia considerati, si ottiene 2,98 W/m².

Per la determinazione della quantità di energia da assorbire, per il solo raffreddamento della roccia in questione, si è usato lo stesso metodo descritto nel Cap. 6.3 (vedi Appendice G).

Da questa valutazione analitica emerge che, la quantità di energia termica totale da assorbire in questi due anni, è di 177 MWh_t. Il che equivale a 10,12 kW_t medi. Si ricordi come durante il primo pre-raffreddamento (considerandolo però alla temperatura di mantenimento) era stato trovato un valore di circa 15 kW_t, giustamente superiore essendo durante la fase iniziale. Riferendoci sempre alla singola cella e trascurando le dispersioni sulle pareti di testa e di fondo di ogni galleria. Le dispersioni attraverso la superficie risultano essere di 13,43 W/m².

Sommando i due valori trovati si hanno circa 16,5 W/m², i quali sarebbero necessari solo al mantenimento costante della temperatura a quella profondità. I restanti 8,5 W/m² servono come flusso supplementare per aumentare il diametro del cilindro di roccia fredda, che con una profondità di 35 m dal centro della cella ha una circonferenza di 220 m. A tale profondità il flusso si riduce per unità di superficie fino a 1,5 W/m².

Dopo queste valutazioni si può affermare che il fatto di considerare la roccia, seppur di spessori rilevanti, come un isolante non è corretto. Però questo fatto non è del tutto penalizzante, difatti lo si sfrutta per recuperare energia durante il carico e per creare un nucleo freddo nella montagna entro il quale ricavare le gallerie. Le quali trarranno beneficio nel poter sfruttare il calore già assorbito da altre gallerie. Questo fatto è importante perché permette di risparmiare energia, facendo sì che il totale dei

consumi per dispersione rapportato all' unità di massa vada diminuendo negli anni e all' aumentare delle celle ipogee ricavate.

Cosa che per i magazzini convenzionali non si ha. Infatti il consumo energetico del singolo è indipendente dal numero di celle frigorifere che si trovano nelle vicinanze.

7. Potenza installata e gestione impianto

Come parte conclusiva di questa analisi si va a considerare l' impianto nel suo intero. Quindi si definirà la potenza totale da installare, in base ai risultati finora ottenuti e come questa potenza verrà gestita nelle varie celle. Si va di conseguenza a stimare il funzionamento dello stesso e i relativi consumi.

Nei capitoli precedenti sono stati trovati i valori caratteristici di potenza media che si hanno nelle varie fasi del processo di conservazione delle mele. Quelle che riguardano l' impianto di refrigerazione sono fondamentalmente tre. La potenza totale iniziale di mantenimento è stata stimata di 48,5 kW, comprendente quella persa e per respirazione. Quella di pre-raffreddamento che varia dai 68 ai 58 kW a seconda di quanto prima spengo l' impianto dopo lo scarico. Per esse si suppone un funzionamento continuo (24 ore giornaliere), anche se non sarà così, perché sono potenze medie.

Mentre quella nella fase di carico è stimata sui 200 kW per le prime tre notti e un giorno, di soli 100kW nei restanti sette giorni in quanto man mano che la temperatura della frutta cala il calore scambiato va estinguendosi. Per queste due potenze si considera un funzionamento di 16 o 8 ore invece delle 24 o 12 ore canoniche, per il fatto che una cella su tre a rotazione viene spenta. Anche se poi nel conteggio, la potenza media impiegata settimanalmente viene spalmata su tutto il periodo. Più un' esigua potenza persa "continua" (24 ore su 24) di 15 kW. La quale è bassa in quanto riferita alla superficie della cella, e lavorando a temperature superiori a quelle di pre-raffreddamento prima di avere perdite consistenti si deve aspettare che il profilo alla profondità utile si porti almeno al pari della temperatura superficiale.

La modalità di gestione dell' impianto migliore, a seguito delle ottimizzazioni fatte, è quella rappresentata in Tab. 7.1. Per arrivare a tale conclusione si ricorda che il calore da assorbire è quello che si potrebbe avere nelle peggiori condizioni (mele molto calde). E' stata ipotizzata la necessità di svuotare una cella ogni due settimane a partire da marzo, e che si carichino tre celle a settimana (in realtà lo si farà in tempi più lunghi). Non sono stati sommati i consumi relativi al funzionamento dei ventilatori, delle pompe, al mantenimento dell' atmosfera controllata e quelli per lo sbrinamento delle batterie alettate.

Sull' asse delle ordinate è riportato il tempo, suddiviso nelle 52 settimane annuali, mentre quello delle ascisse individua ogni singola cella. In ogni riquadro è stata inserita la quantità di energia consumata da quella cella in quella settimana in MWh_t. Le varie fasi sono state distinte dai colori di sfondo: giallo per il mantenimento, azzurro per il pre-raffreddamento, rosso per il carico e ocra per la transizione da carico a mantenimento.

Tabella 7.1- Organizzazione impianto

		cella											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
settimane													
1	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
...	...												
9	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
10	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
11		8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
12		8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
13			8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
14			8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
15				8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
16				8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
17				8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
18					8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
19					8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
20						8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
21						8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
22							8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
23							8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
24								8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
25								8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
26									8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
27									8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
28										8,15	8,15	8,15	8,15
29	1,63										8,15	8,15	8,15
30	11,42	11,42	9,50								8,15	8,15	8,15
31	11,42	11,42	11,09	4,75	1,56							8,15	8,15
32	11,42	11,42	11,09	11,09	10,92	10,92						8,15	8,15
33	11,42	11,42	11,09	11,09	10,92	10,92	6,24	4,68					8,15
34	11,42	11,42	11,09	11,09	10,92	10,92	10,92	10,92	10,25				8,15
35	11,42	11,42	11,09	11,09	10,92	10,92	10,92	10,92	10,25	7,32			
36	15,32	15,32	15,32	11,09	10,92	10,92	10,92	10,92	10,25	10,25	9,74	8,35	
37	11,33	11,33	11,33	15,32	15,32	15,32	10,92	10,92	10,25	10,25	9,74	9,74	
38	8,15	8,15	8,15	11,33	11,33	11,33	15,32	15,32	15,32	10,25	9,74	9,74	
39	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	11,33	11,33	11,33	15,32	15,32	15,32	
40	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	11,33	11,33	11,33	
41	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	
...	...												
52	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15

Si nota subito la convenienza nello spegnere l' impianto una volta scaricata la cella. Inoltre i consumi in pre-raffreddamento non sono poi molto superiori a quelli in mantenimento considerando, in quest' ultimo, la respirazione della frutta. Pure il fatto di fare la rotazione tra celle in carico porta ad una riduzione dei consumi, di circa 100 MWh_t. Si avranno delle tempistiche di raffreddamento più lunghe, che ipotizzando carichi successivi ripetuti, porteranno ad avere due gruppi di celle in carico sovrapposte. Ma questo non crea problemi, in quanto ho in ogni caso meno potenza impiegata complessivamente.

Dalla Tab. 7.1 sopra, risulta che la settimana 37 è quella che, con le ipotesi fatte, richiede l' impiego di maggior potenza. La quale mediamente è di 845 kW_t, ma ovviamente si installerà un valore superiore.

Per la determinazione della potenza totale da installare si adopera il metodo con cui Melinda valuta la potenza necessaria anche per le celle fuori terra. Nel dimensionamento considerano 14 kW_t termici a vagone (1,4 kW_t/ton). Mentre per il consumo energetico hanno riscontrato un valore dai 0,09 ai 0,1 kWh/Kg. Quindi se giornalmente arrivano 81 vagoni (ripartiti su tre celle) dovrò aver a disposizione 1130 kW termici complessivi. Questa potenza viene coperta con gruppi frigo da 330 kW_t, dovendone installare quattro si ha una potenza complessiva di 1320 kW_t. La quale sarà sufficiente a coprire il fabbisogno dell' impianto. Nella Tab. 7.2, si riporta settimana per settimana, la somma complessiva dell' energia consumata dalle celle, la potenza media corrispondente e la percentuale di potenza impiegata.

Tabella 7.2- Consumi e potenza media impiegata settimanalmente

	E consumata	P media	% carico		E consumata	P media	% carico
settimane	MWh _t	kW _t		settimane	MWh _t	kW _t	
1	97,78	582	0,44	26	32,59	194	0,15
...	...			27	32,59	194	0,15
9	97,78	582	0,44	28	24,44	146	0,11
10	97,78	582	0,44	29	26,08	155	0,12
11	89,63	534	0,40	30	56,80	338	0,26
12	89,63	534	0,40	31	56,54	337	0,25
13	81,48	485	0,37	32	83,16	495	0,38
14	81,48	485	0,37	33	85,93	512	0,39
15	73,33	437	0,33	34	107,10	638	0,48
16	73,33	437	0,33	35	106,27	633	0,48
17	73,33	437	0,33	36	139,32	829	0,63
18	65,18	388	0,29	37	141,78	844	0,64
19	65,18	388	0,29	38	134,14	798	0,60
20	57,04	340	0,26	39	128,84	767	0,58
21	57,04	340	0,26	40	107,33	639	0,48
22	48,89	291	0,22	41	97,78	582	0,44
23	48,89	291	0,22	...			
24	40,74	243	0,18	52	97,78	582	0,44
25	40,74	243	0,18				

Si riporta il grafico relativo alla tabella sopra esplicitando la percentuale di potenza impiegata, evidenziando le fasce coperte da ciascun gruppo frigo (Fig. 7.1).

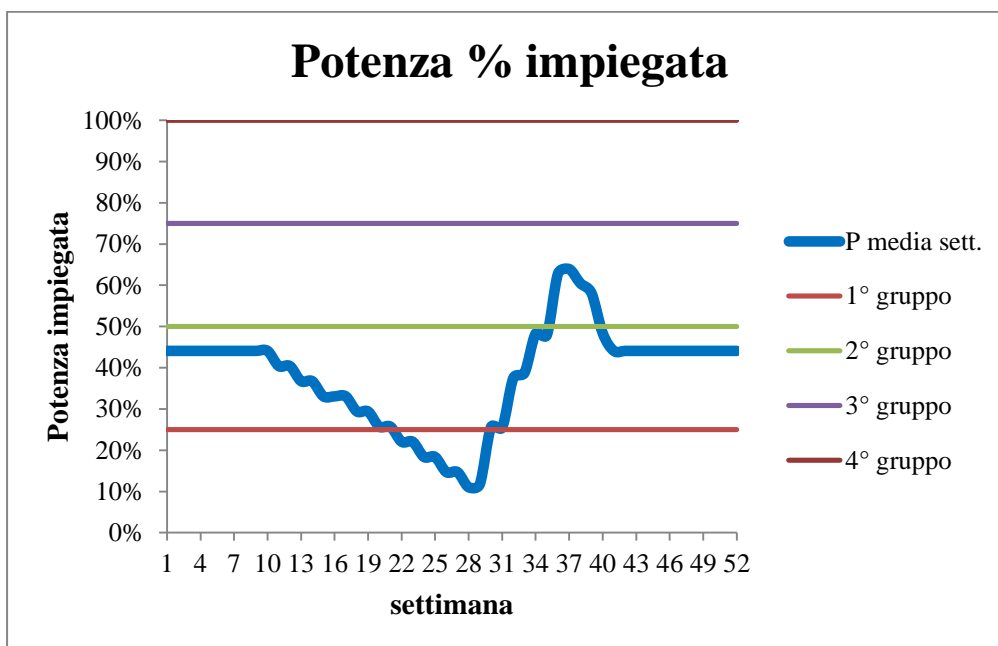


Fig. 7.1- Percentuale potenza impiegata settimanalmente

Solo durante le fasi di carico si va ad interessare tre dei quattro gruppi frigo. Sfruttando mediamente al massimo il 64% della potenza totale. Durante la maggior parte dell' anno se ne avranno in funzione solo due. Se si volesse supporre che durante la settimana di picco vi sia una contemporaneità nel funzionamento delle celle, la potenza istantanea richiesta sarebbe di 975 kW, comunque inferiore rispetto alla totale. Si deve considerare il fatto, che tale sovradimensionamento, servirà anche per soddisfare il fabbisogno delle gallerie che verranno costruite in futuro.

Il consumo annuale stimato è di 4400 MWh_t nel primo anno completo (che sarà il 2015). Se alla Tab. 7.1 vengono sostituiti i valori che si avranno, in mantenimento e pre-raffrescamento, dopo svariati anni di funzionamento (al ventesimo anno ho rispettivamente 31,69 kW e 57,17 kW medi), il consumo dell' impianto scende a circa 2920 MWh_t. Il 33,4% in meno. La percentuale di potenza massima sfruttata dell' impianto in carico e pre-raffreddamento rimarrà invariata, dal momento che le condizioni di ingresso della frutta e fine mantenimento sono costanti, ma durante il lungo periodo di conservazione, negli anni, si utilizzerà solo il 29 % della totale potenza disponibile.

Nel primo anno (2014) il consumo totale sarà di 4083 MWh_t, nonostante l' energia spesa per raffreddare la montagna sia cospicua. Questo perché nei primi mesi, quando ancora l' impianto è in fase di realizzazione, non si hanno consumi.

Per stabilire se i consumi annui stimati possano essere veritieri, li si confronta con quelli riscontrati nella cella sperimentale. Essa è all' inizio della propria "vita", quindi volendo escludere il primo pre-raffreddamento, si vanno a considerare il periodo dal 2 agosto 2012 all' 1 agosto 2013. In questo periodo i consumi elettrici ammontano a 55 MWh_e, e avendo un COP di 2,7 ottengo 150 MWh_t. Il confronto tra i consumi specifici per unità di superficie e volume sono visibili in Tab. 7.3.

Tabella 7.3- Confronto consumi annuali tra impianto e cella sperimentale

	consumi tot	superficie	volume	E/S	E/V
	MWh _t	m ²	m ³	MWh _t /m ²	MWh _t /m ³
cella sperimentale	150	456	576	0,329	0,260
impianto	4400	13786	37583	0,319	0,117

Considerando l' approssimazione nel considerare, nella cella sperimentale, quasi due periodi di pre-raffreddamento successivi, i valori trovati possono in ogni caso considerarsi veritieri e rappresentativi delle condizioni che si andranno a verificare. I consumi specifici per unità di volume sono circa costanti, mentre quelli per unità di superficie sono (giustamente) inferiori man a mano che le dimensioni aumentano.

L' energia persa nella montagna nel corso degli anni (Fig. 5.6) va riducendosi fino al 50% del valore iniziale, mentre quella per pre-raffreddamento cala del 40%. Ma questo, come erroneamente si potrebbe pensare, non porta ad un' altrettanta riduzione in percentuale dei consumi, perché ci sono dei carichi che rimangono costanti negli anni. Quali il calore di respirazione che dipende dalla quantità di frutta, l' energia per abbattere la temperatura funzione di temperatura e quantità. Di seguito si riporta un grafico (Fig. 7.2) in cui si vede la previsione dell' andamento dell' energia termica alla quale l' impianto di refrigerazione dovrà far fronte nel corso degli anni, evidenziando il consumo totale e distinguendo quelli di cui è composto.

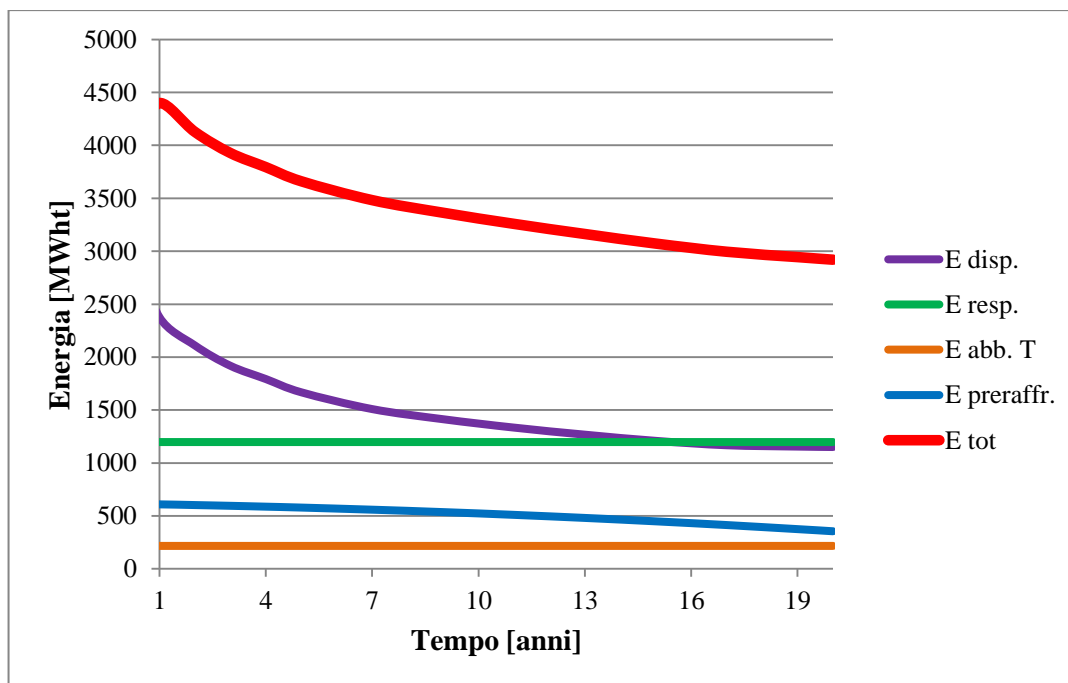


Fig. 7.2- Fabbisogno di energia termica in funzione del tempo

L' energia elettrica richiesta dai gruppi frigo per far fronte a tale richiesta dipende dal coefficiente di effetto utile dell' impianto stesso. Esso sarà della stessa tipologia di quello usato per la cella sperimentale, con le dovute proporzioni ed utilizzerà come

fluido frigorifero l' ammoniaca. Il COP (o EER) stimato di quest' impianto, per determinare i consumi elettrici dei gruppi frigo, è pari a 4 [18].
Di conseguenza i consumi per le prime due gallerie, col passare degli anni, passeranno dai 1100 MWh_e ai 730 MWh_e.

8. Confronto con cella di frigoconservazione tradizionale

Termine di paragone importante è quello che si consumerebbe se questa quantità di frutta venisse immagazzinata nelle consuete celle fuori terra.

Dal momento che non è stato possibile ottenere i consumi della cella fuori terra “parallela” a quella sperimentale ipogea, è stata fatta una stima cercando nella letteratura tra le fonti più autorevoli e significative.

Per effettuare questo confronto si useranno dei valori specifici, di energia e di costi, per unità di massa. Si rende quindi necessario determinare il costo dell’ energia elettrica per Melinda, ma senza entrare nel dettaglio su costi fissi e variabili.

Considerando che il consumo totale di energia per le mele ammonta a 44 milioni di kWh all’ anno, con la bolletta che sfiora i 5 milioni di euro, otteniamo un costo approssimativo di 0,1136 €/kWh [21].

Ricordiamo (Cap. 7) come il consumo di energia elettrica (magazzini ipogei) passi dai 1100 MWh_e, al primo anno, ai 730 MWh_e al ventesimo anno. Sono stati suddivisi in Tab. 8.1 i consumi specifici dei vari carichi, e quelli totali.

Tabella 8.1- Consumi specifici per la frigoconservazione impianto ipogeo

	1° anno	20° anno	
dispersioni	61,12	29,59	kWh _e /t
calore respirazione	30,80	30,80	kWh _e /t
abbattimento T	5,58	5,58	kWh _e /t
pre-raffr.	15,66	9,13	kWh _e /t
Totale	113,16	75,10	kWh_e/t

Da quanto trovato sopra, in Tab. 8.2 sono stati inseriti anche i costi specifici, e questi valori serviranno per il confronto che si andrà a fare.

Tabella 8.2- Consumi e costi specifici per la frigoconservazione impianto ipogeo

	1° anno	20° anno	
consumo specifico	113,16	75,10	kWh _e /t
costo specifico	12,8	8,53	€/t

La produzione totale di Melinda è di 300000 ton di mele l’ anno, dove per la frigoconservazione delle stesse si consumano 31 milioni di kWh. Di questi 5 milioni servono per abbattere la temperatura delle mele, i restanti 26 milioni per la gestione della temperatura. I quali si dividono tra dispersioni, 17 milioni, e per mantenere l’ atmosfera, 9 milioni di kWh. In Tab. 8.3 si trovano i consumi specifici, mentre nella Tab. 8.4 i consumi e costi specifici delle convenzionali celle fuori terra. Questi si

considerano costanti nel corso degli anni, anche se oscilleranno in funzione della temperatura esterna.

Tabella 8.3- Consumi specifici per la frigoconservazione convenzionale

dispersioni	56,67	kWh _e /t
mantenimento atm.	30	kWh _e /t
abbattimento T	16,67	kWh _e /t
Totale	103,34	kWh _e /t

Tabella 8.4- Consumi e costi specifici per la frigoconservazione convenzionale

consumo specifico	103,34	kWh _e /t
costo specifico	11,74	€/t

Quindi se facciamo un confronto tra le due tipologie di conservazione otteniamo che, nei primi anni quando ancora ho uno strato di roccia fredda “esile” nella tipologia in ipogeo i consumi sono superiori, ma questi in poco tempo rispetto alla vita utile dell’ impianto, vanno ad essere inferiori. Questo ci porta ad affermare che questa tipologia di impianto di frigoconservazione sia un’ ottima alternativa agli impianti tradizionali. Il contributo maggiore è dato dalle dispersioni, il quale è anche l’ unico che può calare considerevolmente. Il calore per la respirazione come visto è uguale, mentre i consumi per l’ abbattimento della temperatura sono superiori nella cella ipogea per la maggior parte degli anni, ma solo perché vanno sommati anche quelli per il pre-raffreddamento. In ogni caso questo aumento è accettato perché porta alla riduzione dei tempi di raffreddamento, altro obiettivo importante da raggiungere.

Per le due gallerie realizzate finora, oggetto di questo studio, il risparmio di energia inizierà già dal terzo anno di funzionamento. Esso potrà arrivare fino al 27,2% al ventesimo anno, con un risparmio di circa 275 MWh quantificato in 31000 € (Fig. 8.1).

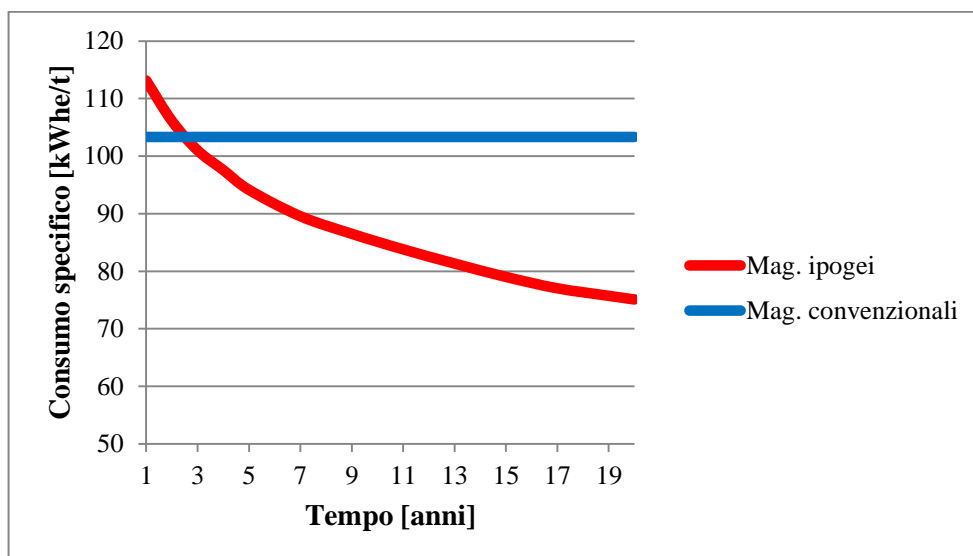


Fig. 8.1- Confronto consumi specifici per magazzini ipogei e convenzionali

Tale risparmio monetario non è da sottovalutare neppure quando si parla di enormi volumi di merce. Questo perché oltre che al ridotto consumo di energia, questa tipologia di impianto consente di risparmiare un 20 % sui costi di costruzione e un 30% sui costi di gestione (assicurazione, manutenzione, etc.).

Ulteriori risparmi di energia si potrebbero ottenere nel momento in cui entreranno in funzione le gallerie di futura costruzione. Queste sfrutterebbero in parte la roccia fredda già presente, e si potrebbero riscontrare ridotte perdite soprattutto per le celle al centro del complesso di gallerie.

9. Ampliamenti futuri

Nel caso la scelta di questo tipo di frigoconservazione si rivelasse azzeccata anche su grandi volumi, a seguito dell'entrata in funzione delle prime due gallerie, si amplierà l'impianto costruendo e facendo entrare in funzione altre gallerie adibite a magazzino naturale. Queste porteranno ulteriori vantaggi in termini di consumi energetici in quanto frutteranno in parte il calore assorbito delle celle vicine.

In fig. 9.1 si possono osservare in arancione gli spazi che entreranno in funzione nella primavera del 2014, quelle in grigio sono gli ampliamenti che si potrebbero realizzare tra 3-5 anni.



Fig. 9.1- Possibili ampliamenti tra 3-5 anni

Le quali celle di conservazione saranno uguali a quelle studiate in quest'analisi, in numero e dimensione. Mentre tra 6-8 anni si potrebbe realizzare anche un "secondo piano" di magazzini (Fig. 9.2). Queste gallerie saranno solo quattro, e due di esse avranno due celle in più a testa.



Fig. 9.2- Possibili ampliamenti tra 6-8 anni

Ad impianto ultimato la capacità totale sarà di circa 52000 tonnellate di frutta, circa un sesto della produzione totale di Melinda.

E' stato possibile passare, quindi, alla quantificazione del risparmio di energia. I carichi principali a cui dovranno far fronte i gruppi frigo oggetto di questo studio, sono: le dispersioni nella roccia, l' energia di preraffreddamento, il calore di respirazione e l' energia per abbattere la temperatura. Dal momento che solo i primi due di questi variano nel tempo è stata fatta una valutazione solo su essi. Inoltre si ipotizza che le gallerie entrino in funzione tutte contemporaneamente, invece di essere scandite nel tempo, perché non è possibile interrompere la simulazione una volta iniziata. Senza contare il fatto che non si è in possesso di informazione su quale sia la sequenza esatta di realizzazione. Come temperatura di raffreddamento da impostare nel modello nelle condizioni al contorno si sceglie quella di mantenimento, perché è quella che è presente per il tempo più lungo ed è la più rappresentativa del fenomeno (come fatto per la Fig. 5.3). Per distinguere le gallerie, le si numera (Fig. 9.3).

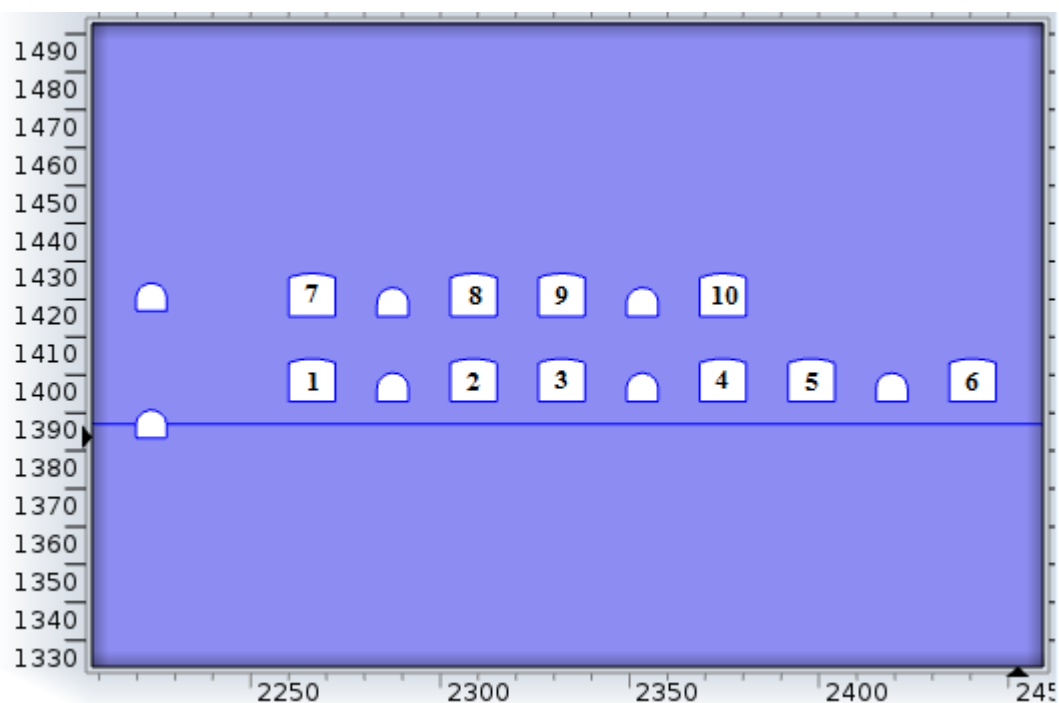


Fig. 9.3- Numerazione gallerie

Successivamente si prosegue con la simulazione, il cui grafico con i flussi dispersi per ogni galleria è raffigurato in Fig. 9.4, poi si trova nello specifico solo l' ultimo periodo (Fig. 9.5) e infine si riporta pure quello relativo alla temperatura che si ha attorno al complesso dopo 20 anni (Fig. 9.6).

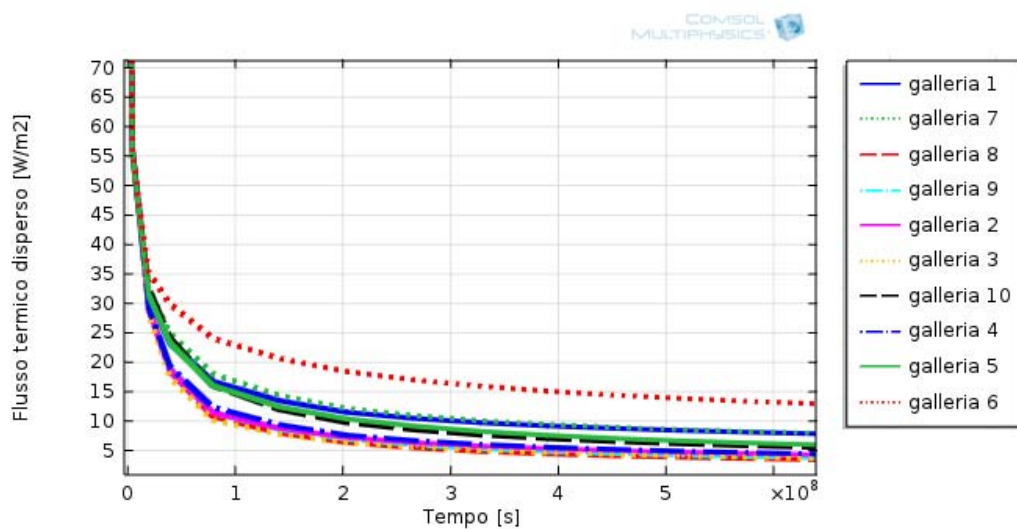


Fig. 9.4- Flusso disperso per ogni galleria in 20 anni

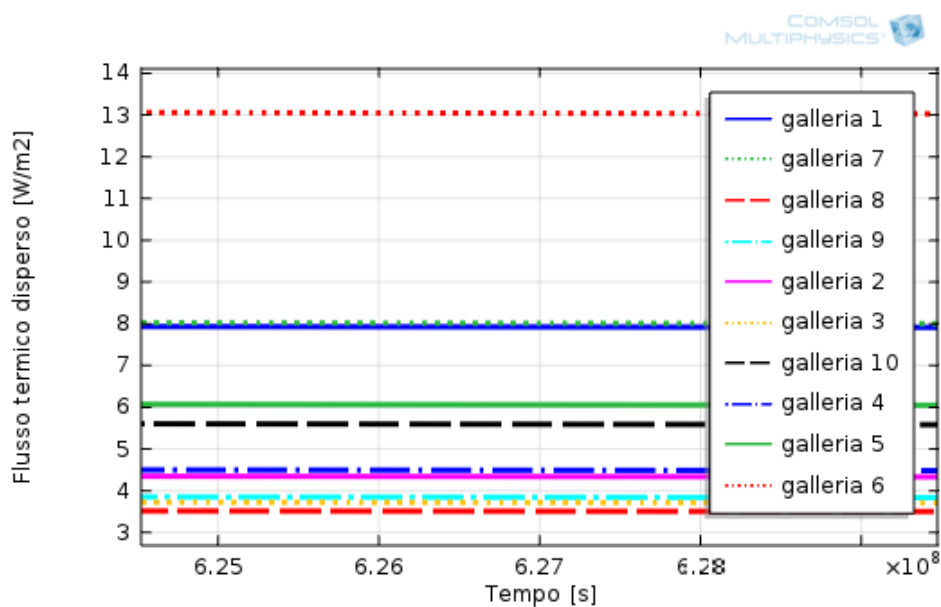


Fig. 9.5- Flusso disperso per ogni galleria a 20 anni

Il calore da assorbire dalla montagna diminuisce negli anni man a mano che la roccia si raffredda. L'andamento è uguale per ogni galleria, ma non nella quantità. Si può osservare distintamente come la dispersione per la galleria 6 sia superiore alle altre, trovandosi quasi isolata dal gruppo ed essa è solo di poco inferiore rispetto a se avessimo solo due gallerie. Per le due più a sinistra del blocco (1 e 7) si ha un consumo intermedio fra la galleria 6 e le restanti. Quelle più al centro invece disperdono decisamente meno, circa $4,5 \text{ W/m}^2$, quasi un terzo della galleria 6.

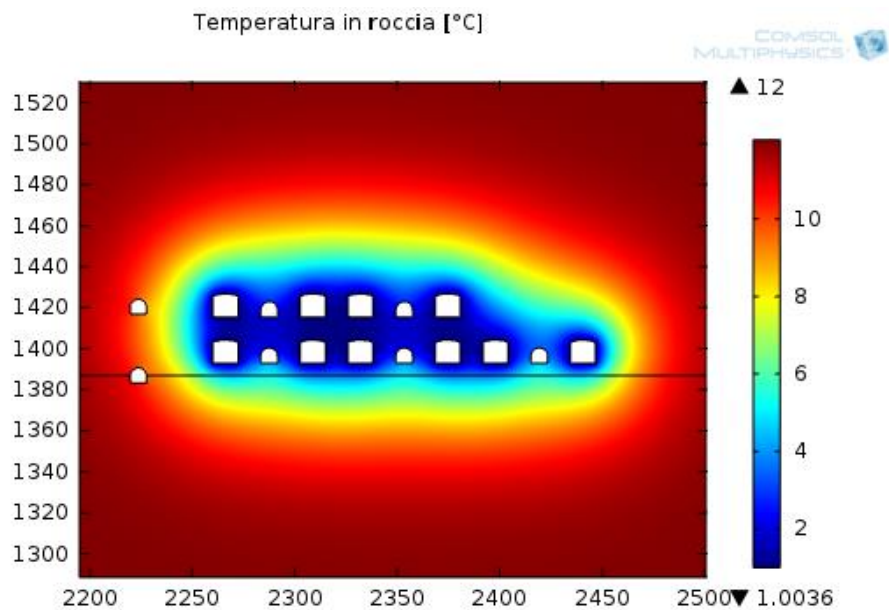


Fig. 9.6- Temperatura in roccia dopo 20 anni

Anche per quel che riguarda la temperatura che andrà ad avere la montagna, dopo svariati cicli di funzionamento, fa cogliere quali gallerie avranno più dispersioni o meno. Si nota anche la convenienza nel scavare i vari blocchi nel modo più compatto possibile.

Dalla simulazione è stato ricavato anche il flusso medio disperso da tutte le gallerie, per semplificare la previsione sui risparmi energetici conseguibili (Fig. 9.7).

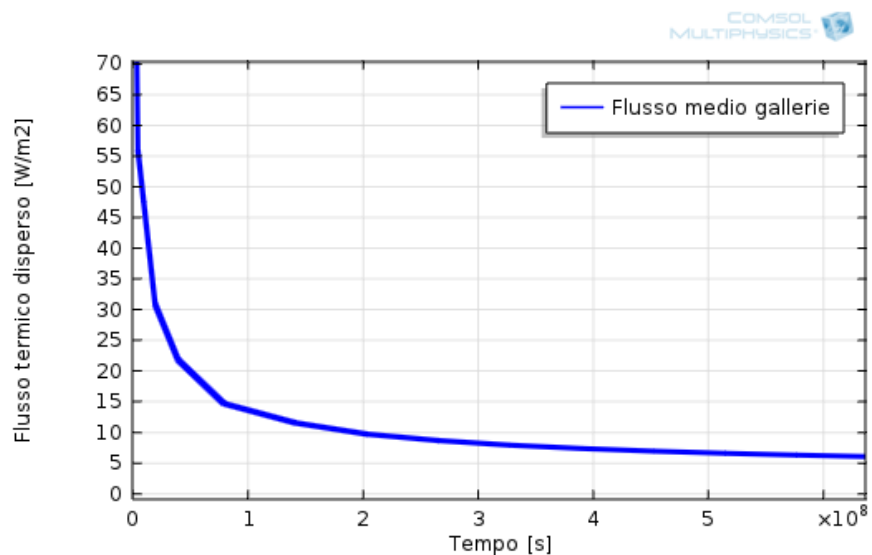


Fig. 9.7- Flusso termico medio di tutte le gallerie disperso in 20 anni

Di questo grafico è stato considerato solo l'ultimo periodo, in cui tutte le gallerie saranno in funzione. Esso presenta un andamento lievemente decrescente, per arrivare ad avere un valore di 6 W/m^2 medio. Quindi si ha interesse nel far entrare al

più presto in esercizio tutte le gallerie al fine di risparmiare energia. Mediamente per unità di superficie le dispersioni saranno meno della metà rispetto ai primi due blocchi.

Si è passati quindi alla determinazione dell' energia per il pre-raffreddamento, funzione della quantità di tempo che ogni cella rimane senza impianto di raffreddamento acceso. Non essendo ancora state definite le modalità di gestione dell' impianto è stato ipotizzato che tutte le gallerie, partendo dal profilo di temperatura nella roccia che si ha al diciannovesimo anno, restino spente per 7 mesi. Condizione più gravosa per ogni cella. Si è andati a misurare quale sia l' aumento di temperatura medio per l' itero impianto, in Fig. 9.8 si vede il profilo iniziale e finale di una cella centrale.

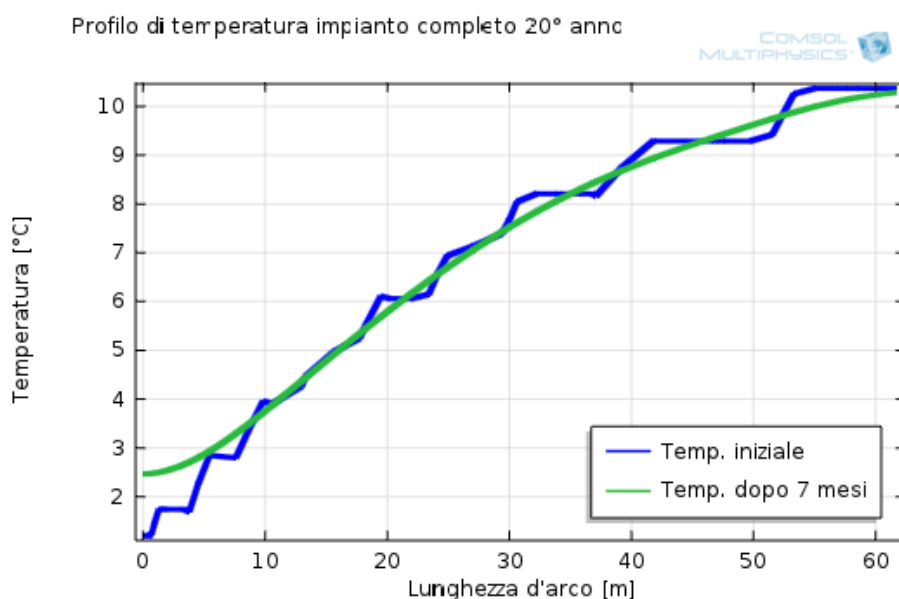


Fig. 9.8- Profilo di temperatura impianto completo con spegnimento impianto

Si ottiene che mediamente la temperatura sulle superfici delle celle aumenta di 1 °C, portandosi a 2,22 °C finali. Questo perché dopo molti anni la roccia è fredda a profondità elevate, a causa del relativamente alto coefficiente di conduzione termica della stessa, rendendo il processo di naturale omogeneizzazione della temperatura molto lento. Questo ci consente di poter mettere in gioco (vedi Appendice E) una potenza a cella di 58 kW anche per meno tempo di 21 giorni rispetto al carico successivo.

Seguendo la metodologia per il conteggio dei consumi energetici usata nei capitoli precedenti si stima che al ventesimo anno di funzionamento, con impianto completo, si dovrà mettere in gioco con i gruppi frigo un' energia di 12 GWh_t , ovvero 3 GWh_e per la conservazione di 52 mila tonnellate di mele.

Il confronto con i valori specifici trovato precedentemente è riportato in Tab. 9.1:

Tabella 9.1- Confronto consumi e costi specifici tra tutto l' impianto completo, le sole due gallerie e una cella fuori terra convenzionale

	impianto completo	2 gallerie	celle fuori terra	
dispersioni	12,84	29,59	103,34	kWh _e /t
calore respirazione	30,80	30,80		kWh _e /t
abbattimento T	5,58	5,58		kWh _e /t
pre-raffr.	9,02	9,13		kWh _e /t
Totale consumi	58,24	75,10	103,34	kWh_e/t
Totale costi	6,616	8,531	11,739	€/t

Dalla tabella sopra si può vedere che i consumi e costi specifici per la frigoconservazione potrebbero ulteriormente diminuire facendo impianti ipogei il più grandi e compatti possibile.

Con quest' impianto si potrà arrivare ad un risparmio in bolletta del 43,6%, corrispondente a 2,35 GWh_e e 266 mila euro l' anno.

Conclusioni

Terminata l'analisi energetica, sui magazzini ipogei di conservazione della frutta richiesta da Melinda, come conclusione di questo lavoro verranno tracciati i punti fondamentali della stessa.

Per prima cosa si fa una panoramica su quello che è la conservazione delle mele in atmosfera controllata e cosa questa comporta. Punti fondamentali sono stati appurare che qualitativamente il mantenimento in ipogeo sia possibile se non migliore di un pari impianto fuori terra. La quantificazione del calore emesso dalle stesse per la respirazione è di 200 KW costanti in tutto il periodo di mantenimento.

E' stato descritto dettagliatamente l'impianto per poter cogliere le dimensioni dello stesso e per farsi un'idea degli ordini di grandezza con cui si effettuerà il lavoro. Trattasi di un volume di 37500 m³ suddiviso in due gallerie, per una capienza di 9700 ton di frutta.

Il cuore della montagna in cui si realizzeranno i magazzini è caratterizzato da un tipo di roccia sedimentaria, la Dolomia. Da analisi condotte da laboratori specializzati si sono trovate le caratteristiche di densità, calore specifico e conducibilità termica della roccia. Ed attraverso misurazioni sul campo è stata constatata una temperatura costante di 12°C.

Per analizzare al meglio il comportamento del sistema alle sollecitazioni termiche, sono state fatte diverse simulazioni, mediante software agli elementi finiti: COMSOL Multiphysics. I modelli realizzati possono essere divisi in due gruppi, in uno è stato studiato il solo comportamento della roccia, nell'altro l'iterazione che vi è tra la frutta e la montagna, in varie situazioni. Cercando in entrambi di ottimizzare quelli che sono gli obiettivi che si vorrebbero raggiungere, ovvero: risparmio nei consumi energetici, riduzione dei tempi di abbattimento della temperatura della frutta e recuperare la massima energia immagazzinata nella roccia.

Questi modelli sono stati validati da dati sperimentali relativi ad una cella di prova, uguale alle gallerie che si andranno a realizzare, ma con dimensioni inferiori. I valori di temperatura nella montagna e consumi elettrici, sono stati registrati giornalmente nel corso dell'ultimo anno e mezzo, ed utilizzati per avere uno storico degli stessi. Inoltre sono stati usati dati relativi a quantità e temperatura delle mele immagazzinate, caratteristiche dell'impianto frigorifero e dimensioni della cella in oggetto. Terminata l'analisi dei valori sperimentali fornitoci ed appurato che i risultati dei modelli rispecchiano quelli reali, si è passati alla creazione delle simulazioni relative alle gallerie più grandi. Queste, per una maggiore completezza, sono dedicate in funzione della fase in analisi.

La prima, anche da un punto di vista temporale, è il primo pre-raffreddamento. Questa fase serve a creare uno strato di roccia fredda intorno alla cella, in modo che nel momento in cui vado ad immagazzinare le mele, contribuisca a raffreddarle e faccia in modo che non vi siano dispersioni verso l'esterno. Ma per creare questa condizione occorre assorbire una potenza media di 65 W/m², la quale mi permette di modificare il gradiente di temperatura fino a 12 m di profondità.

Successivamente si ha il carico ed il mantenimento. Quest'ultimo rappresenta il periodo più lungo di tutto il processo e influisce in modo consistente sui consumi energetici annuali. I carichi a cui far fronte sono due. Uno è il calore generato dalle mele e pari a 16,5 KW/cella costanti, l'altro è quello disperso nella montagna e diminuisce col passare degli anni. Inizialmente è pari a 29 W/m² per poi calare fino a

14 W/m². Nel corso degli anni la profondità alla quale si raffredderà, considerando la praticamente continuità di temperatura fredda in cella, è sui 70 m.

Al termine del mantenimento seguirà il pre-raffrescamento, in modo da riportarsi ad una condizione di carico ottimale. Sono state considerate due varianti, le quali si distinguono nel mantenere o meno la temperatura in cella bassa dopo lo scarico della stessa. Si è osservato come le non trascurabili perdite nella roccia, nel primo caso, e il lento aumento naturale della temperatura superficiale nel secondo caso (2 °C/mese), facciano preferire la seconda metodologia. Questo a scapito di iniziare prima il periodo di pre-raffreddamento di circa 20 giorni ed impiegare una potenza media superiore, sui 64 KW/cella. Ma nel complesso si ha un consistente risparmio di energia, fino a 100 MWh/cella. Inoltre nel corso degli anni questi consumi diminuiranno fino ad arrivare quasi al caso in cui si mantenga la temperatura in cella fino al momento del pre-raffrescamento.

Il carico delle celle è stato analizzato in maniera scrupolosa, essendo la parte più importante del processo. Dapprima ci si è concentrati sui cassoni pieni di frutta, ai quali sono stati trovati i valori equivalenti da assegnare per rispettare l' energia da assorbire e l' andamento delle temperature in essi. La potenza da asportare nei primi giorni, con le ipotesi fatte, è di 73 W/cassone, con un' energia complessiva a cella di 20,3 MWh, e si riesce ad assorbire la quasi totalità del calore nei primi 4 giorni di refrigerazione.

Successivamente si è passati allo studio dell' iterazione che si ha tra la roccia e le mele. Come prima cosa si è andati a calcolare la quantità di energia che la roccia restituisce durante i tre giorni di carico. Questa è di circa 3,4 MWh, un valore inferiore rispetto al fabbisogno teorico, ne rappresenta il 17%. La limitazione nel recupero del "freddo" immagazzinato nella montagna, sta nel fatto che la velocità alla quale viene restituito è la stessa di quella a cui viene stoccato. In 3 giorni posso quindi sfruttare una profondità utile di solo 1,25 m. E' stata valutata anche l' opzione di aumentare i tempi di pre-raffreddamento, ma in ogni caso, anche se avessi tutta la montagna ad una temperatura di -3 °C non avrei un apprezzabile aumento nel recupero dell' energia tale da giustificare i consumi necessari. Far variare invece la temperatura con cui si pre-raffredda la montagna comporta dover mettere a disposizione una potenza di ± 5 KW/°C, il miglior compromesso tra recupero di energia e basse dispersioni è quello di mantenere la temperatura media considerata finora.

Nel cercare di ridurre i tempi di raffreddamento, si è valutata la possibilità di accendere l' impianto di refrigerazione la notte, durante i giorni di riempimento. Questo fa sì che l' energia recuperata dalla montagna sia inferiore (2 MWh), ma complessivamente ne riesco a sottrarre dalle mele 7,2 MWh prima di chiudere definitivamente la cella. Il che mi permette di iniziare il raffreddamento in atmosfera controllata già con circa un terzo in meno dell' energia totale, riducendo le tempistiche.

L' enorme capacità termica della montagna consente di avere un certo effetto volano sulle dinamiche di queste gallerie di conservazione. Si è osservato come però, i tempi di risposta del sistema (ad es. in caso di black out), siano dominati dalle mele. Ovvero la frutta grazie al suo calore di respirazione fa sì che essa stessa aumenti la propria temperatura, più velocemente di quello che potrebbe fare l' ambiente esterno. Infatti esse aumentano di 0,5 °C/gg, mentre la superficie della roccia di soli 0,25 °C/gg, quindi ho a disposizione due giorni per intervenire. Per celle fuori terra, dove

comunemente sono coibentate con 20 cm di poliuretano, si deve intervenire nel giro di qualche ora nei periodi più caldi dell' anno. Ciò fa dedurre che questo tipo di impianto sarebbe più propizio alla conservazione di prodotti senza metabolismo proprio.

Da simulazioni sul flusso d' aria in cella si è notato come questa si mantenga a bassa temperatura nella parte superiore e sulla parete opposta ai ventilatori, mentre nelle intercapedini tra i cassoni e in aspirazione agli aereoevaporatori si mantiene circa alla temperatura superficiale delle mele. Questa condizione si raggiunge in circa 10 minuti. Di conseguenza è stato deciso che, a una delle tre celle in carico, a rotazione, venga spento l' impianto di raffreddamento. Questo permette di installare meno potenza e recuperare energia dalla roccia. Importante è che in ogni fase vi siano i ventilatori in funzione, in quanto i moti convettivi naturali sono insufficienti.

Dal momento che in letteratura non vi sono notizie a riguardo, grazie alla relazione che regola la velocità di propagazione del calore nei solidi, sono stati verificati i risultati ottenuti. In particolar modo: profondità utile nel caso ideale e reale (dopo 1 e 3 giorni), profilo di temperatura ed energia necessaria nel 1° pre-raffreddamento e la quantità di energia recuperata dalla roccia. Sono state fatte anche valutazioni sulle dispersioni nella montagna.

Con i risultati ottenuti finora si è andati a stabilire i consumi complessivi dell' impianto. Questi il primo anno ammontano a 4400 MWh_t, per ridursi al ventesimo fino a 2920 MWh_t. L' impianto di refrigerazione, dotato di 4 gruppi frigo da 330 KW_t, soddisfa ampiamente il fabbisogno.

Per il confronto con i consumi di una cella frigo convenzionale, si farà riferimento al consumo elettrico per tonnellata di prodotto conservato. Inizialmente sarà superiore per una cella ipogea, ma già dal terzo anno si andrà a risparmiare, fino al 27% in meno.

Nel caso in cui si procedesse alla realizzazione degli ampliamenti previsti, con altre 8 gallerie, per una capienza totale di 52000 ton di frutta, il risparmio conseguibile sarebbe del 44%.

Complessivamente i risultati ottenuti da questo studio, considerando le comparazioni sia a livello sperimentale che analitico, sono da considerarsi veritieri e soddisfacenti. L' analisi è stata condotta in maniera dettagliata e gli esiti ottenuti possono essere applicati anche ad altri impianti.

Possibili sviluppi potrebbero riguardare l' uso di questi spazi vuoti anche per la conservazione di prodotti più idonei al luogo, oppure lo sfruttamento di essi nei periodi in cui le celle sono vuote. Sarebbe opportuno sviluppare, inoltre, un sistema automatizzato per il trasporto della merce dall' imbocco delle gallerie fino alla destinazione prevista, riducendo il consumo dei mezzi e permettendo un ulteriore diminuzione della temperatura delle mele.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Prof. Michele De Carli, relatore di questa tesi, per la grande disponibilità e cortesia dimostratemi, e per tutto l' aiuto fornitomi durante la stesura.

Un sentito ringraziamento a tutto il Polo Tecnologico per l' Energia, sede del tirocinio svolto. In particolar modo all' Ing. Tommaso Bezzi, per la pazienza e la competenza, la fiducia sempre trasmessa, e per aver rappresentato un esempio professionale ed umano che mi auguro un giorno di saper imitare.

Desidero inoltre ringraziare i miei familiari, che, con il loro incrollabile sostegno morale ed economico, mi hanno permesso di raggiungere questo traguardo.

Infine, un grazie sincero a tutti coloro che sono stati al mio fianco in quest' ultimo biennio universitario, per aver condiviso esperienze, difficoltà e soddisfazioni.

Bibliografia

- [1] Livio Fadanelli, “Mele in grotta”, http://openpub.fmach.it/bitstream/10449/22152/1/Mele%20in%20grotta_TT2-2013.pdf, ottobre 2013.
- [4] Trygve M. Eikevik, “The influence of time, temperature and other parameters on quality in cold storage of fruit”, Seminar, Italy, 16/11/2011, slide 16.
- [5] Tassullo Materiali, “Per costruire bene e vivere meglio”, [http://www.uffstampa.provincia.tn.it/Csw/C_Stampa.Nsf/54d299f52c4804bbc1256db8004f984e/0a81bc992aa0b523c1257a4f00559caa/\\$FILE/Progetto%20Rio%20Maggiore%20Melinda%202.pdf](http://www.uffstampa.provincia.tn.it/Csw/C_Stampa.Nsf/54d299f52c4804bbc1256db8004f984e/0a81bc992aa0b523c1257a4f00559caa/$FILE/Progetto%20Rio%20Maggiore%20Melinda%202.pdf), ottobre 2013.
- [6] Livio Fadanelli, “La conservazione...il ipogeo”, Seminario tematiche post-raccolta, Foggia, 6/10/2012, slide 71-75.
- [8] “Gli aspetti principali dei tre progetti della Tassullo Spa «in ipogeo»”, <http://www.ladigetito.it/permalink/19943.html>, 8/8/2012.
- [10] Marco Zeni, “Le mele delle caverne”, *Vita trentina*, anno 87-n° 41, pag. 47, 12/10/2012.
- [11] A. Cavallini L. Mattarolo, *Termodinamica Applicata*, Padova, Cleup editore, 1992, Cap. XII.
- [13] “Equilibrio termico tra due corpi”, <http://www.fisica.uniud.it/irdis/Termologia/Equilibrio2Corpi/Didattica.htm>, ottobre 2013.
- [14] “Diffusività termica”, http://it.wikipedia.org/wiki/Diffusività_termica, 20/12/2013.
- [15] “Misura non distruttiva di diffusività termica su materiali edilizi”, http://www.maury.it/univ/lab_archeometria/3_diffusivita.html, ottobre 2013.
- [16] “Funzione degli errori”, http://it.wikipedia.org/wiki/Funzione_degli_errori, 20/5/2013.
- [17] L. Granata, “Il progetto di ricerca ipogeo di Melinda”, Milano, 21/1/2014, slide 19-20.
- [18] W. F. Stoecker, *Manuale della refrigerazione industriale*, Milano, Tecniche Nuove, 2001, pag. 53.
- [20] A. Fuganti S. Odorizzi A. Franzinelli, “La miniera di Dolomia Rio Maggiore Val di Non (Trento)”, *Atti Acc. Rov. Agiati*, a. 263, 2013, ser. IX, vol. III, pag. 186.
- [21] G. Piccoli, “Celle ipogee, bolletta tagliata del 53%”, *Trentino*, 04 ottobre 2012, pag. 45.

Siti web consultati

[2] Isocell Italia, <http://www.isolcell.com>.

[3] Marvil Engineering, <http://www.marvil.it>.

[7] Palbox Pallets e Contenitori, <http://www.palbox.it>.

[9] COMSOL, <http://www.comsol.com>.

[12] SCM Frigo, <http://www.scmfrigo.com> (gruppo frigo).

Longofrigo, <http://www.longofrigo.it> (impianto frigo).

Bitzer, <http://www.bitzer.it> (compressore).

SWEP International, <http://www.swep.net> (evaporatore circuito primario).

Alfa Laval, <http://www.alfalaval.com> (condensatore circuito primario).

Stefani, <http://www.stefani-online.com/> (aerorefrigeratore).

[19] Melinda, <http://www.melinda.it>.

Appendice A

Nell'appendice A si riportano i consumi elettrici medi giornalieri della cella sperimentale, suddivisi nelle tre prove.

PRIMA PROVA	
20/03/2012	- kWh
10/04/2012	- kWh
11/04/2012	- kWh
12/04/2012	187,5 kWh
13/04/2012	437,5 kWh
14/04/2012	487,5 kWh
15/04/2012	650 kWh
16/04/2012	387,5 kWh
17/04/2012	625 kWh
18/04/2012	887,5 kWh
19/04/2012	537,5 kWh
20/04/2012	325 kWh
21/04/2012	487,5 kWh
22/04/2012	475 kWh
23/04/2012	550 kWh
24/04/2012	550 kWh
25/04/2012	650 kWh
26/04/2012	437,5 kWh
27/04/2012	537,5 kWh
28/04/2012	462,5 kWh
29/04/2012	500 kWh
30/04/2012	487,5 kWh
01/05/2012	512,5 kWh
02/05/2012	512,5 kWh
03/05/2012	387,5 kWh
04/05/2012	437,5 kWh
05/05/2012	512,5 kWh
06/05/2012	475 kWh
07/05/2012	512,5 kWh
08/05/2012	475 kWh
09/05/2012	412,5 kWh
10/05/2012	500 kWh
11/05/2012	450 kWh
12/05/2012	475 kWh
13/05/2012	512,5 kWh
14/05/2012	462,5 kWh
15/05/2012	437,5 kWh

16/05/2012	450 kWh
17/05/2012	487,5 kWh
18/05/2012	525 kWh
19/05/2012	450 kWh
20/05/2012	462,5 kWh
21/05/2012	462,5 kWh
22/05/2012	425 kWh
23/05/2012	200 kWh
24/05/2012	212,5 kWh
25/05/2012	200 kWh
26/05/2012	212,5 kWh
27/05/2012	212,5 kWh
28/05/2012	200 kWh
29/05/2012	200 kWh
30/05/2012	187,5 kWh
31/05/2012	225 kWh
01/06/2012	200 kWh
02/06/2012	200 kWh
03/06/2012	212,5 kWh
04/06/2012	187,5 kWh
05/06/2012	187,5 kWh
06/06/2012	212,5 kWh
07/06/2012	212,5 kWh
08/06/2012	200 kWh
09/06/2012	225 kWh
10/06/2012	212,5 kWh
11/06/2012	200 kWh
12/06/2012	187,5 kWh
13/06/2012	150 kWh
14/06/2012	175 kWh
15/06/2012	162,5 kWh
16/06/2012	162,5 kWh
17/06/2012	175 kWh
18/06/2012	162,5 kWh
19/06/2012	162,5 kWh
20/06/2012	162,5 kWh
21/06/2012	162,5 kWh
22/06/2012	175 kWh

23/06/2012	187,5 kWh
24/06/2012	187,5 kWh
25/06/2012	200 kWh
26/06/2012	212,5 kWh
27/06/2012	212,5 kWh
28/06/2012	175 kWh
29/06/2012	237,5 kWh
30/06/2012	212,5 kWh
01/07/2012	225 kWh
02/07/2012	212,5 kWh
03/07/2012	187,5 kWh
04/07/2012	200 kWh
05/07/2012	200 kWh
06/07/2012	200 kWh
07/07/2012	212,5 kWh
08/07/2012	200 kWh
09/07/2012	187,5 kWh

10/07/2012	212,5 kWh
11/07/2012	212,5 kWh
12/07/2012	200 kWh
13/07/2012	212,5 kWh
14/07/2012	200 kWh
15/07/2012	200 kWh
16/07/2012	187,5 kWh
17/07/2012	187,5 kWh
18/07/2012	187,5 kWh
19/07/2012	125 kWh
20/07/2012	212,5 kWh
21/07/2012	212,5 kWh
22/07/2012	200 kWh
23/07/2012	262,5 kWh
24/07/2012	200 kWh

SECONDA PROVA	
25/07/2012	200 kWh
26/07/2012	262,5 kWh
27/07/2012	275 kWh
28/07/2012	250 kWh
29/07/2012	275 kWh
30/07/2012	287,5 kWh
31/07/2012	237,5 kWh
01/08/2012	262,5 kWh
02/08/2012	225 kWh
03/08/2012	175 kWh
04/08/2012	300 kWh
05/08/2012	287,5 kWh
06/08/2012	187,5 kWh
07/08/2012	112,5 kWh
08/08/2012	87,5 kWh
09/08/2012	237,5 kWh
10/08/2012	300 kWh
11/08/2012	300 kWh
12/08/2012	300 kWh
13/08/2012	287,5 kWh
14/08/2012	287,5 kWh
15/08/2012	262,5 kWh
16/08/2012	262,5 kWh

17/08/2012	250 kWh
18/08/2012	225 kWh
19/08/2012	175 kWh
20/08/2012	237,5 kWh
21/08/2012	250 kWh
22/08/2012	225 kWh
23/08/2012	237,5 kWh
24/08/2012	237,5 kWh
25/08/2012	237,5 kWh
26/08/2012	250 kWh
27/08/2012	225 kWh
28/08/2012	237,5 kWh
29/08/2012	225 kWh
30/08/2012	200 kWh
31/08/2012	225 kWh
01/09/2012	- kWh
03/09/2012	- kWh
04/09/2012	250 kWh
05/09/2012	262,5 kWh
06/09/2012	275 kWh
07/09/2012	225 kWh
08/09/2012	287,5 kWh
09/09/2012	237,5 kWh
10/09/2012	237,5 kWh
11/09/2012	237,5 kWh

12/09/2012	175 kWh
13/09/2012	237,5 kWh
14/09/2012	237,5 kWh
15/09/2012	250 kWh
16/09/2012	212,5 kWh
17/09/2012	275 kWh
18/09/2012	250 kWh
19/09/2012	212,5 kWh
20/09/2012	262,5 kWh
21/09/2012	325 kWh
22/09/2012	375 kWh
23/09/2012	337,5 kWh
24/09/2012	87,5 kWh
25/09/2012	312,5 kWh
26/09/2012	362,5 kWh
27/09/2012	312,5 kWh
28/09/2012	362,5 kWh
29/09/2012	350 kWh
30/09/2012	312,5 kWh
01/10/2012	325 kWh
02/10/2012	325 kWh
03/10/2012	325 kWh
04/10/2012	112,5 kWh
05/10/2012	100 kWh
06/10/2012	300 kWh
07/10/2012	250 kWh
08/10/2012	175 kWh
09/10/2012	300 kWh
10/10/2012	325 kWh
11/10/2012	212,5 kWh
12/10/2012	162,5 kWh
13/10/2012	150 kWh
14/10/2012	162,5 kWh
15/10/2012	125 kWh
16/10/2012	137,5 kWh
17/10/2012	150 kWh
18/10/2012	162,5 kWh
19/10/2012	150 kWh
20/10/2012	150 kWh
21/10/2012	162,5 kWh
22/10/2012	137,5 kWh
23/10/2012	150 kWh
24/10/2012	137,5 kWh
25/10/2012	137,5 kWh

26/10/2012	150 kWh
27/10/2012	150 kWh
28/10/2012	0 kWh
29/10/2012	150 kWh
30/10/2012	137,5 kWh
31/10/2012	125 kWh
01/11/2012	137,5 kWh
02/11/2012	150 kWh
03/11/2012	137,5 kWh
04/11/2012	137,5 kWh
05/11/2012	137,5 kWh
06/11/2012	137,5 kWh
07/11/2012	137,5 kWh
08/11/2012	125 kWh
09/11/2012	137,5 kWh
10/11/2012	125 kWh
11/11/2012	137,5 kWh
12/11/2012	137,5 kWh
13/11/2012	137,5 kWh
14/11/2012	125 kWh
15/11/2012	125 kWh
16/11/2012	137,5 kWh
17/11/2012	150 kWh
18/11/2012	137,5 kWh
19/11/2012	125 kWh
20/11/2012	125 kWh
21/11/2012	137,5 kWh
22/11/2012	112,5 kWh
23/11/2012	137,5 kWh
24/11/2012	137,5 kWh
25/11/2012	137,5 kWh
26/11/2012	150 kWh
27/11/2012	137,5 kWh
28/11/2012	137,5 kWh
29/11/2012	137,5 kWh
30/11/2012	137,5 kWh
01/12/2012	150 kWh
02/12/2012	137,5 kWh
03/12/2012	137,5 kWh
04/12/2012	150 kWh
05/12/2012	137,5 kWh
06/12/2012	125 kWh
07/12/2012	162,5 kWh
08/12/2012	162,5 kWh

09/12/2012	187,5 kWh
10/12/2012	137,5 kWh
11/12/2012	125 kWh
12/12/2012	137,5 kWh
13/12/2012	137,5 kWh
14/12/2012	137,5 kWh
15/12/2012	137,5 kWh
16/12/2012	137,5 kWh
17/12/2012	137,5 kWh
18/12/2012	150 kWh
19/12/2012	125 kWh
20/12/2012	125 kWh
21/12/2012	150 kWh
22/12/2012	150 kWh
23/12/2012	137,5 kWh
24/12/2012	150 kWh
25/12/2012	137,5 kWh
26/12/2012	137,5 kWh
27/12/2012	137,5 kWh
28/12/2012	137,5 kWh
29/12/2012	137,5 kWh
30/12/2012	150 kWh
31/12/2012	137,5 kWh
01/01/2013	137,5 kWh
02/01/2013	137,5 kWh
03/01/2013	137,5 kWh
04/01/2013	137,5 kWh
05/01/2013	137,5 kWh
06/01/2013	137,5 kWh
07/01/2013	125 kWh
08/01/2013	112,5 kWh
09/01/2013	137,5 kWh
10/01/2013	112,5 kWh
11/01/2013	112,5 kWh

12/01/2013	112,5 kWh
13/01/2013	112,5 kWh
14/01/2013	112,5 kWh
15/01/2013	112,5 kWh
16/01/2013	100 kWh
17/01/2013	100 kWh
18/01/2013	100 kWh
19/01/2013	100 kWh
20/01/2013	125 kWh
21/01/2013	125 kWh
22/01/2013	62,5 kWh
23/01/2013	175 kWh
24/01/2013	175 kWh
25/01/2013	162,5 kWh
26/01/2013	175 kWh
27/01/2013	150 kWh
28/01/2013	125 kWh
29/01/2013	150 kWh
30/01/2013	137,5 kWh
31/01/2013	137,5 kWh
01/02/2013	137,5 kWh
02/02/2013	137,5 kWh
03/02/2013	125 kWh
04/02/2013	137,5 kWh
05/02/2013	137,5 kWh
06/02/2013	125 kWh
07/02/2013	112,5 kWh
08/02/2013	137,5 kWh
09/02/2013	162,5 kWh
10/02/2013	150 kWh
11/02/2013	162,5 kWh
12/02/2013	137,5 kWh

TERZA PROVA	
13/02/2013	100 kWh
14/02/2013	50 kWh
15/02/2013	75 kWh
16/02/2013	62,5 kWh
17/02/2013	62,5 kWh
18/02/2013	150 kWh
19/02/2013	137,5 kWh

20/02/2013	200 kWh
21/02/2013	225 kWh
22/02/2013	187,5 kWh
23/02/2013	225 kWh
24/02/2013	225 kWh
25/02/2013	212,5 kWh
26/02/2013	200 kWh
27/02/2013	212,5 kWh

28/02/2013	200	kWh
01/03/2013	212,5	kWh
02/03/2013	212,5	kWh
03/03/2013	212,5	kWh
04/03/2013	212,5	kWh
05/03/2013	200	kWh
06/03/2013	200	kWh
07/03/2013	62,5	kWh
08/03/2013	150	kWh
09/03/2013	225	kWh
10/03/2013	200	kWh
11/03/2013	200	kWh
12/03/2013	187,5	kWh
13/03/2013	200	kWh
14/03/2013	187,5	kWh
15/03/2013	187,5	kWh
16/03/2013	200	kWh
17/03/2013	200	kWh
18/03/2013	187,5	kWh
19/03/2013	200	kWh
20/03/2013	187,5	kWh
21/03/2013	187,5	kWh
22/03/2013	150	kWh
23/03/2013	75	kWh
24/03/2013	62,5	kWh
25/03/2013	162,5	kWh
26/03/2013	137,5	kWh
27/03/2013	162,5	kWh
28/03/2013	-	kWh
29/03/2013	-	kWh
30/03/2013	250	kWh
31/03/2013	212,5	kWh
01/04/2013	225	kWh
02/04/2013	225	kWh
03/04/2013	212,5	kWh
04/04/2013	212,5	kWh
05/04/2013	212,5	kWh
06/04/2013	200	kWh
07/04/2013	212,5	kWh
08/04/2013	112,5	kWh
09/04/2013	162,5	kWh
10/04/2013	212,5	kWh
11/04/2013	175	kWh
12/04/2013	212,5	kWh

13/04/2013	212,5	kWh
14/04/2013	200	kWh
15/04/2013	212,5	kWh
16/04/2013	200	kWh
17/04/2013	-	kWh
18/04/2013	-	kWh
19/04/2013	162,5	kWh
20/04/2013	100	kWh
21/04/2013	162,5	kWh
22/04/2013	137,5	kWh
23/04/2013	162,5	kWh
24/04/2013	125	kWh
25/04/2013	162,5	kWh
26/04/2013	150	kWh
27/04/2013	162,5	kWh
28/04/2013	162,5	kWh
29/04/2013	150	kWh
30/04/2013	162,5	kWh
01/05/2013	162,5	kWh
02/05/2013	162,5	kWh
03/05/2013	50	kWh
04/05/2013	25	kWh
05/05/2013	25	kWh
06/05/2013	112,5	kWh
07/05/2013	187,5	kWh
08/05/2013	175	kWh
09/05/2013	150	kWh
10/05/2013	87,5	kWh
11/05/2013	100	kWh
12/05/2013	112,5	kWh
13/05/2013	87,5	kWh
14/05/2013	137,5	kWh
15/05/2013	162,5	kWh
16/05/2013	137,5	kWh
17/05/2013	112,5	kWh
18/05/2013	62,5	kWh
19/05/2013	125	kWh
20/05/2013	75	kWh
21/05/2013	75	kWh
22/05/2013	100	kWh
23/05/2013	75	kWh
24/05/2013	75	kWh
25/05/2013	100	kWh
26/05/2013	75	kWh

27/05/2013	75 kWh
28/05/2013	75 kWh
29/05/2013	75 kWh
30/05/2013	75 kWh
31/05/2013	62,5 kWh
01/06/2013	75 kWh
02/06/2013	87,5 kWh
03/06/2013	87,5 kWh
04/06/2013	50 kWh
05/06/2013	87,5 kWh
06/06/2013	100 kWh
07/06/2013	100 kWh
08/06/2013	75 kWh
09/06/2013	62,5 kWh
10/06/2013	100 kWh
11/06/2013	75 kWh
12/06/2013	87,5 kWh
13/06/2013	100 kWh
14/06/2013	75 kWh
15/06/2013	87,5 kWh
16/06/2013	75 kWh
17/06/2013	125 kWh
18/06/2013	100 kWh
19/06/2013	87,5 kWh
20/06/2013	87,5 kWh
21/06/2013	87,5 kWh
22/06/2013	75 kWh
23/06/2013	87,5 kWh
24/06/2013	37,5 kWh
25/06/2013	75 kWh
26/06/2013	62,5 kWh
27/06/2013	75 kWh
28/06/2013	62,5 kWh
29/06/2013	25 kWh

30/06/2013	50 kWh
01/07/2013	162,5 kWh
02/07/2013	100 kWh
03/07/2013	75 kWh
04/07/2013	87,5 kWh
05/07/2013	75 kWh
06/07/2013	87,5 kWh
07/07/2013	75 kWh
08/07/2013	75 kWh
09/07/2013	87,5 kWh
10/07/2013	75 kWh
11/07/2013	87,5 kWh
12/07/2013	112,5 kWh
13/07/2013	87,5 kWh
14/07/2013	75 kWh
15/07/2013	75 kWh
16/07/2013	87,5 kWh
17/07/2013	87,5 kWh
18/07/2013	87,5 kWh
19/07/2013	75 kWh
20/07/2013	100 kWh
21/07/2013	75 kWh
22/07/2013	100 kWh
23/07/2013	75 kWh
24/07/2013	62,5 kWh
25/07/2013	62,5 kWh
26/07/2013	87,5 kWh
27/07/2013	62,5 kWh
28/07/2013	75 kWh
29/07/2013	75 kWh
30/07/2013	87,5 kWh
31/07/2013	75 kWh
01/08/2013	137,5 kWh

Appendice B

In appendice B vengono riportati i valori di temperatura in roccia misurati dalle quattro sonde relativamente alla cella pilota, di cui in appendice A si trovano i consumi.

DATE	TIME	T4	T7	T1	T10
		°C	°C	°C	°C
1/3/12	00:00	12,6	11,9	11,4	12
2/3/12	00:00	12,6	11,9	11,4	12
3/3/12	00:00	12,6	11,9	11,4	12
4/3/12	00:00	12,7	12	11,4	12
5/3/12	00:00	12,6	12	11,4	12
6/3/12	00:00	12,6	11,9	11,4	11,9
7/3/12	00:00	12,6	11,9	11,4	11,9
8/3/12	00:00	12,8	12,1	11,5	12,1
9/3/12	00:00	12,9	12,2	11,7	12,2
10/3/12	00:00	12,8	12,1	11,6	12,1
11/3/12	00:00	12,7	12	11,5	12,1
12/3/12	00:00	12,7	12	11,5	12
13/3/12	00:00	12,7	12	11,5	12
14/3/12	00:00	12,7	12	11,4	12
15/3/12	00:00	12,7	11,9	11,4	12
16/3/12	00:00	12,7	11,9	11,4	12
17/3/12	00:00	12,7	12	11,4	12
18/3/12	00:00	12,6	11,9	11,4	12
19/3/12	00:00	12,6	11,9	11,3	11,9
20/3/12	00:00	12,6	11,9	11,4	12
21/3/12	00:00	12,6	11,9	11,4	12
22/3/12	00:00	12,6	11,9	11,4	12
23/3/12	00:00	12,6	11,9	11,4	12
24/3/12	00:00	12,6	11,9	11,3	11,9
25/3/12	00:00	12,6	11,9	11,4	12
26/3/12	00:00	12,6	11,9	11,4	11,9
27/3/12	00:00	12,6	11,9	11,4	11,9
28/3/12	00:00	12,6	11,9	11,4	12
29/3/12	00:00	12,6	11,9	11,4	11,9
30/3/12	00:00	12,6	11,9	11,4	11,9
31/3/12	00:00	12,6	11,9	11,4	11,9
1/4/12	00:00	12,6	11,9	11,4	11,9
2/4/12	00:00	12,6	11,9	11,4	11,9
3/4/12	00:00	12,6	11,9	11,4	11,9
4/4/12	00:00	12,6	11,9	11,4	11,9
5/4/12	00:00	12,6	11,9	11,4	11,9
6/4/12	00:00	12,6	11,9	11,4	11,9
7/4/12	00:00	12,6	11,9	11,4	11,9
8/4/12	00:00	12,6	11,9	11,5	11,9
9/4/12	00:00	12,6	11,9	11,5	11,9
10/4/12	00:00	12,6	11,9	11,4	11,9
10/4/12	14:00	12,6	11,9	11,5	11,9
10/4/12	15:00	12,6	11,9	11,5	11,9
10/4/12	16:00	12,6	11,9	11,5	11,9
10/4/12	17:00	12,7	11,9	11,5	11,9
10/4/12	18:00	12,6	11,9	11,5	11,9
10/4/12	19:00	12,6	11,9	11,5	11,9
10/4/12	20:00	12,6	11,9	11,5	11,9
10/4/12	21:00	12,6	11,9	11,5	11,9
10/4/12	22:00	12,6	11,9	11,5	11,9
10/4/12	23:00	12,6	11,9	11,5	11,9
11/4/12	00:00	12,6	11,9	11,5	11,9
11/4/12	01:00	12,6	11,9	11,5	11,9
11/4/12	02:00	12,6	11,9	11,5	11,9
11/4/12	03:00	12,6	11,9	11,5	11,9
11/4/12	04:00	12,6	11,9	11,5	11,9
11/4/12	05:00	12,6	11,9	11,5	11,9
11/4/12	06:00	12,7	11,9	11,5	11,9
11/4/12	07:00	12,6	11,9	11,5	11,9
11/4/12	08:00	12,6	11,9	11,5	11,9
11/4/12	09:00	12,6	11,9	11,5	11,9
11/4/12	10:00	12,6	11,9	11,5	11,9
11/4/12	11:00	12,6	11,9	11,5	11,9
11/4/12	12:00	12,6	11,9	11,5	11,9
11/4/12	13:00	12,6	11,9	11,4	11,9
11/4/12	14:00	12,6	11,9	11,4	11,9
11/4/12	15:00	12,6	11,8	11,4	11,9
11/4/12	16:00	12,6	11,9	11,4	11,9
11/4/12	17:00	12,6	11,9	11,5	11,9
11/4/12	18:00	12,6	11,9	11,5	11,9
11/4/12	19:00	12,6	11,9	11,5	11,9
11/4/12	20:00	12,6	11,9	11,5	11,9
11/4/12	21:00	12,6	11,8	11,5	11,9
11/4/12	22:00	12,6	11,9	11,5	11,9

11/4/12	23:00	12,6	11,9	11,5	11,9	13/4/12	19:00	12,6	11,9	11,4	11,9
12/4/12	00:00	12,6	11,9	11,5	11,9	13/4/12	20:00	12,6	11,9	11,4	11,9
12/4/12	01:00	12,6	11,9	11,5	11,9	13/4/12	21:00	12,6	11,9	11,4	11,9
12/4/12	02:00	12,6	11,9	11,5	11,9	13/4/12	22:00	12,6	11,8	11,4	11,9
12/4/12	03:00	12,6	11,9	11,5	11,9	13/4/12	23:00	12,6	11,9	11,4	11,9
12/4/12	04:00	12,6	11,9	11,5	11,9	14/4/12	00:00	12,6	11,9	11,4	11,9
12/4/12	05:00	12,6	11,9	11,5	11,9	14/4/12	01:00	12,6	11,9	11,4	11,9
12/4/12	06:00	12,6	11,9	11,5	11,9	14/4/12	02:00	12,6	11,9	11,4	11,9
12/4/12	07:00	12,6	11,9	11,5	11,9	14/4/12	03:00	12,6	11,9	11,4	11,9
12/4/12	08:00	12,6	11,9	11,5	11,9	14/4/12	04:00	12,6	11,9	11,4	11,9
12/4/12	09:00	12,6	11,9	11,5	11,9	14/4/12	05:00	12,6	11,9	11,4	11,9
12/4/12	10:00	12,6	11,9	11,5	11,9	14/4/12	06:00	12,6	11,9	11,4	11,9
12/4/12	11:00	12,6	11,9	11,4	11,9	14/4/12	07:00	12,7	11,9	11,4	11,9
12/4/12	12:00	12,6	11,8	11,4	11,9	14/4/12	08:00	12,7	11,9	11,4	11,9
12/4/12	13:00	12,6	11,9	11,5	11,9	14/4/12	09:00	12,7	11,9	11,4	11,9
12/4/12	14:00	12,6	11,9	11,5	11,9	14/4/12	10:00	12,6	11,9	11,4	11,9
12/4/12	15:00	12,6	11,9	11,5	11,9	14/4/12	11:00	12,7	11,9	11,4	11,9
12/4/12	16:00	12,6	11,9	11,5	11,9	14/4/12	12:00	12,7	11,9	11,4	11,9
12/4/12	17:00	12,6	11,9	11,4	11,9	14/4/12	13:00	12,6	11,9	11,3	11,9
12/4/12	18:00	12,6	11,9	11,5	11,9	14/4/12	14:00	12,6	11,9	11,3	11,9
12/4/12	19:00	12,7	11,9	11,5	11,9	14/4/12	15:00	12,6	11,8	11,3	11,9
12/4/12	20:00	12,6	11,9	11,5	11,9	14/4/12	16:00	12,6	11,9	11,3	11,9
12/4/12	21:00	12,6	11,9	11,4	11,9	14/4/12	17:00	12,6	11,8	11,3	11,9
12/4/12	22:00	12,6	11,9	11,5	11,9	14/4/12	18:00	12,6	11,9	11,3	11,9
12/4/12	23:00	12,6	11,9	11,4	11,9	14/4/12	19:00	12,6	11,8	11,3	11,9
13/4/12	00:00	12,6	11,9	11,4	11,9	14/4/12	20:00	12,6	11,9	11,3	11,9
13/4/12	01:00	12,6	11,9	11,5	11,9	14/4/12	21:00	12,6	11,8	11,3	11,9
13/4/12	02:00	12,6	11,9	11,4	11,9	14/4/12	22:00	12,6	11,9	11,3	11,9
13/4/12	03:00	12,6	11,9	11,4	11,9	14/4/12	23:00	12,6	11,9	11,3	11,9
13/4/12	04:00	12,6	11,9	11,4	11,9	15/4/12	00:00	12,6	11,9	11,3	11,9
13/4/12	05:00	12,6	11,8	11,4	11,9	15/4/12	01:00	12,6	11,9	11,3	11,9
13/4/12	06:00	12,6	11,8	11,4	11,9	15/4/12	02:00	12,6	11,8	11,3	11,9
13/4/12	07:00	12,6	11,8	11,4	11,9	15/4/12	03:00	12,6	11,9	11,2	11,9
13/4/12	08:00	12,6	11,8	11,4	11,9	15/4/12	04:00	12,6	11,9	11,2	11,9
13/4/12	09:00	12,6	11,8	11,4	11,9	15/4/12	05:00	12,6	11,9	11,3	11,9
13/4/12	10:00	12,6	11,9	11,4	11,9	15/4/12	06:00	12,6	11,9	11,2	11,9
13/4/12	11:00	12,6	11,8	11,4	11,9	15/4/12	07:00	12,6	11,8	11,2	11,9
13/4/12	12:00	12,6	11,9	11,4	11,9	15/4/12	08:00	12,6	11,9	11,2	11,9
13/4/12	13:00	12,6	11,8	11,4	11,9	15/4/12	09:00	12,6	11,9	11,2	11,9
13/4/12	14:00	12,6	11,8	11,4	11,9	15/4/12	10:00	12,6	11,9	11,2	11,9
13/4/12	15:00	12,6	11,9	11,4	11,9	15/4/12	11:00	12,6	11,9	11,2	11,9
13/4/12	16:00	12,6	11,9	11,4	11,9	15/4/12	12:00	12,6	11,9	11,2	11,9
13/4/12	17:00	12,6	11,9	11,4	11,9	15/4/12	13:00	12,6	11,8	11,2	11,9
13/4/12	18:00	12,6	11,8	11,4	11,9	15/4/12	14:00	12,6	11,8	11,2	11,9

15/4/12	15:00	12,6	11,9	11,2	11,9	17/4/12	11:00	12,5	11,9	10,8	11,9
15/4/12	16:00	12,6	11,9	11,2	11,9	17/4/12	12:00	12,5	11,9	10,7	11,9
15/4/12	17:00	12,6	11,9	11,2	11,9	17/4/12	13:00	12,5	11,9	10,8	11,9
15/4/12	18:00	12,6	11,8	11,2	11,9	17/4/12	14:00	12,5	11,9	10,7	11,9
15/4/12	19:00	12,6	11,9	11,2	11,9	17/4/12	15:00	12,5	11,8	10,7	11,9
15/4/12	20:00	12,6	11,9	11,2	11,9	17/4/12	16:00	12,5	11,9	10,7	11,9
15/4/12	21:00	12,6	11,8	11,1	11,9	17/4/12	17:00	12,5	11,9	10,7	11,9
15/4/12	22:00	12,6	11,8	11,1	11,9	17/4/12	18:00	12,5	11,9	10,7	11,9
15/4/12	23:00	12,6	11,8	11,1	11,9	17/4/12	19:00	12,5	11,9	10,7	11,9
16/4/12	00:00	12,6	11,8	11,1	11,9	17/4/12	20:00	12,5	11,8	10,7	11,9
16/4/12	01:00	12,6	11,9	11,1	11,9	17/4/12	21:00	12,5	11,9	10,7	11,9
16/4/12	02:00	12,6	11,8	11,1	11,9	17/4/12	22:00	12,5	11,9	10,6	11,9
16/4/12	03:00	12,6	11,8	11,1	11,9	17/4/12	23:00	12,4	11,9	10,6	11,9
16/4/12	04:00	12,6	11,8	11,1	11,9	18/4/12	00:00	12,5	11,9	10,6	11,9
16/4/12	05:00	12,6	11,8	11	11,9	18/4/12	01:00	12,5	11,9	10,6	11,9
16/4/12	06:00	12,6	11,8	11	11,9	18/4/12	02:00	12,4	11,9	10,6	11,9
16/4/12	07:00	12,6	11,8	11	11,9	18/4/12	03:00	12,4	11,9	10,6	11,9
16/4/12	08:00	12,6	11,8	11	11,9	18/4/12	04:00	12,4	11,9	10,6	11,9
16/4/12	09:00	12,5	11,8	11	11,9	18/4/12	05:00	12,4	11,8	10,6	11,9
16/4/12	10:00	12,6	11,9	11	11,9	18/4/12	06:00	12,4	11,9	10,5	11,9
16/4/12	11:00	12,6	11,8	11	11,9	18/4/12	07:00	12,4	11,9	10,6	11,9
16/4/12	12:00	12,5	11,8	11	11,9	18/4/12	08:00	12,4	11,9	10,5	11,9
16/4/12	13:00	12,5	11,8	11	11,9	18/4/12	09:00	12,4	11,9	10,6	11,9
16/4/12	14:00	12,6	11,9	11	11,9	18/4/12	10:00	12,4	11,9	10,5	11,9
16/4/12	15:00	12,6	11,9	11	11,9	18/4/12	11:00	12,4	11,9	10,5	11,9
16/4/12	16:00	12,5	11,8	11	11,9	18/4/12	12:00	12,4	11,9	10,5	11,9
16/4/12	17:00	12,5	11,8	10,9	11,9	18/4/12	13:00	12,4	11,9	10,5	11,9
16/4/12	18:00	12,5	11,8	10,9	11,9	18/4/12	14:00	12,4	11,9	10,5	11,9
16/4/12	19:00	12,5	11,8	10,9	11,9	18/4/12	15:00	12,4	11,9	10,4	11,9
16/4/12	20:00	12,5	11,9	10,9	11,9	18/4/12	16:00	12,4	11,9	10,5	11,9
16/4/12	21:00	12,5	11,8	10,9	11,9	18/4/12	17:00	12,4	11,9	10,4	11,9
16/4/12	22:00	12,5	11,8	10,9	11,9	18/4/12	18:00	12,4	11,9	10,4	11,9
16/4/12	23:00	12,5	11,9	10,9	11,9	18/4/12	19:00	12,4	11,9	10,4	11,9
17/4/12	00:00	12,5	11,9	10,9	11,9	18/4/12	20:00	12,4	11,9	10,4	11,9
17/4/12	01:00	12,5	11,8	10,9	11,9	18/4/12	21:00	12,4	11,9	10,4	11,9
17/4/12	02:00	12,5	11,9	10,9	11,9	18/4/12	22:00	12,3	11,9	10,4	11,9
17/4/12	03:00	12,5	11,8	10,8	11,9	18/4/12	23:00	12,3	11,9	10,4	11,9
17/4/12	04:00	12,5	11,9	10,9	11,9	19/4/12	00:00	12,3	11,8	10,3	11,9
17/4/12	05:00	12,5	11,8	10,8	11,9	19/4/12	01:00	12,3	11,8	10,3	11,9
17/4/12	06:00	12,5	11,9	10,8	11,9	19/4/12	02:00	12,3	11,9	10,3	11,9
17/4/12	07:00	12,5	11,8	10,8	11,9	19/4/12	03:00	12,3	11,8	10,3	11,9
17/4/12	08:00	12,5	11,9	10,8	11,9	19/4/12	04:00	12,3	11,9	10,3	11,9
17/4/12	09:00	12,5	11,9	10,8	11,9	19/4/12	05:00	12,3	11,9	10,3	11,9
17/4/12	10:00	12,5	11,9	10,8	11,9	19/4/12	06:00	12,3	11,8	10,3	11,9

19/4/12	07:00	12,3	11,8	10,2	11,9	6/5/12	12:00	10,3	11,7	7,5	11,8
19/4/12	08:00	12,3	11,9	10,2	11,9	7/5/12	00:00	10,2	11,6	7,5	11,8
19/4/12	09:00	12,3	11,8	10,2	11,9	7/5/12	12:00	10,2	11,6	7,4	11,8
19/4/12	10:00	12,3	11,8	10,2	11,9	8/5/12	00:00	10,1	11,6	7,4	11,8
19/4/12	11:00	12,3	11,9	10,2	11,9	8/5/12	12:00	10,1	11,6	7,4	11,8
19/4/12	12:00	12,2	11,8	10,2	11,9	9/5/12	00:00	10,1	11,6	7,3	11,8
19/4/12	13:00	12,3	11,9	10,2	11,9	9/5/12	12:00	10	11,6	7,3	11,8
19/4/12	14:00	12,3	11,9	10,2	11,9	10/5/12	00:00	10	11,6	7,2	11,8
19/4/12	15:00	12,2	11,9	10,2	11,9	10/5/12	12:00	9,9	11,6	7,2	11,8
19/4/12	16:00	12,2	11,9	10,2	11,9	11/5/12	00:00	9,9	11,6	7,1	11,8
19/4/12	17:00	12,2	11,9	10,2	11,9	11/5/12	12:00	9,9	11,6	7,1	11,8
20/4/12	00:00	12,2	11,9	10,1	11,9	12/5/12	00:00	9,8	11,6	7,1	11,8
20/4/12	12:00	12,2	11,9	10	11,9	12/5/12	12:00	9,8	11,5	7	11,8
21/4/12	00:00	12,1	11,9	9,8	11,9	13/5/12	00:00	9,8	11,5	7	11,7
21/4/12	12:00	12	11,9	9,7	11,9	13/5/12	12:00	9,7	11,5	6,9	11,8
22/4/12	00:00	12	11,8	9,6	11,9	14/5/12	00:00	9,7	11,5	6,9	11,7
22/4/12	12:00	11,9	11,9	9,5	11,9	14/5/12	12:00	9,7	11,5	6,9	11,7
23/4/12	00:00	11,8	11,8	9,4	11,9	15/5/12	00:00	9,6	11,5	6,8	11,7
23/4/12	12:00	11,7	11,8	9,3	11,9	15/5/12	12:00	9,6	11,5	6,8	11,7
24/4/12	00:00	11,7	11,8	9,2	11,9	16/5/12	00:00	9,6	11,5	6,8	11,7
24/4/12	12:00	11,6	11,8	9,1	11,9	16/5/12	12:00	9,5	11,4	6,7	11,7
25/4/12	00:00	11,5	11,8	9	11,9	17/5/12	00:00	9,5	11,4	6,7	11,7
25/4/12	12:00	11,5	11,8	9	11,9	17/5/12	12:00	9,5	11,4	6,7	11,7
26/4/12	00:00	11,4	11,8	8,9	11,9	18/5/12	00:00	9,4	11,4	6,6	11,7
26/4/12	12:00	11,3	11,8	8,8	11,9	18/5/12	12:00	9,4	11,3	6,6	11,7
27/4/12	00:00	11,3	11,8	8,7	11,9	19/5/12	00:00	9,4	11,4	6,6	11,7
27/4/12	12:00	11,2	11,8	8,6	11,9	19/5/12	12:00	9,3	11,3	6,5	11,7
28/4/12	00:00	11,1	11,8	8,5	11,9	20/5/12	00:00	9,3	11,3	6,5	11,7
28/4/12	12:00	11,1	11,8	8,5	11,9	20/5/12	12:00	9,3	11,4	6,5	11,7
29/4/12	00:00	11,1	11,8	8,4	11,9	21/5/12	00:00	9,3	11,3	6,5	11,7
29/4/12	12:00	11	11,8	8,3	11,9	21/5/12	12:00	9,3	11,3	6,5	11,7
30/4/12	00:00	10,9	11,8	8,3	11,9	22/5/12	00:00	9,2	11,3	6,4	11,6
30/4/12	12:00	10,9	11,8	8,2	11,9	22/5/12	12:00	9,2	11,3	6,4	11,6
1/5/12	00:00	10,8	11,8	8,2	11,9	23/5/12	00:00	9,2	11,2	6,4	11,6
1/5/12	12:00	10,8	11,8	8,1	11,9	23/5/12	12:00	9,1	11,2	6,3	11,6
2/5/12	00:00	10,7	11,8	8	11,9	24/5/12	00:00	9,1	11,2	6,3	11,6
2/5/12	12:00	10,7	11,8	8	11,9	24/5/12	12:00	9,1	11,2	6,3	11,6
3/5/12	00:00	10,6	11,8	7,9	11,9	25/5/12	00:00	9,1	11,2	6,3	11,6
3/5/12	12:00	10,6	11,7	7,8	11,9	25/5/12	12:00	9,1	11,2	6,2	11,6
4/5/12	00:00	10,5	11,7	7,8	11,8	26/5/12	00:00	9	11,2	6,2	11,6
4/5/12	12:00	10,5	11,7	7,7	11,8	26/5/12	12:00	9	11,2	6,2	11,6
5/5/12	00:00	10,4	11,7	7,7	11,8	27/5/12	00:00	9	11,2	6,2	11,6
5/5/12	12:00	10,4	11,7	7,6	11,8	27/5/12	12:00	9	11,2	6,2	11,5
6/5/12	00:00	10,3	11,7	7,5	11,8	28/5/12	00:00	9	11,1	6,1	11,6

28/5/12	12:00	8,9	11,1	6,1	11,5	19/6/12	12:00	8,2	10,6	5,5	11,2
29/5/12	00:00	8,9	11,1	6,1	11,6	20/6/12	00:00	8,2	10,6	5,4	11,2
29/5/12	12:00	8,9	11,1	6,1	11,5	20/6/12	12:00	8,2	10,5	5,4	11,2
30/5/12	00:00	8,9	11,1	6,1	11,6	21/6/12	00:00	8,2	10,5	5,4	11,2
30/5/12	12:00	8,9	11,1	6	11,5	21/6/12	12:00	8,2	10,5	5,4	11,2
31/5/12	00:00	8,8	11	6	11,5	22/6/12	00:00	8,2	10,5	5,4	11,2
31/5/12	12:00	8,8	11	6	11,5	22/6/12	12:00	8,2	10,5	5,4	11,2
1/6/12	00:00	8,8	11	6	11,5	23/6/12	00:00	8,1	10,5	5,4	11,1
1/6/12	12:00	8,8	11	6	11,5	23/6/12	12:00	8,1	10,5	5,3	11,1
2/6/12	00:00	8,8	11	6	11,5	24/6/12	00:00	8,1	10,5	5,4	11,2
2/6/12	12:00	8,7	11	5,9	11,5	24/6/12	12:00	8,1	10,5	5,3	11,1
3/6/12	00:00	8,7	11	5,9	11,4	25/6/12	00:00	8,1	10,5	5,3	11,1
3/6/12	12:00	8,7	11	5,9	11,4	25/6/12	12:00	8,1	10,4	5,3	11,1
4/6/12	00:00	8,7	10,9	5,9	11,4	26/6/12	00:00	8,1	10,4	5,3	11,1
4/6/12	12:00	8,6	10,9	5,8	11,4	26/6/12	12:00	8	10,4	5,3	11,1
5/6/12	00:00	8,6	10,9	5,8	11,4	27/6/12	00:00	8	10,4	5,3	11,1
5/6/12	12:00	8,6	10,9	5,8	11,4	27/6/12	12:00	8	10,4	5,3	11,1
6/6/12	00:00	8,6	10,8	5,8	11,4	28/6/12	00:00	8	10,4	5,3	11,1
6/6/12	12:00	8,6	10,9	5,8	11,4	28/6/12	12:00	8	10,4	5,3	11,1
7/6/12	00:00	8,5	10,8	5,8	11,4	29/6/12	00:00	8	10,3	5,2	11
7/6/12	12:00	8,6	10,9	5,8	11,4	29/6/12	12:00	8	10,4	5,2	11,1
8/6/12	00:00	8,5	10,8	5,7	11,4	30/6/12	00:00	8	10,4	5,3	11,1
8/6/12	12:00	8,5	10,8	5,7	11,4	30/6/12	12:00	8	10,4	5,2	11,1
9/6/12	00:00	8,5	10,8	5,7	11,4	1/7/12	00:00	8	10,3	5,2	11,1
9/6/12	12:00	8,5	10,8	5,7	11,4	1/7/12	12:00	8	10,3	5,2	11,1
10/6/12	00:00	8,5	10,8	5,7	11,4	2/7/12	00:00	8	10,3	5,2	11
10/6/12	12:00	8,5	10,8	5,7	11,3	2/7/12	12:00	7,9	10,3	5,2	11
11/6/12	00:00	8,5	10,8	5,6	11,3	3/7/12	00:00	8	10,3	5,2	11
11/6/12	12:00	8,4	10,8	5,7	11,3	3/7/12	12:00	7,9	10,3	5,2	11
12/6/12	00:00	8,4	10,7	5,6	11,3	4/7/12	00:00	8	10,3	5,2	11
12/6/12	12:00	8,4	10,7	5,6	11,3	4/7/12	12:00	7,9	10,3	5,2	11
13/6/12	00:00	8,4	10,7	5,6	11,3	5/7/12	00:00	7,9	10,3	5,2	11
13/6/12	12:00	8,4	10,7	5,6	11,3	5/7/12	12:00	7,9	10,3	5,1	11
14/6/12	00:00	8,4	10,7	5,6	11,3	6/7/12	00:00	7,9	10,3	5,1	11
14/6/12	12:00	8,3	10,7	5,6	11,3	6/7/12	12:00	7,9	10,3	5,1	11
15/6/12	00:00	8,4	10,7	5,6	11,3	7/7/12	00:00	7,8	10,2	5,1	11
15/6/12	12:00	8,3	10,7	5,5	11,3	7/7/12	12:00	7,9	10,2	5,1	11
16/6/12	00:00	8,3	10,7	5,5	11,3	8/7/12	00:00	7,9	10,2	5,1	10,9
16/6/12	12:00	8,3	10,6	5,5	11,2	8/7/12	12:00	7,8	10,2	5,1	11
17/6/12	00:00	8,3	10,6	5,5	11,2	9/7/12	00:00	7,8	10,2	5,1	11
17/6/12	12:00	8,3	10,6	5,5	11,2	9/7/12	12:00	7,8	10,2	5,1	11
18/6/12	00:00	8,3	10,6	5,5	11,2	10/7/12	00:00	7,9	10,2	5,1	10,9
18/6/12	12:00	8,3	10,6	5,5	11,2	10/7/12	12:00	7,8	10,2	5,1	10,9
19/6/12	00:00	8,2	10,6	5,5	11,2	11/7/12	00:00	7,8	10,2	5,1	10,9

11/7/12	12:00	7,8	10,2	5,1	10,9	2/8/12	12:00	7,5	9,9	4,5	10,7
12/7/12	00:00	7,8	10,2	5	10,9	3/8/12	00:00	7,5	9,9	4,5	10,7
12/7/12	12:00	7,8	10,1	5	10,9	3/8/12	12:00	7,4	9,9	4,4	10,7
13/7/12	00:00	7,8	10,1	5	10,9	4/8/12	00:00	7,4	9,9	4,4	10,7
13/7/12	12:00	7,7	10,1	5	10,9	4/8/12	12:00	7,4	9,9	4,3	10,7
14/7/12	00:00	7,7	10,1	5	10,9	5/8/12	00:00	7,4	9,9	4,3	10,7
14/7/12	12:00	7,7	10,1	5	10,9	5/8/12	12:00	7,4	9,9	4,3	10,7
15/7/12	00:00	7,8	10,1	5	10,9	6/8/12	00:00	7,3	9,9	4,3	10,7
15/7/12	12:00	7,7	10,1	5	10,9	6/8/12	12:00	7,3	9,8	4,2	10,7
16/7/12	00:00	7,7	10,1	5	10,9	7/8/12	00:00	7,3	9,9	4,2	10,7
16/7/12	12:00	7,7	10,1	5	10,8	7/8/12	12:00	7,3	9,9	4,2	10,7
17/7/12	00:00	7,7	10,1	4,9	10,8	8/8/12	00:00	7,3	9,9	4,1	10,7
17/7/12	12:00	7,7	10,1	4,9	10,8	8/8/12	12:00	7,2	9,8	4,1	10,7
18/7/12	00:00	7,7	10,1	4,9	10,8	9/8/12	00:00	7,2	9,8	4,1	10,7
18/7/12	12:00	7,7	10	4,9	10,8	9/8/12	12:00	7,2	9,8	4,1	10,7
19/7/12	00:00	7,7	10	4,9	10,8	10/8/12	00:00	7,2	9,8	4,1	10,7
19/7/12	12:00	7,7	10	4,9	10,8	10/8/12	12:00	7,1	9,8	4,1	10,7
20/7/12	00:00	7,6	10	4,9	10,8	11/8/12	00:00	7,1	9,8	4,1	10,7
20/7/12	12:00	7,7	10	4,9	10,8	11/8/12	12:00	7,1	9,8	4,1	10,7
21/7/12	00:00	7,6	10	4,9	10,8	12/8/12	00:00	7,1	9,8	4,1	10,7
21/7/12	12:00	7,6	10	4,9	10,8	12/8/12	12:00	7,1	9,8	4,1	10,7
22/7/12	00:00	7,6	10	4,9	10,8	13/8/12	00:00	7,1	9,8	4,1	10,7
22/7/12	12:00	7,6	10	4,9	10,8	13/8/12	12:00	7,1	9,8	4,1	10,7
23/7/12	00:00	7,6	10	4,9	10,8	14/8/12	00:00	7,1	9,8	4	10,7
23/7/12	12:00	7,6	10	4,9	10,8	14/8/12	12:00	7,1	9,8	4	10,7
24/7/12	00:00	7,6	10	4,9	10,8	15/8/12	00:00	7,1	9,8	3,9	10,7
24/7/12	12:00	7,6	10	4,9	10,8	15/8/12	12:00	7	9,8	3,9	10,7
25/7/12	00:00	7,6	10	4,9	10,8	16/8/12	00:00	7	9,7	3,9	10,6
25/7/12	12:00	7,6	10	4,9	10,8	16/8/12	12:00	7	9,7	3,8	10,6
26/7/12	00:00	7,6	10	4,9	10,8	17/8/12	00:00	7	9,7	3,8	10,7
26/7/12	12:00	7,6	9,9	4,9	10,8	17/8/12	12:00	6,9	9,7	3,7	10,6
27/7/12	00:00	7,6	9,9	4,9	10,7	18/8/12	00:00	6,9	9,7	3,7	10,6
27/7/12	12:00	7,6	9,9	4,9	10,8	18/8/12	12:00	6,9	9,7	3,6	10,6
28/7/12	00:00	7,6	9,9	4,9	10,8	19/8/12	00:00	6,9	9,7	3,6	10,6
28/7/12	12:00	7,6	9,9	4,9	10,7	19/8/12	12:00	6,8	9,7	3,6	10,6
29/7/12	00:00	7,6	9,9	4,9	10,7	20/8/12	00:00	6,8	9,7	3,5	10,6
29/7/12	12:00	7,6	9,9	4,9	10,8	20/8/12	12:00	6,8	9,7	3,5	10,6
30/7/12	00:00	7,6	9,9	4,8	10,7	21/8/12	00:00	6,7	9,7	3,5	10,6
30/7/12	12:00	7,6	9,9	4,8	10,7	21/8/12	12:00	6,7	9,7	3,4	10,6
31/7/12	00:00	7,6	9,9	4,7	10,7	22/8/12	00:00	6,7	9,6	3,4	10,6
31/7/12	12:00	7,5	9,9	4,7	10,7	22/8/12	12:00	6,7	9,7	3,4	10,6
1/8/12	00:00	7,5	9,9	4,6	10,7	23/8/12	00:00	6,6	9,6	3,4	10,6
1/8/12	12:00	7,5	9,9	4,6	10,7	23/8/12	12:00	6,6	9,6	3,4	10,6
2/8/12	00:00	7,5	9,9	4,6	10,7	24/8/12	00:00	6,6	9,6	3,4	10,6

24/8/12	12:00	6,6	9,6	3,3	10,6	15/9/12	12:00	6	9,2	2,7	10,3
25/8/12	00:00	6,6	9,6	3,3	10,6	16/9/12	00:00	5,9	9,2	2,6	10,2
25/8/12	12:00	6,5	9,6	3,3	10,5	16/9/12	12:00	5,9	9,1	2,6	10,2
26/8/12	00:00	6,5	9,6	3,3	10,6	17/9/12	00:00	5,9	9,1	2,6	10,2
26/8/12	12:00	6,5	9,6	3,2	10,6	17/9/12	12:00	5,9	9,1	2,6	10,2
27/8/12	00:00	6,5	9,6	3,2	10,6	18/9/12	00:00	5,9	9,1	2,6	10,2
27/8/12	12:00	6,5	9,6	3,2	10,5	18/9/12	12:00	5,8	9,1	2,5	10,2
28/8/12	00:00	6,4	9,5	3,2	10,5	19/9/12	00:00	5,8	9,1	2,5	10,2
28/8/12	12:00	6,4	9,5	3,2	10,5	19/9/12	12:00	5,8	9,1	2,5	10,2
29/8/12	00:00	6,4	9,5	3,2	10,5	20/9/12	00:00	5,8	9,1	2,5	10,2
29/8/12	12:00	6,4	9,5	3,2	10,5	20/9/12	12:00	5,8	9,1	2,5	10,2
30/8/12	00:00	6,4	9,5	3,1	10,5	21/9/12	00:00	5,7	9	2,4	10,2
30/8/12	12:00	6,4	9,5	3,1	10,5	21/9/12	12:00	5,7	9	2,4	10,2
31/8/12	00:00	6,4	9,5	3,1	10,5	22/9/12	00:00	5,7	9	2,4	10,2
31/8/12	12:00	6,3	9,5	3,1	10,5	22/9/12	12:00	5,7	9	2,4	10,2
1/9/12	00:00	6,3	9,5	3,1	10,5	23/9/12	00:00	5,7	9	2,4	10,1
1/9/12	12:00	6,3	9,5	3,1	10,5	23/9/12	12:00	5,7	9	2,3	10,1
2/9/12	00:00	6,3	9,4	3,1	10,5	24/9/12	00:00	5,7	9	2,3	10,1
2/9/12	12:00	6,3	9,4	3	10,5	24/9/12	12:00	5,7	9	2,3	10,1
3/9/12	00:00	6,3	9,4	3	10,5	25/9/12	00:00	5,6	8,9	2,2	10,1
3/9/12	12:00	6,2	9,4	3	10,4	25/9/12	12:00	5,6	9	2,2	10,1
4/9/12	00:00	6,2	9,4	3	10,5	26/9/12	00:00	5,6	8,9	2,1	10,1
4/9/12	12:00	6,2	9,4	3,1	10,4	26/9/12	12:00	5,6	8,9	2,1	10,1
5/9/12	00:00	6,2	9,4	3	10,4	27/9/12	00:00	5,5	8,9	2,1	10,1
5/9/12	12:00	6,2	9,4	3,1	10,4	27/9/12	12:00	5,5	8,9	2,1	10,1
6/9/12	00:00	6,2	9,4	3,1	10,4	28/9/12	00:00	5,5	8,9	2	10
6/9/12	12:00	6,2	9,4	3,1	10,4	28/9/12	12:00	5,5	8,9	2	10,1
7/9/12	00:00	6,2	9,3	3,1	10,4	29/9/12	00:00	5,5	8,9	2	10
7/9/12	12:00	6,2	9,3	3	10,4	29/9/12	12:00	5,5	8,9	2	10
8/9/12	00:00	6,2	9,3	3	10,4	30/9/12	00:00	5,4	8,8	1,9	10
8/9/12	12:00	6,2	9,3	3	10,4	30/9/12	12:00	5,4	8,8	1,9	10
9/9/12	00:00	6,2	9,3	3	10,4	1/10/12	00:00	5,4	8,8	1,8	10
9/9/12	12:00	6,2	9,3	2,9	10,4	1/10/12	12:00	5,4	8,8	1,8	10
10/9/12	00:00	6,1	9,3	2,9	10,3	2/10/12	00:00	5,3	8,8	1,7	10
10/9/12	12:00	6,1	9,2	2,9	10,3	2/10/12	12:00	5,3	8,8	1,7	10
11/9/12	00:00	6,1	9,3	2,9	10,3	3/10/12	00:00	5,2	8,8	1,6	9,9
11/9/12	12:00	6,1	9,3	2,9	10,4	3/10/12	12:00	5,2	8,8	1,6	10
12/9/12	00:00	6,1	9,2	2,8	10,3	4/10/12	00:00	5,2	8,8	1,6	10
12/9/12	12:00	6,1	9,2	2,8	10,3	4/10/12	12:00	5,2	8,7	1,5	10
13/9/12	00:00	6	9,2	2,8	10,3	5/10/12	00:00	5,1	8,7	1,5	9,9
13/9/12	12:00	6	9,2	2,7	10,3	5/10/12	12:00	5,1	8,7	1,5	10
14/9/12	00:00	6	9,2	2,7	10,3	6/10/12	00:00	5,1	8,7	1,4	9,9
14/9/12	12:00	6	9,2	2,7	10,3	6/10/12	12:00	5	8,7	1,4	9,9
15/9/12	00:00	6	9,2	2,7	10,3	7/10/12	00:00	5	8,7	1,4	9,9

7/10/12	12:00	5	8,7	1,3	9,9	29/10/12	12:00	5,5	8,3	2,7	9,6
8/10/12	00:00	5	8,7	1,3	9,9	30/10/12	00:00	5,5	8,3	2,7	9,6
8/10/12	12:00	4,9	8,7	1,3	9,9	30/10/12	12:00	5,5	8,3	2,8	9,6
9/10/12	00:00	4,9	8,6	1,3	9,9	31/10/12	00:00	5,5	8,3	2,8	9,6
9/10/12	12:00	4,9	8,6	1,3	9,8	31/10/12	12:00	5,5	8,3	2,8	9,6
10/10/12	00:00	4,9	8,6	1,2	9,8	1/11/12	00:00	5,5	8,2	2,8	9,6
10/10/12	12:00	4,8	8,6	1,2	9,8	1/11/12	12:00	5,5	8,3	2,9	9,6
11/10/12	00:00	4,9	8,6	1,2	9,8	2/11/12	00:00	5,5	8,2	2,8	9,6
11/10/12	12:00	4,8	8,6	1,3	9,8	2/11/12	12:00	5,6	8,2	2,9	9,6
12/10/12	00:00	4,8	8,6	1,3	9,8	3/11/12	00:00	5,6	8,2	2,9	9,6
12/10/12	12:00	4,8	8,6	1,3	9,8	3/11/12	12:00	5,6	8,2	2,9	9,5
13/10/12	00:00	4,8	8,6	1,4	9,8	4/11/12	00:00	5,6	8,2	2,9	9,6
13/10/12	12:00	4,8	8,5	1,4	9,8	4/11/12	12:00	5,6	8,2	2,9	9,5
14/10/12	00:00	4,8	8,5	1,5	9,8	5/11/12	00:00	5,6	8,2	2,9	9,5
14/10/12	12:00	4,8	8,5	1,5	9,8	5/11/12	12:00	5,6	8,2	3	9,5
15/10/12	00:00	4,8	8,5	1,6	9,8	6/11/12	00:00	5,6	8,2	2,9	9,5
15/10/12	12:00	4,8	8,5	1,7	9,8	6/11/12	12:00	5,6	8,2	3	9,5
16/10/12	00:00	4,9	8,5	1,7	9,8	7/11/12	00:00	5,7	8,2	3	9,5
16/10/12	12:00	4,9	8,5	1,8	9,8	7/11/12	12:00	5,7	8,2	3	9,5
17/10/12	00:00	4,9	8,5	1,8	9,8	8/11/12	00:00	5,7	8,2	3	9,5
17/10/12	12:00	4,9	8,5	1,9	9,8	8/11/12	12:00	5,7	8,2	3	9,5
18/10/12	00:00	4,9	8,4	1,9	9,7	9/11/12	00:00	5,7	8,2	3	9,5
18/10/12	12:00	5	8,4	2	9,7	9/11/12	12:00	5,7	8,2	3	9,5
19/10/12	00:00	5	8,5	2,1	9,7	10/11/12	00:00	5,7	8,2	3	9,5
19/10/12	12:00	5	8,4	2,1	9,7	10/11/12	12:00	5,7	8,2	3	9,5
20/10/12	00:00	5	8,4	2,1	9,7	11/11/12	00:00	5,7	8,2	3,1	9,5
20/10/12	12:00	5,1	8,4	2,2	9,7	11/11/12	12:00	5,7	8,2	3,1	9,5
21/10/12	00:00	5,1	8,4	2,2	9,7	12/11/12	00:00	5,8	8,2	3,1	9,5
21/10/12	12:00	5,1	8,4	2,3	9,7	12/11/12	12:00	5,8	8,2	3,1	9,5
22/10/12	00:00	5,1	8,4	2,3	9,7	13/11/12	00:00	5,8	8,2	3,1	9,5
22/10/12	12:00	5,2	8,4	2,3	9,7	13/11/12	12:00	5,8	8,2	3,1	9,5
23/10/12	00:00	5,2	8,4	2,4	9,7	14/11/12	00:00	5,8	8,2	3,1	9,5
23/10/12	12:00	5,2	8,3	2,4	9,7	14/11/12	12:00	5,8	8,1	3,1	9,4
24/10/12	00:00	5,2	8,3	2,4	9,6	15/11/12	00:00	5,8	8,2	3,1	9,5
24/10/12	12:00	5,3	8,4	2,5	9,7	15/11/12	12:00	5,8	8,2	3,1	9,5
25/10/12	00:00	5,3	8,3	2,5	9,6	16/11/12	00:00	5,8	8,2	3,1	9,5
25/10/12	12:00	5,3	8,3	2,5	9,7	16/11/12	12:00	5,8	8,2	3,2	9,5
26/10/12	00:00	5,4	8,3	2,6	9,7	17/11/12	00:00	5,8	8,2	3,2	9,5
26/10/12	12:00	5,3	8,3	2,5	9,6	17/11/12	12:00	5,8	8,2	3,2	9,5
27/10/12	00:00	5,4	8,3	2,6	9,6	18/11/12	00:00	5,8	8,1	3,2	9,4
27/10/12	12:00	5,4	8,2	2,6	9,6	18/11/12	12:00	5,8	8,1	3,2	9,4
28/10/12	00:00	5,4	8,3	2,6	9,6	19/11/12	00:00	5,9	8,1	3,2	9,4
28/10/12	12:00	5,4	8,3	2,7	9,6	19/11/12	12:00	5,9	8,1	3,2	9,4
29/10/12	00:00	5,4	8,3	2,7	9,6	20/11/12	00:00	5,9	8,1	3,2	9,4

20/11/12	12:00	5,9	8,1	3,2	9,4	12/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,3
21/11/12	00:00	5,9	8,1	3,2	9,4	13/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3
21/11/12	12:00	5,9	8,2	3,2	9,4	13/12/12	12:00	6	8,1	3,3	9,3
22/11/12	00:00	5,9	8,1	3,2	9,4	14/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3
22/11/12	12:00	5,9	8,2	3,2	9,4	14/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,3
23/11/12	00:00	5,9	8,1	3,3	9,4	15/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3
23/11/12	12:00	5,9	8,1	3,3	9,4	15/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,3
24/11/12	00:00	5,9	8,2	3,3	9,4	16/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3
24/11/12	12:00	5,9	8,1	3,3	9,4	16/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,3
25/11/12	00:00	6	8,2	3,3	9,4	17/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3
25/11/12	12:00	5,9	8,2	3,3	9,4	17/12/12	12:00	6	8	3,4	9,3
26/11/12	00:00	5,9	8,1	3,3	9,4	18/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3
26/11/12	12:00	5,9	8,1	3,3	9,4	18/12/12	12:00	6	8,1	3,3	9,3
27/11/12	00:00	5,9	8,1	3,3	9,4	19/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3
27/11/12	12:00	6	8,1	3,3	9,4	19/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,3
28/11/12	00:00	6	8,1	3,3	9,4	20/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3
28/11/12	12:00	6	8,1	3,3	9,4	20/12/12	12:00	6	8	3,3	9,2
29/11/12	00:00	6	8,1	3,3	9,4	21/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3
29/11/12	12:00	5,9	8,1	3,3	9,4	21/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,3
30/11/12	00:00	6	8,2	3,4	9,4	22/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3
30/11/12	12:00	6	8,1	3,3	9,4	22/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,3
1/12/12	00:00	6	8,2	3,3	9,4	23/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3
1/12/12	12:00	6	8,1	3,3	9,4	23/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,3
2/12/12	00:00	6	8,1	3,3	9,4	24/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3
2/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,4	24/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,3
3/12/12	00:00	6	8,1	3,3	9,4	25/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3
3/12/12	12:00	6	8,1	3,3	9,3	25/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,3
4/12/12	00:00	6	8,1	3,3	9,4	26/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3
4/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,4	26/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,3
5/12/12	00:00	6	8,1	3,3	9,4	27/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3
5/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,4	27/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,3
6/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,4	28/12/12	00:00	6	8	3,4	9,2
6/12/12	12:00	6	8,1	3,3	9,3	28/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,3
7/12/12	00:00	6	8,1	3,3	9,4	29/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3
7/12/12	12:00	6	8,1	3,3	9,3	29/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,3
8/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3	30/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3
8/12/12	12:00	6	8,1	3,3	9,3	30/12/12	12:00	6	8	3,4	9,3
9/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3	31/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3
9/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,3	31/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,3
10/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3	1/1/13	00:00	6	8,1	3,4	9,3
10/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,3	1/1/13	12:00	6	8,1	3,4	9,3
11/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3	2/1/13	00:00	6	8,1	3,4	9,2
11/12/12	12:00	6	8,1	3,4	9,3	2/1/13	12:00	6	8,1	3,4	9,3
12/12/12	00:00	6	8,1	3,4	9,3	3/1/13	00:00	6	8	3,4	9,2

3/1/13	12:00	6	8	3,4	9,2	25/1/13	12:00	6,1	8	3,7	9,2
4/1/13	00:00	6	8,1	3,4	9,2	26/1/13	00:00	6,1	8	3,7	9,2
4/1/13	12:00	6	8	3,4	9,2	26/1/13	12:00	6,1	8	3,7	9,1
5/1/13	00:00	6	8	3,4	9,2	27/1/13	00:00	6,1	7,9	3,7	9,1
5/1/13	12:00	6	8	3,4	9,2	27/1/13	12:00	6,2	8	3,7	9,2
6/1/13	00:00	6	8,1	3,4	9,3	28/1/13	00:00	6,2	8	3,7	9,1
6/1/13	12:00	6	8	3,4	9,2	28/1/13	12:00	6,1	8	3,7	9,1
7/1/13	00:00	6	8	3,4	9,2	29/1/13	00:00	6,2	8	3,7	9,2
7/1/13	12:00	6	8	3,4	9,2	29/1/13	12:00	6,2	8	3,7	9,1
8/1/13	00:00	6	8	3,4	9,2	30/1/13	00:00	6,2	8	3,7	9,2
8/1/13	12:00	6	8	3,4	9,2	30/1/13	12:00	6,2	8	3,7	9,2
9/1/13	00:00	6	8	3,4	9,2	31/1/13	00:00	6,2	8	3,7	9,2
9/1/13	12:00	6	8	3,4	9,2	31/1/13	12:00	6,2	8	3,6	9,1
10/1/13	00:00	6	8	3,4	9,2	1/2/13	00:00	6,1	8	3,6	9,1
10/1/13	12:00	6	8	3,4	9,2	1/2/13	12:00	6,1	7,9	3,6	9,1
11/1/13	00:00	6	8	3,4	9,2	2/2/13	00:00	6,2	8	3,6	9,1
11/1/13	12:00	6	8	3,4	9,2	2/2/13	12:00	6,1	7,9	3,6	9,1
12/1/13	00:00	6	8	3,4	9,2	3/2/13	00:00	6,1	7,9	3,6	9,1
12/1/13	12:00	6	8	3,4	9,2	3/2/13	12:00	6,1	7,9	3,6	9,1
13/1/13	00:00	6	8	3,4	9,2	4/2/13	00:00	6,2	7,9	3,6	9,1
13/1/13	12:00	6	8	3,4	9,2	4/2/13	12:00	6,1	7,9	3,5	9,1
14/1/13	00:00	6	8	3,4	9,2	5/2/13	00:00	6,1	7,9	3,6	9,1
14/1/13	12:00	6	8	3,4	9,2	5/2/13	12:00	6,1	8	3,6	9,1
15/1/13	00:00	6	8	3,4	9,2	6/2/13	00:00	6,1	7,9	3,6	9,1
15/1/13	12:00	6	8	3,4	9,2	6/2/13	12:00	6,2	8	3,6	9,2
16/1/13	00:00	6	8	3,4	9,2	7/2/13	00:00	6,1	8	3,6	9,1
16/1/13	12:00	6	8	3,4	9,2	7/2/13	12:00	6,1	7,9	3,5	9,1
17/1/13	00:00	6	8	3,5	9,2	8/2/13	00:00	6,1	7,9	3,5	9,1
17/1/13	12:00	6	8	3,5	9,2	8/2/13	12:00	6,1	7,9	3,5	9,1
18/1/13	00:00	6	8	3,5	9,2	9/2/13	00:00	6,1	7,9	3,5	9,1
18/1/13	12:00	6	8	3,5	9,2	9/2/13	12:00	6,1	7,9	3,5	9,1
19/1/13	00:00	6	8	3,5	9,2	10/2/13	00:00	6,1	7,9	3,5	9,1
19/1/13	12:00	6	7,9	3,5	9,1	10/2/13	12:00	6,1	7,9	3,5	9,1
20/1/13	00:00	6	8	3,5	9,2	11/2/13	00:00	6,1	7,9	3,5	9,1
20/1/13	12:00	6	8	3,5	9,2	11/2/13	12:00	6,1	7,9	3,5	9,1
21/1/13	00:00	6,1	8	3,6	9,2	12/2/13	00:00	6,1	8	3,5	9,1
21/1/13	12:00	6	8	3,6	9,1	12/2/13	12:00	6,1	7,9	3,5	9,1
22/1/13	00:00	6,1	7,9	3,6	9,2	13/2/13	00:00	6,1	8	3,5	9,1
22/1/13	12:00	6,1	8	3,6	9,2	13/2/13	12:00	6,1	7,9	3,5	9,1
23/1/13	00:00	6,1	8	3,6	9,2	14/2/13	00:00	6,1	7,9	3,5	9,1
23/1/13	12:00	6,1	8	3,7	9,2	14/2/13	12:00	6,1	7,9	3,5	9,1
24/1/13	00:00	6,1	8	3,7	9,2	15/2/13	00:00	6	7,9	3,5	9,1
24/1/13	12:00	6,1	7,9	3,7	9,1	15/2/13	12:00	6,1	7,9	3,5	9,1
25/1/13	00:00	6,1	8	3,7	9,2	16/2/13	00:00	6,1	7,9	3,5	9,1

16/2/13	12:00	6,1	7,9	3,5	9,1	10/3/13	12:00	5,5	7,9	2,4	9,1
17/2/13	00:00	6,1	7,9	3,6	9,1	11/3/13	00:00	5,4	7,9	2,3	9
17/2/13	12:00	6,1	7,9	3,6	9,1	11/3/13	12:00	5,4	7,9	2,3	9
18/2/13	00:00	6,1	7,9	3,6	9,1	12/3/13	00:00	5,4	7,9	2,3	9
18/2/13	12:00	6,1	7,9	3,6	9,1	12/3/13	12:00	5,4	7,9	2,2	9
19/2/13	00:00	6,1	8	3,7	9,1	13/3/13	00:00	5,3	7,9	2,2	9
19/2/13	12:00	6,1	7,9	3,7	9,1	13/3/13	12:00	5,3	7,9	2,2	9
20/2/13	00:00	6,1	7,9	3,7	9,1	14/3/13	00:00	5,3	7,9	2,1	9
20/2/13	12:00	6,1	7,9	3,7	9,1	14/3/13	12:00	5,3	7,9	2,1	9
21/2/13	00:00	6,2	8	3,8	9,1	15/3/13	00:00	5,2	7,8	2	9
21/2/13	12:00	6,2	7,9	3,8	9,1	15/3/13	12:00	5,2	7,8	2	9
22/2/13	00:00	6,2	7,9	3,8	9,1	16/3/13	00:00	5,2	7,8	2	9
22/2/13	12:00	6,2	7,9	3,7	9,1	16/3/13	12:00	5,2	7,8	2	9
23/2/13	00:00	6,2	7,9	3,7	9,1	17/3/13	00:00	5,1	7,8	1,9	9
23/2/13	12:00	6,2	7,9	3,7	9,1	17/3/13	12:00	5,1	7,8	1,9	9
24/2/13	00:00	6,2	7,9	3,7	9,1	18/3/13	00:00	5,1	7,8	1,9	9
24/2/13	12:00	6,2	7,9	3,6	9,1	18/3/13	12:00	5,1	7,8	1,8	9
25/2/13	00:00	6,2	7,9	3,6	9,1	19/3/13	00:00	5,1	7,8	1,8	9
25/2/13	12:00	6,2	7,9	3,5	9,1	19/3/13	12:00	5	7,8	1,8	9
26/2/13	00:00	6,1	7,9	3,5	9,1	20/3/13	00:00	5	7,8	1,8	9
26/2/13	12:00	6,1	7,9	3,5	9,1	20/3/13	12:00	5	7,8	1,7	9
27/2/13	00:00	6,1	7,9	3,4	9,1	21/3/13	00:00	5	7,8	1,7	9
27/2/13	12:00	6,1	7,9	3,4	9,1	21/3/13	12:00	5	7,8	1,7	9
28/2/13	00:00	6,1	7,9	3,3	9,1	22/3/13	00:00	5	7,8	1,7	9
28/2/13	12:00	6,1	7,9	3,2	9,1	22/3/13	12:00	4,9	7,8	1,6	9
1/3/13	00:00	6	7,9	3,2	9,1	23/3/13	00:00	4,9	7,8	1,6	8,9
1/3/13	12:00	6	7,9	3,1	9,1	23/3/13	12:00	4,9	7,8	1,6	8,9
2/3/13	00:00	6	7,9	3,1	9,1	24/3/13	00:00	4,8	7,7	1,5	8,9
2/3/13	12:00	6	8	3,1	9,1	24/3/13	12:00	4,8	7,7	1,5	8,9
3/3/13	00:00	5,9	7,9	3	9,1	25/3/13	00:00	4,8	7,7	1,5	8,9
3/3/13	12:00	5,9	7,9	2,9	9,1	25/3/13	12:00	4,8	7,7	1,5	8,9
4/3/13	00:00	5,9	7,9	2,9	9,1	26/3/13	00:00	4,8	7,7	1,6	9
4/3/13	12:00	5,8	7,9	2,8	9,1	26/3/13	12:00	4,8	7,7	1,6	8,9
5/3/13	00:00	5,8	7,9	2,8	9,1	27/3/13	00:00	4,8	7,7	1,6	8,9
5/3/13	12:00	5,8	7,9	2,7	9,1	27/3/13	12:00	4,8	7,7	1,6	8,9
6/3/13	00:00	5,7	7,9	2,7	9,1	28/3/13	00:00	4,7	7,7	1,5	8,9
6/3/13	12:00	5,7	7,9	2,6	9,1	28/3/13	12:00	4,7	7,7	1,6	8,9
7/3/13	00:00	5,7	7,9	2,6	9,1	29/3/13	00:00	4,7	7,7	1,6	8,9
7/3/13	12:00	5,6	7,9	2,5	9	29/3/13	12:00	4,7	7,7	1,6	8,9
8/3/13	00:00	5,6	7,9	2,4	9	30/3/13	00:00	4,7	7,7	1,6	8,9
8/3/13	12:00	5,6	7,9	2,4	9	30/3/13	12:00	4,7	7,6	1,6	8,9
9/3/13	00:00	5,5	7,9	2,4	9	31/3/13	00:00	4,7	7,6	1,6	8,9
9/3/13	12:00	5,5	7,9	2,4	9,1	31/3/13	12:00	4,7	7,6	1,6	8,9
10/3/13	00:00	5,5	7,9	2,4	9,1	1/4/13	00:00	4,7	7,6	1,6	8,9

1/4/13	12:00	4,7	7,6	1,6	8,9	23/4/13	12:00	4	7,3	0,6	8,7
2/4/13	00:00	4,7	7,6	1,6	8,9	24/4/13	00:00	4	7,4	0,7	8,7
2/4/13	12:00	4,7	7,6	1,6	8,9	24/4/13	12:00	4	7,4	0,7	8,7
3/4/13	00:00	4,7	7,6	1,6	8,9	25/4/13	00:00	4	7,3	0,7	8,7
3/4/13	12:00	4,7	7,6	1,5	8,9	25/4/13	12:00	4	7,3	0,7	8,7
4/4/13	00:00	4,7	7,6	1,5	8,9	26/4/13	00:00	4	7,3	0,7	8,7
4/4/13	12:00	4,7	7,6	1,5	8,9	26/4/13	12:00	4	7,3	0,7	8,7
5/4/13	00:00	4,7	7,6	1,4	8,9	27/4/13	00:00	4	7,3	0,7	8,7
5/4/13	12:00	4,6	7,6	1,4	8,8	27/4/13	12:00	4	7,3	0,7	8,7
6/4/13	00:00	4,6	7,6	1,3	8,8	28/4/13	00:00	4	7,3	0,7	8,7
6/4/13	12:00	4,6	7,6	1,3	8,8	28/4/13	12:00	4	7,3	0,7	8,7
7/4/13	00:00	4,6	7,6	1,3	8,9	29/4/13	00:00	4	7,3	0,7	8,7
7/4/13	12:00	4,6	7,6	1,2	8,9	29/4/13	12:00	4	7,3	0,7	8,7
8/4/13	00:00	4,5	7,6	1,2	8,8	30/4/13	00:00	4	7,3	0,7	8,6
8/4/13	12:00	4,5	7,5	1,1	8,8	30/4/13	12:00	4	7,3	0,7	8,7
9/4/13	00:00	4,5	7,6	1,1	8,8	1/5/13	00:00	4	7,3	0,7	8,7
9/4/13	12:00	4,5	7,5	1,1	8,8	1/5/13	12:00	4	7,3	0,7	8,7
10/4/13	00:00	4,5	7,5	1,1	8,9	2/5/13	00:00	3,9	7,2	0,7	8,7
10/4/13	12:00	4,4	7,5	1	8,8	2/5/13	12:00	4	7,3	0,7	8,7
11/4/13	00:00	4,4	7,5	1	8,8	3/5/13	00:00	3,9	7,3	0,6	8,6
11/4/13	12:00	4,4	7,5	1	8,8	3/5/13	12:00	3,9	7,2	0,7	8,6
12/4/13	00:00	4,4	7,5	0,9	8,8	4/5/13	00:00	3,9	7,2	0,6	8,6
12/4/13	12:00	4,4	7,5	0,9	8,8	4/5/13	12:00	3,9	7,2	0,6	8,6
13/4/13	00:00	4,4	7,5	0,9	8,8	5/5/13	00:00	3,9	7,2	0,6	8,6
13/4/13	12:00	4,3	7,5	0,9	8,8	5/5/13	12:00	3,9	7,2	0,7	8,6
14/4/13	00:00	4,3	7,5	0,9	8,8	6/5/13	00:00	3,9	7,2	0,7	8,6
14/4/13	12:00	4,3	7,5	0,9	8,8	6/5/13	12:00	3,9	7,2	0,7	8,6
15/4/13	00:00	4,3	7,5	0,9	8,8	7/5/13	00:00	3,9	7,2	0,7	8,6
15/4/13	12:00	4,3	7,5	0,8	8,8	7/5/13	12:00	3,9	7,2	0,7	8,6
16/4/13	00:00	4,2	7,5	0,8	8,8	8/5/13	00:00	3,9	7,2	0,8	8,6
16/4/13	12:00	4,2	7,5	0,8	8,8	8/5/13	12:00	4	7,2	0,9	8,6
17/4/13	00:00	4,2	7,5	0,8	8,8	9/5/13	00:00	3,9	7,2	0,9	8,6
17/4/13	12:00	4,2	7,5	0,7	8,8	9/5/13	12:00	3,9	7,2	0,9	8,6
18/4/13	00:00	4,2	7,4	0,7	8,8	10/5/13	00:00	4	7,2	1	8,6
18/4/13	12:00	4,1	7,4	0,7	8,8	10/5/13	12:00	4	7,2	1	8,6
19/4/13	00:00	4,1	7,4	0,6	8,7	11/5/13	00:00	4	7,1	1	8,6
19/4/13	12:00	4,1	7,4	0,6	8,7	11/5/13	12:00	4	7,1	1	8,6
20/4/13	00:00	4,1	7,4	0,6	8,7	12/5/13	00:00	4	7,1	1	8,5
20/4/13	12:00	4,1	7,4	0,6	8,7	12/5/13	12:00	4	7,1	1	8,5
21/4/13	00:00	4,1	7,4	0,6	8,7	13/5/13	00:00	4	7,1	1	8,5
21/4/13	12:00	4,1	7,4	0,7	8,8	13/5/13	12:00	4,1	7,1	1,1	8,6
22/4/13	00:00	4	7,4	0,6	8,7	14/5/13	00:00	4,1	7,1	1,1	8,6
22/4/13	12:00	4	7,4	0,7	8,7	14/5/13	12:00	4,1	7,1	1,1	8,5
23/4/13	00:00	4	7,4	0,7	8,7	15/5/13	00:00	4,1	7,1	1,1	8,5

15/5/13	12:00	4,1	7,1	1,1	8,5	6/6/13	12:00	4,8	7	2,1	8,4
16/5/13	00:00	4,1	7,1	1,1	8,5	7/6/13	00:00	4,8	7	2,2	8,4
16/5/13	12:00	4,1	7,1	1,2	8,5	7/6/13	12:00	4,8	6,9	2,1	8,3
17/5/13	00:00	4,1	7,1	1,2	8,5	8/6/13	00:00	4,8	7	2,2	8,4
17/5/13	12:00	4,1	7,1	1,2	8,5	8/6/13	12:00	4,8	7	2,2	8,4
18/5/13	00:00	4,2	7,1	1,3	8,5	9/6/13	00:00	4,8	7	2,2	8,4
18/5/13	12:00	4,1	7,1	1,3	8,5	9/6/13	12:00	4,9	7	2,2	8,4
19/5/13	00:00	4,2	7	1,3	8,5	10/6/13	00:00	4,9	7	2,3	8,4
19/5/13	12:00	4,2	7	1,4	8,5	10/6/13	12:00	4,9	7	2,2	8,4
20/5/13	00:00	4,2	7,1	1,4	8,5	11/6/13	00:00	4,9	7	2,3	8,4
20/5/13	12:00	4,2	7	1,4	8,5	11/6/13	12:00	4,9	7	2,3	8,4
21/5/13	00:00	4,3	7	1,5	8,5	12/6/13	00:00	4,9	7	2,3	8,4
21/5/13	12:00	4,3	7,1	1,5	8,5	12/6/13	12:00	4,9	7	2,3	8,4
22/5/13	00:00	4,3	7	1,5	8,4	13/6/13	00:00	4,9	7	2,3	8,4
22/5/13	12:00	4,3	7,1	1,6	8,5	13/6/13	12:00	4,9	7	2,3	8,4
23/5/13	00:00	4,3	7	1,6	8,4	14/6/13	00:00	4,9	7	2,3	8,4
23/5/13	12:00	4,4	7	1,6	8,5	14/6/13	12:00	4,9	7	2,3	8,4
24/5/13	00:00	4,4	7	1,6	8,5	15/6/13	00:00	4,9	7	2,4	8,3
24/5/13	12:00	4,4	7	1,7	8,5	15/6/13	12:00	5	7	2,4	8,4
25/5/13	00:00	4,4	7	1,7	8,4	16/6/13	00:00	5	7	2,4	8,3
25/5/13	12:00	4,4	7	1,7	8,5	16/6/13	12:00	5	7	2,4	8,4
26/5/13	00:00	4,4	7	1,7	8,4	17/6/13	00:00	5	7	2,4	8,4
26/5/13	12:00	4,5	7	1,8	8,5	17/6/13	12:00	5	7	2,4	8,4
27/5/13	00:00	4,5	7	1,8	8,5	18/6/13	00:00	5	7	2,4	8,3
27/5/13	12:00	4,5	7	1,8	8,4	18/6/13	12:00	5	7	2,4	8,4
28/5/13	00:00	4,5	7	1,8	8,4	19/6/13	00:00	5	7	2,4	8,4
28/5/13	12:00	4,5	7	1,8	8,4	19/6/13	12:00	5	7	2,4	8,3
29/5/13	00:00	4,5	7	1,8	8,4	20/6/13	00:00	5,1	7	2,4	8,4
29/5/13	12:00	4,5	7	1,9	8,4	20/6/13	12:00	5,1	7	2,4	8,4
30/5/13	00:00	4,6	7	1,9	8,4	21/6/13	00:00	5	7	2,4	8,4
30/5/13	12:00	4,6	7	2	8,4	21/6/13	12:00	5,1	7	2,5	8,4
31/5/13	00:00	4,6	7	2	8,4	22/6/13	00:00	5,1	7	2,4	8,4
31/5/13	12:00	4,6	7	2	8,4	22/6/13	12:00	5,1	7	2,5	8,3
1/6/13	00:00	4,6	7	2	8,4	23/6/13	00:00	5,1	7	2,5	8,3
1/6/13	12:00	4,6	7	2	8,4	23/6/13	12:00	5,1	7	2,4	8,3
2/6/13	00:00	4,7	7	2	8,4	24/6/13	00:00	5,1	7	2,5	8,3
2/6/13	12:00	4,7	7	2,1	8,4	24/6/13	12:00	5,1	7	2,4	8,3
3/6/13	00:00	4,7	7	2	8,4	25/6/13	00:00	5,1	7	2,5	8,4
3/6/13	12:00	4,7	7	2,1	8,4	25/6/13	12:00	5,1	7	2,5	8,3
4/6/13	00:00	4,7	7	2,1	8,4	26/6/13	00:00	5,1	7	2,5	8,3
4/6/13	12:00	4,7	7	2,1	8,4	26/6/13	12:00	5,1	7	2,4	8,3
5/6/13	00:00	4,7	7	2,1	8,4	27/6/13	00:00	5,1	7	2,5	8,4
5/6/13	12:00	4,8	7	2,1	8,4	27/6/13	12:00	5,1	7	2,5	8,3
6/6/13	00:00	4,8	7	2,1	8,4	28/6/13	00:00	5,1	7	2,5	8,3

28/6/13	12:00	5,1	7	2,5	8,3	20/7/13	12:00	5,6	7,3	3	8,6
29/6/13	00:00	5,1	7	2,5	8,3	21/7/13	00:00	5,7	7,4	3,1	8,6
29/6/13	12:00	5,1	7	2,5	8,3	21/7/13	12:00	5,6	7,4	3,1	8,6
30/6/13	00:00	5,1	7	2,5	8,3	22/7/13	00:00	5,7	7,4	3,1	8,7
30/6/13	12:00	5,1	7	2,5	8,3	22/7/13	12:00	5,7	7,4	3,1	8,6
1/7/13	00:00	5,1	7	2,5	8,3	23/7/13	00:00	5,7	7,4	3,1	8,7
1/7/13	12:00	5,1	7	2,6	8,3	23/7/13	12:00	5,7	7,4	3,1	8,6
2/7/13	00:00	5,1	7	2,6	8,3	24/7/13	00:00	5,7	7,4	3,1	8,6
2/7/13	12:00	5,2	7	2,6	8,3	24/7/13	12:00	5,7	7,4	3,1	8,6
3/7/13	00:00	5,2	7,1	2,7	8,3	25/7/13	00:00	5,7	7,4	3,1	8,6
3/7/13	12:00	5,2	7,1	2,7	8,4	25/7/13	12:00	5,7	7,4	3,1	8,6
4/7/13	00:00	5,4	7,2	2,8	8,5	26/7/13	00:00	5,7	7,4	3,1	8,6
4/7/13	12:00	5,3	7,2	2,8	8,5	26/7/13	12:00	5,7	7,4	3,1	8,6
5/7/13	00:00	5,4	7,2	2,9	8,5	27/7/13	00:00	5,7	7,4	3,1	8,6
5/7/13	12:00	5,4	7,2	2,9	8,5	27/7/13	12:00	5,7	7,4	3,2	8,7
6/7/13	00:00	5,5	7,3	3	8,6	28/7/13	00:00	5,7	7,4	3,1	8,7
6/7/13	12:00	5,5	7,3	3	8,6	28/7/13	12:00	5,7	7,4	3,2	8,7
7/7/13	00:00	5,5	7,3	3	8,6	29/7/13	00:00	5,7	7,5	3,2	8,7
7/7/13	12:00	5,5	7,3	3	8,6	29/7/13	12:00	5,8	7,5	3,2	8,7
8/7/13	00:00	5,5	7,3	3	8,6	30/7/13	00:00	5,8	7,5	3,2	8,7
8/7/13	12:00	5,5	7,3	3	8,6	30/7/13	12:00	5,7	7,4	3,2	8,7
9/7/13	00:00	5,5	7,3	3	8,6	31/7/13	00:00	5,7	7,5	3,2	8,7
9/7/13	12:00	5,5	7,3	3	8,6	31/7/13	12:00	5,8	7,5	3,2	8,7
10/7/13	00:00	5,5	7,3	2,9	8,5	1/8/13	00:00	5,7	7,4	3,2	8,7
10/7/13	12:00	5,5	7,3	2,9	8,6	1/8/13	12:00	5,7	7,4	3,2	8,7
11/7/13	00:00	5,5	7,3	2,9	8,6	2/8/13	00:00	5,7	7,4	3,2	8,7
11/7/13	12:00	5,6	7,3	3	8,6	2/8/13	12:00	5,7	7,4	3,2	8,7
12/7/13	00:00	5,5	7,3	3	8,6	3/8/13	00:00	5,7	7,4	3,2	8,7
12/7/13	12:00	5,6	7,3	3	8,6	3/8/13	12:00	5,7	7,4	3,2	8,7
13/7/13	00:00	5,5	7,3	3	8,6	4/8/13	00:00	5,8	7,4	3,2	8,7
13/7/13	12:00	5,5	7,3	3	8,6	4/8/13	12:00	5,7	7,4	3,2	8,7
14/7/13	00:00	5,6	7,3	3	8,6	5/8/13	00:00	5,8	7,4	3,2	8,7
14/7/13	12:00	5,6	7,3	3	8,6	5/8/13	12:00	5,8	7,4	3,3	8,7
15/7/13	00:00	5,6	7,3	3	8,6	6/8/13	00:00	5,7	7,4	3,3	8,7
15/7/13	12:00	5,6	7,3	3,1	8,6	6/8/13	12:00	5,8	7,4	3,3	8,7
16/7/13	00:00	5,6	7,3	3,1	8,6	7/8/13	00:00	5,8	7,4	3,3	8,7
16/7/13	12:00	5,6	7,3	3,1	8,6	7/8/13	12:00	5,8	7,5	3,3	8,7
17/7/13	00:00	5,6	7,3	3	8,6	8/8/13	00:00	5,8	7,4	3,3	8,7
17/7/13	12:00	5,6	7,3	3	8,6	8/8/13	12:00	5,8	7,4	3,3	8,7
18/7/13	00:00	5,6	7,4	3,1	8,6	9/8/13	00:00	5,8	7,5	3,4	8,7
18/7/13	12:00	5,6	7,3	3,1	8,6	9/8/13	12:00	5,8	7,5	3,4	8,7
19/7/13	00:00	5,6	7,4	3,1	8,6	10/8/13	00:00	5,8	7,5	3,4	8,7
19/7/13	12:00	5,7	7,4	3,1	8,6	10/8/13	12:00	5,8	7,5	3,4	8,7
20/7/13	00:00	5,6	7,3	3,1	8,6	11/8/13	00:00	5,8	7,5	3,4	8,7

11/8/13	12:00	5,9	7,5	3,4	8,7	24/8/13	00:00	6,2	7,5	3,9	8,7
12/8/13	00:00	5,9	7,5	3,4	8,7	24/8/13	12:00	6,2	7,5	4	8,7
12/8/13	12:00	5,9	7,5	3,4	8,7	25/8/13	00:00	6,2	7,5	4	8,7
13/8/13	00:00	5,9	7,5	3,4	8,7	25/8/13	12:00	6,3	7,5	4	8,8
13/8/13	12:00	5,9	7,5	3,4	8,7	26/8/13	00:00	6,3	7,5	4	8,8
14/8/13	00:00	5,9	7,5	3,4	8,7	26/8/13	12:00	6,3	7,5	4	8,8
14/8/13	12:00	5,9	7,5	3,4	8,7	27/8/13	00:00	6,3	7,5	4	8,7
15/8/13	00:00	5,9	7,5	3,4	8,7	27/8/13	12:00	6,3	7,5	4	8,7
15/8/13	12:00	5,9	7,5	3,4	8,7	28/8/13	00:00	6,3	7,5	4	8,7
16/8/13	00:00	5,9	7,5	3,4	8,7	28/8/13	12:00	6,3	7,5	4	8,8
16/8/13	12:00	5,9	7,5	3,5	8,7	29/8/13	00:00	6,3	7,5	4	8,7
17/8/13	00:00	5,9	7,5	3,5	8,7	29/8/13	12:00	6,4	7,5	4	8,7
17/8/13	12:00	5,9	7,5	3,5	8,7	30/8/13	00:00	6,4	7,5	4	8,7
18/8/13	00:00	5,9	7,5	3,5	8,7	30/8/13	12:00	6,4	7,6	4	8,7
18/8/13	12:00	6	7,5	3,6	8,7	31/8/13	00:00	6,3	7,5	4	8,7
19/8/13	00:00	6	7,5	3,6	8,7	31/8/13	12:00	6,4	7,5	4	8,7
19/8/13	12:00	6	7,5	3,7	8,7	1/9/13	00:00	6,4	7,5	4	8,7
20/8/13	00:00	6	7,5	3,7	8,7	1/9/13	12:00	6,4	7,6	4	8,8
20/8/13	12:00	6	7,5	3,8	8,7	2/9/13	00:00	6,3	7,5	3,9	8,7
21/8/13	00:00	6,1	7,5	3,8	8,7	2/9/13	12:00	6,4	7,6	4	8,7
21/8/13	12:00	6,1	7,5	3,9	8,7	3/9/13	00:00	6,4	7,6	3,9	8,7
22/8/13	00:00	6,1	7,5	3,9	8,7	3/9/13	12:00	6,4	7,6	3,9	8,7
22/8/13	12:00	6,1	7,5	3,9	8,7	4/9/13	00:00	6,4	7,6	3,9	8,8
23/8/13	00:00	6,2	7,5	4	8,7						
23/8/13	12:00	6,2	7,5	4	8,7						

Appendice C

Nell'appendice C, relativamente alla sola terza prova, si inseriscono le temperature rilevate dell'aria in cella e delle mele.

TIME	DATE	T mele	T cella
		°C	°C
00:00	13/2/13		0,9
06:00	13/2/13		0,9
12:00	13/2/13		2,7
18:00	13/2/13		3,3
00:00	14/2/13		3,3
06:00	14/2/13		3,6
12:00	14/2/13		3,6
18:00	14/2/13		3,9
00:00	15/2/13		4
06:00	15/2/13		4
12:00	15/2/13		4,1
18:00	15/2/13		4,2
00:00	16/2/13		4,3
06:00	16/2/13		4,4
12:00	16/2/13		4,4
18:00	16/2/13		4,5
00:00	17/2/13		4,5
06:00	17/2/13		4,6
12:00	17/2/13		4,6
18:00	17/2/13		4,7
00:00	18/2/13		4,7
06:00	18/2/13		4,8
12:00	18/2/13		1,1
18:00	18/2/13		1
00:00	19/2/13		0,9
06:00	19/2/13		2
12:00	19/2/13		0,8
18:00	19/2/13		1
00:00	20/2/13		1,1
06:00	20/2/13		0,8
12:00	20/2/13		0,9
18:00	20/2/13		-1,9
00:00	21/2/13		-2,6
06:00	21/2/13		-3,1
12:00	21/2/13		-2,9
18:00	21/2/13		-3,3
00:00	22/2/13		-1,5
06:00	22/2/13		-3,8
12:00	22/2/13		0,8
18:00	22/2/13		-3,6
00:00	23/2/13		-3,8
06:00	23/2/13		-3,5
12:00	23/2/13		-4,4
18:00	23/2/13		-2,8
00:00	24/2/13		-4,4
06:00	24/2/13		-4
12:00	24/2/13		-4,3
18:00	24/2/13		-3,9
00:00	25/2/13		-0,9
06:00	25/2/13		-4,1
12:00	25/2/13		-4,5
18:00	25/2/13		-4,2
00:00	26/2/13		-4,1
06:00	26/2/13		-4,2
12:00	26/2/13		-4
18:00	26/2/13		-4,3
00:00	27/2/13		-4,1
06:00	27/2/13		-3,2
12:00	27/2/13		-4,1
18:00	27/2/13		-4,6
00:00	28/2/13		-4,2
06:00	28/2/13		-4,5
12:00	28/2/13		-4,8
18:00	28/2/13		-4,4
00:00	1/3/13		-4,6
06:00	1/3/13		-4,3
12:00	1/3/13		-4,6
18:00	1/3/13		-4,8
00:00	2/3/13		-4,6
06:00	2/3/13		-4,9
12:00	2/3/13		-4,9
18:00	2/3/13		-5
00:00	3/3/13		-4,9
06:00	3/3/13		-5
12:00	3/3/13		-4,8
18:00	3/3/13		-4,5
00:00	4/3/13		-4,6

06:00	4/3/13	-5	06:00	15/3/13	-5
12:00	4/3/13	-4,8	12:00	15/3/13	-4,9
18:00	4/3/13	-5,1	18:00	15/3/13	-4,5
00:00	5/3/13	-4,6	00:00	16/3/13	-4,9
06:00	5/3/13	-5,1	06:00	16/3/13	-4,4
12:00	5/3/13	-4,5	12:00	16/3/13	-4,8
18:00	5/3/13	-5,1	18:00	16/3/13	-4,3
00:00	6/3/13	-5	00:00	17/3/13	-4,9
06:00	6/3/13	-4,7	06:00	17/3/13	-4,5
12:00	6/3/13	-4,7	12:00	17/3/13	-5
18:00	6/3/13	-4,7	18:00	17/3/13	-4,6
00:00	7/3/13	-1,3	00:00	18/3/13	-5,1
06:00	7/3/13	-0,7	06:00	18/3/13	-4,9
12:00	7/3/13	-0,2	12:00	18/3/13	-4,5
18:00	7/3/13	0,1	18:00	18/3/13	-4,4
00:00	8/3/13	0,5	00:00	19/3/13	-4,8
06:00	8/3/13	0,7	06:00	19/3/13	-4,9
12:00	8/3/13	-4	12:00	19/3/13	-4,8
18:00	8/3/13	-4,1	18:00	19/3/13	-4,5
00:00	9/3/13	-4,4	00:00	20/3/13	-5
06:00	9/3/13	-4,5	06:00	20/3/13	-4,9
12:00	9/3/13	-4,6	12:00	20/3/13	-4,9
18:00	9/3/13	-4,2	18:00	20/3/13	-4,6
00:00	10/3/13	-4,8	00:00	21/3/13	-4,5
06:00	10/3/13	-4,8	06:00	21/3/13	-4,6
12:00	10/3/13	-4,6	12:00	21/3/13	-4,8
18:00	10/3/13	-4,7	18:00	21/3/13	-5
00:00	11/3/13	-4,7	00:00	22/3/13	-5
06:00	11/3/13	-4,8	06:00	22/3/13	-5
12:00	11/3/13	-5	12:00	22/3/13	-5,1
18:00	11/3/13	-4,6	18:00	22/3/13	-1,5
00:00	12/3/13	-4,3	00:00	23/3/13	-0,9
06:00	12/3/13	-4,7	06:00	23/3/13	-0,5
12:00	12/3/13	-5	12:00	23/3/13	-0,2
18:00	12/3/13	-4,9	18:00	23/3/13	0
00:00	13/3/13	-4,5	00:00	24/3/13	0,3
06:00	13/3/13	-4,7	06:00	24/3/13	0,5
12:00	13/3/13	-5	12:00	24/3/13	0,7
18:00	13/3/13	-4,6	18:00	24/3/13	0,9
00:00	14/3/13	-5	00:00	25/3/13	1
06:00	14/3/13	-4,8	06:00	25/3/13	1,1
12:00	14/3/13	-4,8	12:00	25/3/13	-3
18:00	14/3/13	-4,2	18:00	25/3/13	-4,3
00:00	15/3/13	-4,7	00:00	26/3/13	-4,5

06:00	26/3/13	-4,6	06:00	6/4/13	-5,4
12:00	26/3/13	-1,2	12:00	6/4/13	-5,4
18:00	26/3/13	-0,2	18:00	6/4/13	-5,8
00:00	27/3/13	0,2	00:00	7/4/13	-5,9
06:00	27/3/13	0,6	06:00	7/4/13	-5,6
12:00	27/3/13	-3,7	12:00	7/4/13	-5,6
18:00	27/3/13	-4,3	18:00	7/4/13	-5,7
00:00	28/3/13	-4,4	00:00	8/4/13	-5,7
06:00	28/3/13	-4,2	06:00	8/4/13	-6
12:00	28/3/13	0	12:00	8/4/13	-2,4
18:00	28/3/13	0	18:00	8/4/13	-1,7
00:00	29/3/13	0	00:00	9/4/13	-1,2
06:00	29/3/13	0	06:00	9/4/13	-0,9
12:00	29/3/13	0	12:00	9/4/13	-4,1
18:00	29/3/13	-3,6	18:00	9/4/13	-5,2
00:00	30/3/13	-4,6	00:00	10/4/13	-5,3
06:00	30/3/13	-4,7	06:00	10/4/13	-4,9
12:00	30/3/13	-5,2	12:00	10/4/13	-5,3
18:00	30/3/13	-5,3	18:00	10/4/13	-5,5
00:00	31/3/13	-5,4	00:00	11/4/13	-5,2
06:00	31/3/13	-4,9	06:00	11/4/13	-5,4
12:00	31/3/13	-5,5	12:00	11/4/13	-2,8
18:00	31/3/13	-5,4	18:00	11/4/13	-4,9
00:00	1/4/13	-5,3	00:00	12/4/13	-5,5
06:00	1/4/13	-5,2	06:00	12/4/13	-5,2
12:00	1/4/13	-5,5	12:00	12/4/13	-5,3
18:00	1/4/13	-5,6	18:00	12/4/13	-5,2
00:00	2/4/13	-5,7	00:00	13/4/13	-5,6
06:00	2/4/13	-5,6	06:00	13/4/13	-5,9
12:00	2/4/13	-5,6	12:00	13/4/13	-5,4
18:00	2/4/13	-5,8	18:00	13/4/13	-5,9
00:00	3/4/13	-5,3	00:00	14/4/13	-5,5
06:00	3/4/13	-5,4	06:00	14/4/13	-5,9
12:00	3/4/13	-5,8	12:00	14/4/13	-5,7
18:00	3/4/13	-5,6	18:00	14/4/13	-5,4
00:00	4/4/13	-5,6	00:00	15/4/13	-5,9
06:00	4/4/13	-5,7	06:00	15/4/13	-5,7
12:00	4/4/13	-5,2	12:00	15/4/13	-5,5
18:00	4/4/13	-5,7	18:00	15/4/13	-5,3
00:00	5/4/13	-5,6	00:00	16/4/13	-5,8
06:00	5/4/13	-5,6	06:00	16/4/13	-6
12:00	5/4/13	-5,7	12:00	16/4/13	-6
18:00	5/4/13	-5,8	18:00	16/4/13	-5,9
00:00	6/4/13	-5,9	00:00	17/4/13	-5,9

06:00	17/4/13	-5,8	06:00	28/4/13	-3,9
12:00	17/4/13	-2,6	12:00	28/4/13	-3,9
18:00	17/4/13	0	18:00	28/4/13	-3,8
00:00	18/4/13	0	00:00	29/4/13	-3,9
06:00	18/4/13	0	06:00	29/4/13	-3,9
12:00	18/4/13	0,4	12:00	29/4/13	-3,6
18:00	18/4/13	-2,1	18:00	29/4/13	-3,9
00:00	19/4/13	-3,3	00:00	30/4/13	-3,8
06:00	19/4/13	-3,5	06:00	30/4/13	-3,8
12:00	19/4/13	-3,6	12:00	30/4/13	-3,9
18:00	19/4/13	-3,7	18:00	30/4/13	-3,8
00:00	20/4/13	-3,7	00:00	1/5/13	-3,9
06:00	20/4/13	0	06:00	1/5/13	-3,9
12:00	20/4/13	-2,9	12:00	1/5/13	-3,9
18:00	20/4/13	-3,4	18:00	1/5/13	-3,8
00:00	21/4/13	-3,5	00:00	2/5/13	-3,9
06:00	21/4/13	-3,7	06:00	2/5/13	-3,9
12:00	21/4/13	-3,7	12:00	2/5/13	-3,8
18:00	21/4/13	-3,7	18:00	2/5/13	-3,9
00:00	22/4/13	-3,8	00:00	3/5/13	-3,9
06:00	22/4/13	-3,8	06:00	3/5/13	-3,9
12:00	22/4/13	-3,5	12:00	3/5/13	-1,7
18:00	22/4/13	-3,7	18:00	3/5/13	-1
00:00	23/4/13	-3,8	00:00	4/5/13	-0,5
06:00	23/4/13	-3,8	06:00	4/5/13	0,7
12:00	23/4/13	-3,9	12:00	4/5/13	1,4
18:00	23/4/13	-3,9	18:00	4/5/13	1,8
00:00	24/4/13	-3,8	00:00	5/5/13	2,1
06:00	24/4/13	-3,8	06:00	5/5/13	2,5
12:00	24/4/13	-3,5	12:00	5/5/13	2,7
18:00	24/4/13	-3,8	18:00	5/5/13	3
00:00	25/4/13	-3,8	00:00	6/5/13	3,3
06:00	25/4/13	-3,9	06:00	6/5/13	3,5
12:00	25/4/13	-3,8	12:00	6/5/13	3
18:00	25/4/13	-3,9	18:00	6/5/13	-1,4
00:00	26/4/13	-3,8	00:00	7/5/13	-2,1
06:00	26/4/13	-3,9	06:00	7/5/13	-2,4
12:00	26/4/13	-3,7	12:00	7/5/13	-1,9
18:00	26/4/13	-3,9	18:00	7/5/13	-2,8
00:00	27/4/13	-3,8	00:00	8/5/13	-2,9
06:00	27/4/13	-3,9	06:00	8/5/13	-2,9
12:00	27/4/13	-3,9	12:00	8/5/13	-2,8
18:00	27/4/13	-4	18:00	8/5/13	-2,6
00:00	28/4/13	-3,9	00:00	9/5/13	-3,1

06:00	9/5/13		-3,1	06:00	20/5/13	0,4	0,9
12:00	9/5/13		-2,8	12:00	20/5/13	0,5	1,1
18:00	9/5/13		-2,7	18:00	20/5/13	0,5	1
00:00	10/5/13		-2,8	00:00	21/5/13	0,5	1,1
06:00	10/5/13		-3	06:00	21/5/13	0,5	1,1
12:00	10/5/13		-1,2	12:00	21/5/13	0,5	1
18:00	10/5/13		-1,4	18:00	21/5/13	0,6	1,1
00:00	11/5/13		-1,1	00:00	22/5/13	0,6	1
06:00	11/5/13		-1,2	06:00	22/5/13	0,6	0,9
12:00	11/5/13		-1,6	12:00	22/5/13	0,6	0,9
18:00	11/5/13		-1,2	18:00	22/5/13	0,6	1,1
00:00	12/5/13		-1,3	00:00	23/5/13	0,6	0,9
06:00	12/5/13		-1,3	06:00	23/5/13	0,6	1
12:00	12/5/13		-1,4	12:00	23/5/13	0,6	1,1
18:00	12/5/13		-1,3	18:00	23/5/13	0,7	1,1
00:00	13/5/13		0,4	00:00	24/5/13	0,6	1
06:00	13/5/13		-0,1	06:00	24/5/13	0,6	1,2
12:00	13/5/13	3,4	1,1	12:00	24/5/13	0,6	0,9
18:00	13/5/13	2,4	2,1	18:00	24/5/13	0,6	1,2
00:00	14/5/13	1,4	1,1	00:00	25/5/13	0,7	1,2
06:00	14/5/13	1,3	0,8	06:00	25/5/13	0,7	1,2
12:00	14/5/13	2,4	2,5	12:00	25/5/13	0,6	1
18:00	14/5/13	1,8	1,9	18:00	25/5/13	0,7	0,9
00:00	15/5/13	1,5	1,4	00:00	26/5/13	0,6	0,9
06:00	15/5/13	1,2	1,2	06:00	26/5/13	0,6	1
12:00	15/5/13	1	1,1	12:00	26/5/13	0,6	0,9
18:00	15/5/13	0,9	0,9	18:00	26/5/13	0,6	0,9
00:00	16/5/13	0,7	1	00:00	27/5/13	0,6	1,2
06:00	16/5/13	0,6	0,9	06:00	27/5/13	0,6	1,2
12:00	16/5/13	0,5	1,1	12:00	27/5/13	0,6	1,6
18:00	16/5/13	0,4	1	18:00	27/5/13	0,7	1,1
00:00	17/5/13	0,4	1	00:00	28/5/13	0,8	1,4
06:00	17/5/13	0,4	0,9	06:00	28/5/13	0,7	1,2
12:00	17/5/13	0,5	0,9	12:00	28/5/13	0,8	1,4
18:00	17/5/13	0,5	0,9	18:00	28/5/13	0,8	1,2
00:00	18/5/13	0,4	1	00:00	29/5/13	0,8	1,4
06:00	18/5/13	0,4	0,9	06:00	29/5/13	0,8	1,5
12:00	18/5/13	0,5	2,1	12:00	29/5/13	0,8	1,5
18:00	18/5/13	0,5	2,4	18:00	29/5/13	0,8	1,5
00:00	19/5/13	0,6	1,6	00:00	30/5/13	0,8	1,3
06:00	19/5/13	0,5	1,2	06:00	30/5/13	0,8	1,4
12:00	19/5/13	0,5	1,1	12:00	30/5/13	0,8	1,3
18:00	19/5/13	0,5	0,9	18:00	30/5/13	0,9	1,2
00:00	20/5/13	0,4	1,1	00:00	31/5/13	0,8	1,2

06:00	31/5/13	0,9	1,2	06:00	11/6/13	0	0
12:00	31/5/13	0,8	1,3	12:00	11/6/13	0,7	1,3
18:00	31/5/13	0,9	1,3	18:00	11/6/13	0,7	1
00:00	1/6/13	0,8	1,5	00:00	12/6/13	0,7	1
06:00	1/6/13	0,8	1,3	06:00	12/6/13	0,7	1
12:00	1/6/13	0,9	1,3	12:00	12/6/13	0,7	1,1
18:00	1/6/13	0,8	1,3	18:00	12/6/13	0,7	1,4
00:00	2/6/13	0,9	1,2	00:00	13/6/13	0,7	1,7
06:00	2/6/13	0,8	1,5	06:00	13/6/13	0,7	1
12:00	2/6/13	0,9	1,5	12:00	13/6/13	0,7	1,2
18:00	2/6/13	0,8	1,3	18:00	13/6/13	0,7	1,4
00:00	3/6/13	0,9	1,5	00:00	14/6/13	0,7	1,3
06:00	3/6/13	0,9	1,4	06:00	14/6/13	0,7	1,4
12:00	3/6/13	0,8	1,3	12:00	14/6/13	0,7	1,2
18:00	3/6/13	0,9	1,2	18:00	14/6/13	0,8	1,1
00:00	4/6/13	0,8	1,3	00:00	15/6/13	0,7	1,1
06:00	4/6/13	0	0	06:00	15/6/13	0,8	1,1
12:00	4/6/13	0,9	1,4	12:00	15/6/13	0,8	1,5
18:00	4/6/13	0,9	1,2	18:00	15/6/13	0,7	1,2
00:00	5/6/13	0,9	1,4	00:00	16/6/13	0,8	1,2
06:00	5/6/13	0,9	1,4	06:00	16/6/13	0,7	1,2
12:00	5/6/13	0,9	1,5	12:00	16/6/13	0,8	1,5
18:00	5/6/13	0,8	1,1	18:00	16/6/13	0,7	1,1
00:00	6/6/13	0,8	1,3	00:00	17/6/13	0,8	1,5
06:00	6/6/13	0,7	1,5	06:00	17/6/13	0,8	1,5
12:00	6/6/13	0,7	1,1	12:00	17/6/13	0,8	1
18:00	6/6/13	0,7	1	18:00	17/6/13	0,9	1,3
00:00	7/6/13	0,7	1,6	00:00	18/6/13	0,8	1,4
06:00	7/6/13	0,6	1,6	06:00	18/6/13	0,7	1,2
12:00	7/6/13	0,7	1,1	12:00	18/6/13	0,7	1,4
18:00	7/6/13	0,7	1,1	18:00	18/6/13	0,7	1,3
00:00	8/6/13	0,7	1,2	00:00	19/6/13	0,6	1,4
06:00	8/6/13	0,7	1,7	06:00	19/6/13	0,7	1,4
12:00	8/6/13	0,6	1,2	12:00	19/6/13	0,7	1,2
18:00	8/6/13	0,7	1,5	18:00	19/6/13	0,6	1,1
00:00	9/6/13	0,7	1,3	00:00	20/6/13	0,6	1,3
06:00	9/6/13	0,7	1,4	06:00	20/6/13	0,6	1,3
12:00	9/6/13	0,7	1,3	12:00	20/6/13	0,6	1,1
18:00	9/6/13	0,8	1,8	18:00	20/6/13	0,6	1
00:00	10/6/13	0,8	2,2	00:00	21/6/13	0,5	1
06:00	10/6/13	0,8	2,4	06:00	21/6/13	0,5	1
12:00	10/6/13	0,9	2,4	12:00	21/6/13	0,6	1,1
18:00	10/6/13	0,9	1,3	18:00	21/6/13	0,5	1,3
00:00	11/6/13	0,8	1,1	00:00	22/6/13	0,5	1,1

06:00	22/6/13	0,6	1	06:00	3/7/13	0,9	1,3
12:00	22/6/13	0,5	1,4	12:00	3/7/13	0,9	1,4
18:00	22/6/13	0,5	1,1	18:00	3/7/13	0,9	1,3
00:00	23/6/13	0,5	1,1	00:00	4/7/13	0,9	1,5
06:00	23/6/13	0,5	1,4	06:00	4/7/13	0,9	1,3
12:00	23/6/13	0,6	1	12:00	4/7/13	0,9	1,9
18:00	23/6/13	0,6	1,4	18:00	4/7/13	0,8	1,4
00:00	24/6/13	0,6	1,4	00:00	5/7/13	0,9	1,4
06:00	24/6/13	0,6	1,3	06:00	5/7/13	0,8	1,6
12:00	24/6/13	0,6	1,8	12:00	5/7/13	0,8	1,4
18:00	24/6/13	0,6	1,6	18:00	5/7/13	0,9	1,9
00:00	25/6/13	0,8	1,6	00:00	6/7/13	0,8	1,9
06:00	25/6/13	0,7	1,7	06:00	6/7/13	0,8	1,7
12:00	25/6/13	0,7	1,3	12:00	6/7/13	0,9	1,5
18:00	25/6/13	0,8	1,9	18:00	6/7/13	0,9	1,4
00:00	26/6/13	0,8	1,9	00:00	7/7/13	0,8	1,4
06:00	26/6/13	0,8	1,7	06:00	7/7/13	0,9	1,7
12:00	26/6/13	0,8	1,6	12:00	7/7/13	0,9	1,6
18:00	26/6/13	0,7	1,8	18:00	7/7/13	0,8	1,6
00:00	27/6/13	0,7	1,8	00:00	8/7/13	0,9	1,3
06:00	27/6/13	0,8	1,6	06:00	8/7/13	0,9	1,3
12:00	27/6/13	0,8	1,6	12:00	8/7/13	0,8	1,3
18:00	27/6/13	0,8	1,9	18:00	8/7/13	0,8	1,6
00:00	28/6/13	0,9	1,7	00:00	9/7/13	0,8	1,9
06:00	28/6/13	0,8	1,8	06:00	9/7/13	0,9	2,1
12:00	28/6/13	0,8	1,7	12:00	9/7/13	0,9	1,3
18:00	28/6/13	0,9	1,9	18:00	9/7/13	0,8	1,4
00:00	29/6/13	0,9	1,5	00:00	10/7/13	0,8	1,6
06:00	29/6/13	0,9	2,3	06:00	10/7/13	0,8	1,9
12:00	29/6/13	0,9	2	12:00	10/7/13	0,8	1,9
18:00	29/6/13	0,9	2,5	18:00	10/7/13	0,8	1,5
00:00	30/6/13	1	2,7	00:00	11/7/13	0,8	2,3
06:00	30/6/13	1	2,7	06:00	11/7/13	0,9	2,5
12:00	30/6/13	1	3,1	12:00	11/7/13	0,9	1,4
18:00	30/6/13	1,1	3	18:00	11/7/13	0,8	1,9
00:00	1/7/13	1,2	2,2	00:00	12/7/13	0,9	2,4
06:00	1/7/13	1,2	1,7	06:00	12/7/13	0,9	2,6
12:00	1/7/13	1,1	1,5	12:00	12/7/13	0,9	1,8
18:00	1/7/13	1	1,4	18:00	12/7/13	0,8	1,3
00:00	2/7/13	0,9	1,3	00:00	13/7/13	0,8	1,9
06:00	2/7/13	0,9	1,3	06:00	13/7/13	0,7	1,8
12:00	2/7/13	0,9	1,8	12:00	13/7/13	0,8	1,3
18:00	2/7/13	0,9	1,8	18:00	13/7/13	0,8	1,8
00:00	3/7/13	0,9	1,3	00:00	14/7/13	0,8	1,7

06:00	14/7/13	0,8	1,9
12:00	14/7/13	0,8	1,7
18:00	14/7/13	0,8	1,3
00:00	15/7/13	0,9	1,3
06:00	15/7/13	0,9	1,8
12:00	15/7/13	0,8	1,4
18:00	15/7/13	0,8	1,5
00:00	16/7/13	0,9	1,9
06:00	16/7/13	0,8	1,7
12:00	16/7/13	0,8	1,4
18:00	16/7/13	0,9	1,4
00:00	17/7/13	0,8	1,6
06:00	17/7/13	0,8	1,5
12:00	17/7/13	0,8	1,5
18:00	17/7/13	0,9	1,4
00:00	18/7/13	0,8	1,4
06:00	18/7/13	0,9	1,9
12:00	18/7/13	0,8	1,9
18:00	18/7/13	0,8	1,9
00:00	19/7/13	0,9	1,9
06:00	19/7/13	0,8	1,4
12:00	19/7/13	0,8	1,3
18:00	19/7/13	0,8	1,9
00:00	20/7/13	0,9	2,1
06:00	20/7/13	0,9	2,4
12:00	20/7/13	0,9	2,5
18:00	20/7/13	0,9	1,3
00:00	21/7/13	0,8	1,4
06:00	21/7/13	0,9	1,8
12:00	21/7/13	0,9	1,8
18:00	21/7/13	0,8	1,4
00:00	22/7/13	0,8	1,5
06:00	22/7/13	0,9	1,3
12:00	22/7/13	0,8	2
18:00	22/7/13	0,8	1,4
00:00	23/7/13	0,7	1,5
06:00	23/7/13	0	0
12:00	23/7/13	0,7	2,1

18:00	23/7/13	0,8	2,1
00:00	24/7/13	0,8	1,5
06:00	24/7/13	0,9	1,6
12:00	24/7/13	0,9	1,6
18:00	24/7/13	0,9	1,6
00:00	25/7/13	0,8	2,1
06:00	25/7/13	0,9	2,1
12:00	25/7/13	0,9	2,1
18:00	25/7/13	0,9	2,1
00:00	26/7/13	1	1,9
06:00	26/7/13	1	2,1
12:00	26/7/13	1	1,5
18:00	26/7/13	0,9	1,8
00:00	27/7/13	0,9	1,6
06:00	27/7/13	1	1,6
12:00	27/7/13	1	1,5
18:00	27/7/13	1	1,6
00:00	28/7/13	1	1,7
06:00	28/7/13	1	1,5
12:00	28/7/13	1	2
18:00	28/7/13	1	1,6
00:00	29/7/13	1	1,5
06:00	29/7/13	1	2,1
12:00	29/7/13	1	1,5
18:00	29/7/13	1	1,9
00:00	30/7/13	1	1,5
06:00	30/7/13	1	1,7
12:00	30/7/13	1,1	1,5
18:00	30/7/13	1	2
00:00	31/7/13	1	1,6
06:00	31/7/13	1,1	1,5
12:00	31/7/13	1	1,5
18:00	31/7/13	1	1,5
00:00	1/8/13	1,1	2
06:00	1/8/13	1,2	1,5
12:00	1/8/13	1,2	1,9
18:00	1/8/13	3,1	1,8

Appendice D

In questo appendice si riporta la tabella completa per quel che riguarda l'ottimizzazione ottenuta con il primo metodo. Ovvero si mantiene la temperatura in cella al valore di conservazione fino al momento in cui non la si abbassa negli ultimi giorni.

Pre-raffr. gg	T pre-raffr. °C	T sup. °C	T x=1 °C	T x=2 °C	x pre-raffr. m	P tot kW	E periodo kWh	T x=1,25
T obiettivo		-2,18	0,335	2,7				
120	-3	-2,46	-0,75	0,86	-	-	-	-
110	-3	-2,45	-0,72	0,92	-	-	-	-
100	-3	-2,44	-0,68	0,98	-	-	-	-
90	-3	-2,43	-0,64	1,06	-	-	-	-
80	-3	-2,42	-0,58	1,13	-	-	-	-
70	-3	-2,4	-0,52	1,23	-	-	-	-
60	-3	-2,38	-0,44	1,35	-	-	-	-
50	-3	-2,36	-0,35	1,49	-	-	-	-
40	-3	-2,32	-0,2	1,7	-	-	-	-
30	-3	-2,27	-0,01	1,97	-	-	-	-
20	-3	-2,18	0,31	2,36	3	55,78	26772	0,87
15	-3,5	-2,52	0,34	2,55	3	66,07	27386	0,963
15	-4	-2,98	0,04	2,36	3	69,62	28665	0,7
10	-4	-2,83	0,5	2,77	2,5	78,41	26018	1,2
10	-4,5	-3,25	0,32	2,72	2,2	83,93	27343	1,05
10	-5	-3,66	0,13	2,66	2,2	89,78	28748	0,9
10	-6	-4,5	-0,24	2,54	2,2	101,54	31571	0,6
10	-7	-5,31	-0,62	2,43	2,4	102,48	31795	0,32
5	-4,5	-2,89	1,25	3,29	1,7	89,38	21525	1,93
5	-5	-3,27	1,15	2,28	1,7	110,47	24057	1,87
5	-7	-4,83	0,66	3,14	1,7	136,66	27199	1,53
5	-10	-7,15	0,06	3,14	1,5	185,30	33036	1,15
3	-5	-2,95	1,71	3,35	1,2	121,06	20956	2,3
0	-	1,52	2,53	3,48	0	17,21	14400	2,76

Appendice E

Nell'appendice E si riporta la tabella completa riguardante l'ottimizzazione ottenuta con il secondo metodo, secondo il quale, una volta scaricata la cella si spegne l'impianto frigorifero e si lascia che la temperatura superficiale aumenti in modo naturale. Relativa al primo anno completo di utilizzo.

mese svotamento	t imp. Off gg	t imp. On gg	T sup °C	T x=1 °C	T x=2 °C	imp. acceso			imp. spento			
						P tot kW	E cons. MWh	T a x=1,2 °C	x risc. m	E risp. MWh	T sup. °C	
		210 gg (7 mesi)	-2,18	0,335	2,7							
febbraio	164	46	-2,18	0,32	2,54	64,51	71	0,92	8	102	6,33	
marzo	137	43	-2,18	0,33	2,54	67,56	70	0,91	7,5	80	5,98	
aprile	110	40	-2,19	0,305	2,49	66,00	63	0,9	7,25	63	5,6	
maggio	83	37	-2,19	0,28	2,43	65,30	58	0,85	7	46	5,1	
giugno	58	32	-2,19	0,3	2,43	64,46	50	0,87	5	31	4,5	
luglio	32	28	-2,195	0,26	2,35	60,96	41	0,82	3,5	17	3,8	
agosto	9	21	-2,18	0,24	2,29	58,01	29	0,77	1,5	5	2,71	

Appendice F

Si è visto come, la profondità utile “ideale”, sia attraverso le simulazioni, sia in maniera analitica, coincidano e dipendano dal tempo a disposizione piuttosto che dalla differenza di temperatura superficiale. Di seguito si riportano le due tabelle da cui si ricavano i due profili di temperatura raffigurati in Fig. 7.2.1.

Profilo con $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$						
profondità	T sup. in	T iniz.	tempo	arg erf	erf	T (X,t)
m	K	K	s			K
0	280,15	270,15	259200	0	0	280,150
0,1	280,15	270,15	259200	0,089284	0,100479	279,145
0,2	280,15	270,15	259200	0,178568	0,199371	278,156
0,3	280,15	270,15	259200	0,267852	0,295164	277,198
0,4	280,15	270,15	259200	0,357136	0,386488	276,285
0,5	280,15	270,15	259200	0,446420	0,472178	275,428
0,6	280,15	270,15	259200	0,535704	0,551310	274,637
0,7	280,15	270,15	259200	0,624988	0,623232	273,918
0,8	280,15	270,15	259200	0,714272	0,687569	273,274
0,9	280,15	270,15	259200	0,803557	0,744211	272,708
1	280,15	270,15	259200	0,892841	0,793292	272,217
1,1	280,15	270,15	259200	0,982125	0,835148	271,799
1,2	280,15	270,15	259200	1,071409	0,870279	271,447
1,3	280,15	270,15	259200	1,160693	0,899300	271,157
1,4	280,15	270,15	259200	1,249977	0,922895	270,921
1,5	280,15	270,15	259200	1,339261	0,941776	270,732
1,7	280,15	270,15	259200	1,517829	0,968170	270,468
1,9	280,15	270,15	259200	1,696397	0,983564	270,314
2,1	280,15	270,15	259200	1,874965	0,991989	270,230
2,3	280,15	270,15	259200	2,053533	0,996318	270,187
2,5	280,15	270,15	259200	2,232102	0,998405	270,166
2,7	280,15	270,15	259200	2,410670	0,999360	270,156
2,9	280,15	270,15	259200	2,589238	0,999982	270,150
3	280,15	270,15	259200	2,678522	0,999999	270,150

Profilo con $\Delta T = 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$						
profondità	T sup. in	T iniz.	tempo	arg erf	erf	T (X,t)
m	K	K	s			K
0	272,65	270,15	259200	0	0	272,650
0,1	272,65	270,15	259200	0,089284	0,100479	272,399
0,2	272,65	270,15	259200	0,178568	0,199371	272,152
0,3	272,65	270,15	259200	0,267852	0,295164	271,912
0,4	272,65	270,15	259200	0,357136	0,386488	271,684
0,5	272,65	270,15	259200	0,446420	0,472178	271,470
0,6	272,65	270,15	259200	0,535704	0,551310	271,272
0,7	272,65	270,15	259200	0,624988	0,623232	271,092
0,8	272,65	270,15	259200	0,714272	0,687569	270,931
0,9	272,65	270,15	259200	0,803557	0,744211	270,789
1	272,65	270,15	259200	0,892841	0,793292	270,667
1,1	272,65	270,15	259200	0,982125	0,835148	270,562
1,2	272,65	270,15	259200	1,071409	0,870279	270,474
1,3	272,65	270,15	259200	1,160693	0,899300	270,402
1,4	272,65	270,15	259200	1,249977	0,922895	270,343
1,5	272,65	270,15	259200	1,339261	0,941776	270,296
1,7	272,65	270,15	259200	1,517829	0,968170	270,230
1,9	272,65	270,15	259200	1,696397	0,983564	270,191
2,1	272,65	270,15	259200	1,874965	0,991989	270,170
2,3	272,65	270,15	259200	2,053533	0,996318	270,159
2,5	272,65	270,15	259200	2,232102	0,998405	270,154
2,7	272,65	270,15	259200	2,410670	0,999360	270,152
2,9	272,65	270,15	259200	2,589238	0,999982	270,150
3	272,65	270,15	259200	2,678522	0,999999	270,150

Si riporta la tabella del profilo di temperatura a seguito del primo pre-raffreddamento e in successione quella per cui è stato possibile trovare il calore da assorbire necessario allo scopo.

Profilo 1° pre-raffreddamento						
profondità	T sup. in	T iniz.	tempo	arg erf	erf	T (X,t)
m	K	K	s			K
0	270,9	285,15	10368000	0	0	270,900
0,1	270,9	285,15	10368000	0,014117	0,015928	271,127
0,2	270,9	285,15	10368000	0,028234	0,031850	271,354

0,3	270,9	285,15	10368000	0,042351	0,047760	271,581
0,4	270,9	285,15	10368000	0,056468	0,063650	271,807
0,5	270,9	285,15	10368000	0,070585	0,079515	272,033
0,6	270,9	285,15	10368000	0,084702	0,095348	272,259
0,7	270,9	285,15	10368000	0,098819	0,111144	272,484
0,8	270,9	285,15	10368000	0,112936	0,126895	272,708
0,9	270,9	285,15	10368000	0,127053	0,142597	272,932
1	270,9	285,15	10368000	0,141170	0,158242	273,155
1,1	270,9	285,15	10368000	0,155288	0,173825	273,377
1,2	270,9	285,15	10368000	0,169405	0,189340	273,598
1,3	270,9	285,15	10368000	0,183522	0,204781	273,818
1,4	270,9	285,15	10368000	0,197639	0,220142	274,037
1,5	270,9	285,15	10368000	0,211756	0,235417	274,255
1,7	270,9	285,15	10368000	0,239990	0,265689	274,686
1,9	270,9	285,15	10368000	0,268224	0,295554	275,112
2,1	270,9	285,15	10368000	0,296458	0,324970	275,531
2,3	270,9	285,15	10368000	0,324692	0,353898	275,943
2,5	270,9	285,15	10368000	0,352926	0,382300	276,348
2,7	270,9	285,15	10368000	0,381160	0,410142	276,745
2,9	270,9	285,15	10368000	0,409394	0,437392	277,133
3	270,9	285,15	10368000	0,423511	0,450784	277,324
3,5	270,9	285,15	10368000	0,494097	0,515297	278,243
4	270,9	285,15	10368000	0,564682	0,575467	279,100
4,5	270,9	285,15	10368000	0,635267	0,631030	279,892
5	270,9	285,15	10368000	0,705852	0,681831	280,616
5,5	270,9	285,15	10368000	0,776438	0,727817	281,271
6	270,9	285,15	10368000	0,847023	0,769033	281,859
6,5	270,9	285,15	10368000	0,917608	0,805608	282,380
7	270,9	285,15	10368000	0,988193	0,837742	282,838
7,5	270,9	285,15	10368000	1,058779	0,865695	283,236
8	270,9	285,15	10368000	1,129364	0,889771	283,579
8,5	270,9	285,15	10368000	1,199949	0,910301	283,872
9	270,9	285,15	10368000	1,270534	0,927634	284,119
9,5	270,9	285,15	10368000	1,341120	0,942124	284,325
10	270,9	285,15	10368000	1,411705	0,954116	284,496
11	270,9	285,15	10368000	1,552875	0,971915	284,750
12	270,9	285,15	10368000	1,694046	0,983414	284,914
13	270,9	285,15	10368000	1,835216	0,990552	285,015
14	270,9	285,15	10368000	1,976387	0,994811	285,076
15	270,9	285,15	10368000	2,117557	0,997253	285,111
16	270,9	285,15	10368000	2,258728	0,998600	285,130
17	270,9	285,15	10368000	2,399898	0,999321	285,140

18	270,9	285,15	10368000	2,541069	0,999779	285,147
19	270,9	285,15	10368000	2,682239	0,999999	285,150

Energia asportata 1° pre-raffreddamento							
profondità	spessore	T media	ΔT	M un.	L circ.	M tot	E str.
m	m	K	K	kg/m ³	m	kg	kWh
0	0,1	271,01	14,13651	275,5	45,8	302830	963,21
0,1	0,1	271,24	13,90958	275,5	46,6	308119	964,31
0,2	0,1	271,47	13,68278	275,5	47,4	313409	964,87
0,3	0,1	271,69	13,45621	275,5	48,2	318698	964,91
0,4	0,1	271,92	13,22995	275,5	49,0	323988	964,43
0,5	0,1	272,15	13,00410	275,5	49,8	329278	963,44
0,6	0,1	272,37	12,77874	275,5	50,6	334567	961,95
0,7	0,1	272,60	12,55397	275,5	51,4	339857	959,97
0,8	0,1	272,82	12,32987	275,5	52,2	345146	957,51
0,9	0,1	273,04	12,10652	275,5	53,0	350436	954,58
1	0,1	273,27	11,88402	275,5	53,8	355726	951,18
1,1	0,1	273,49	11,66245	275,5	54,6	361015	947,32
1,2	0,1	273,71	11,44189	275,5	55,4	366305	943,02
1,3	0,1	273,93	11,22243	275,5	56,2	371594	938,29
1,4	0,1	274,15	11,00415	275,5	57,0	376884	933,14
1,5	0,2	274,47	10,67962	551	58,2	769637	1849,37
1,7	0,2	274,90	10,25114	551	59,8	790795	1823,97
1,9	0,2	275,32	9,82876	551	61,4	811954	1795,61
2,1	0,2	275,74	9,41306	551	63,0	833112	1764,48
2,3	0,2	276,15	9,00459	551	64,6	854270	1730,78
2,5	0,2	276,55	8,60384	551	66,2	875429	1694,71
2,7	0,2	276,94	8,21132	551	67,8	896587	1656,49
2,9	0,1	277,23	7,92175	275,5	69,0	456228	813,18
3	0,5	277,78	7,36667	1377,5	71,4	2360484	3912,50
3,5	0,5	278,67	6,47831	1377,5	75,4	2492724	3633,44
4	0,5	279,50	5,65371	1377,5	79,4	2624964	3339,18
4,5	0,5	280,25	4,89587	1377,5	83,4	2757204	3037,26
5	0,5	280,94	4,20626	1377,5	87,4	2889444	2734,59
5,5	0,5	281,57	3,58494	1377,5	91,4	3021684	2437,33
6	0,5	282,12	3,03068	1377,5	95,4	3153924	2150,67
6,5	0,5	282,61	2,54113	1377,5	99,4	3286164	1878,88
7	0,5	283,04	2,11301	1377,5	103,4	3418404	1625,20
7,5	0,5	283,41	1,74230	1377,5	107,4	3550644	1391,92

8	0,5	283,73	1,42449	1377,5	111,4	3682884	1180,40
8,5	0,5	284,00	1,15471	1377,5	115,4	3815124	991,21
9	0,5	284,22	0,92798	1377,5	119,4	3947364	824,19
9,5	0,5	284,41	0,73930	1377,5	123,4	4079604	678,61
10	1	284,62	0,52703	2755	129,4	8555928	1014,57
11	1	284,83	0,31828	2755	137,4	9084888	650,60
12	1	284,96	0,18549	2755	145,4	9613848	401,25
13	1	285,05	0,10429	2755	153,4	10142808	238,00
14	1	285,09	0,05654	2755	161,4	10671768	135,77
15	1	285,12	0,02955	2755	169,4	11200728	74,47
16	1	285,14	0,01482	2755	177,4	11729688	39,11
17	1	285,14	0,00642	2755	185,4	12258648	17,70
18	1	285,15	0,00158	2755	193,4	12787608	4,54
E asportata = 59852 kWh							
P media = 20,78 kW							

Vengono inserite infine, le tabelle da cui si verifica la profondità utile e la relativa energia recuperata, supponendo una differenza di temperatura superficiale di 11 °C. Le tabelle arrivano fino ad una profondità di 3 m in quanto dopo le curve si sovrappongono perfettamente.

x utile						
profondità	T sup. in	T iniz.	tempo	arg erf	erf	T (X,t)
m	K	K	s			K
0	279,15	270,900	259200	0	0	279,150
0,1	279,15	271,127	259200	0,089284	0,100479	278,344
0,2	279,15	271,354	259200	0,178568	0,199371	277,596
0,3	279,15	271,581	259200	0,267852	0,295164	276,916
0,4	279,15	271,807	259200	0,357136	0,386488	276,312
0,5	279,15	272,033	259200	0,446420	0,472178	275,790
0,6	279,15	272,259	259200	0,535704	0,551310	275,351
0,7	279,15	272,484	259200	0,624988	0,623232	274,995
0,8	279,15	272,708	259200	0,714272	0,687569	274,721
0,9	279,15	272,932	259200	0,803557	0,744211	274,522
1	279,15	273,155	259200	0,892841	0,793292	274,394
1,1	279,15	273,377	259200	0,982125	0,835148	274,329
1,2	279,15	273,598	259200	1,071409	0,870279	274,318
1,25	279,15	273,598	259200	1,116051	0,885512	274,234
1,3	279,15	273,818	259200	1,160693	0,899300	274,355

1,4	279,15	274,037	259200	1,249977	0,922895	274,431
1,5	279,15	274,255	259200	1,339261	0,941776	274,540
1,7	279,15	274,686	259200	1,517829	0,968170	274,828
1,9	279,15	275,112	259200	1,696397	0,983564	275,178
2,1	279,15	275,531	259200	1,874965	0,991989	275,560
2,3	279,15	275,943	259200	2,053533	0,996318	275,955
2,5	279,15	276,348	259200	2,232102	0,998405	276,352
2,7	279,15	276,745	259200	2,410670	0,999360	276,746
2,9	279,15	277,133	259200	2,589238	0,999982	277,133
3	279,15	277,324	259200	2,678522	0,999999	277,324

Energia roccia recuperata in carico							
profondità	spessore	T media	ΔT	M un.	L circ.	M tot	E str.
m	m	K	K	kg/m ³	m	kg	kWh
0	0,1	278,75	7,84693	275,5	45,8	302830	534,66
0,1	0,1	277,97	6,84278	275,5	46,6	308119	474,39
0,2	0,1	277,26	5,90186	275,5	47,4	313409	416,18
0,3	0,1	276,61	5,03333	275,5	48,2	318698	360,93
0,4	0,1	276,05	4,24377	275,5	49,0	323988	309,36
0,5	0,1	275,57	3,53707	275,5	49,8	329278	262,05
0,6	0,1	275,17	2,91437	275,5	50,6	334567	219,39
0,7	0,1	274,86	2,37433	275,5	51,4	339857	181,56
0,8	0,1	274,62	1,91342	275,5	52,2	345146	148,59
0,9	0,1	274,46	1,52633	275,5	53,0	350436	120,35
1	0,1	274,36	1,20649	275,5	53,8	355726	96,57
1,1	0,1	274,32	0,94649	275,5	54,6	361015	76,88
1,2	0,05	274,28	0,67791	137,75	55,2	182491	27,84
1,25	0,05	274,29	0,69629	137,75	55,6	183814	28,80
1,3	0,1	274,39	0,57503	275,5	56,2	371594	48,08
1,4	0,1	274,49	0,44847	275,5	57,0	376884	38,03
1,5	0,2	274,68	0,42925	551	58,2	769637	74,33
1,7	0,2	275,00	0,31702	551	59,8	790795	56,41
1,9	0,2	275,37	0,25727	551	61,4	811954	47,00
2,1	0,2	275,76	0,22651	551	63,0	833112	42,46
2,3	0,2	276,15	0,21051	551	64,6	854270	40,46
2,5	0,2	276,55	0,20138	551	66,2	875429	39,67
2,7	0,2	276,94	0,19494	551	67,8	896587	39,33

2,9	0,1	277,23	0,09544	275,5	69,0	456228	9,80
E recuperata =		3258	kWh				
P media =		45,25	kW				

Appendice G

In questo appendice si riporta la tabella da cui si trova il calore che si assorbe dalla roccia calda nei primi due anni, la quale permette di arrivare ad avere una significativa differenza di temperatura a circa 30 m di profondità.

Calore della roccia assorbito nei primi 2 anni							
profondità	spessore	T media	ΔT	M un.	L circ.	M tot	E str.
m	m	K	K	kg/m ³	m	kg	kWh
0	0,1	274,04	11,1140	275,5	45,8	302830	757,27
0,1	0,1	274,11	11,0420	275,5	46,6	308119	765,51
0,2	0,1	274,18	10,9700	275,5	47,4	313409	773,57
0,3	0,1	274,25	10,8980	275,5	48,2	318698	781,46
0,4	0,1	274,32	10,8260	275,5	49,0	323988	789,19
0,5	0,1	274,40	10,7541	275,5	49,8	329278	796,74
0,6	0,1	274,47	10,6821	275,5	50,6	334567	804,13
0,7	0,1	274,54	10,6102	275,5	51,4	339857	811,34
0,8	0,1	274,61	10,5384	275,5	52,2	345146	818,39
0,9	0,1	274,68	10,4666	275,5	53,0	350436	825,27
1	0,1	274,76	10,3948	275,5	53,8	355726	831,98
1,1	0,1	274,83	10,3231	275,5	54,6	361015	838,53
1,2	0,1	274,90	10,2514	275,5	55,4	366305	844,91
1,3	0,1	274,97	10,1798	275,5	56,2	371594	851,12
1,4	0,1	275,04	10,1082	275,5	57,0	376884	857,17
1,5	0,2	275,15	10,0011	551	58,2	769637	1731,87
1,7	0,2	275,29	9,8584	551	59,8	790795	1754,09
1,9	0,2	275,43	9,7161	551	61,4	811954	1775,03
2,1	0,2	275,58	9,5741	551	63,0	833112	1794,67
2,3	0,2	275,72	9,4326	551	64,6	854270	1813,04
2,5	0,2	275,86	9,2915	551	66,2	875429	1830,16
2,7	0,2	276,00	9,1509	551	67,8	896587	1846,02
2,9	0,1	276,10	9,0457	275,5	69,0	456228	928,55
3	0,5	276,31	8,8368	1377,5	71,4	2360484	4693,30
3,5	0,5	276,66	8,4910	1377,5	75,4	2492724	4762,281
4	0,5	277,00	8,1494	1377,5	79,4	2624964	4813,174
4,5	0,5	277,34	7,8125	1377,5	83,4	2757204	4846,669
5	0,5	277,67	7,4809	1377,5	87,4	2889444	4863,496
5,5	0,5	278,00	7,1548	1377,5	91,4	3021684	4864,43
6	0,5	278,32	6,8349	1377,5	95,4	3153924	4850,278
6,5	0,5	278,63	6,5215	1377,5	99,4	3286164	4821,879
7	0,5	278,94	6,2149	1377,5	103,4	3418404	4780,097

7,5	0,5	279,23	5,9154	1377,5	107,4	3550644	4725,815
8	0,5	279,53	5,6235	1377,5	111,4	3682884	4659,933
8,5	0,5	279,81	5,3394	1377,5	115,4	3815124	4583,358
9	0,5	280,09	5,0633	1377,5	119,4	3947364	4497,002
9,5	0,5	280,35	4,7954	1377,5	123,4	4079604	4401,776
10	1	280,74	4,4127	2755	129,4	8555928	8494,797
11	1	281,22	3,9283	2755	137,4	9084888	8029,936
12	1	281,67	3,4791	2755	145,4	9613848	7525,668
13	1	282,08	3,0651	2755	153,4	10142808	6994,916
14	1	282,46	2,6860	2755	161,4	10671768	6449,594
15	1	282,81	2,3413	2755	169,4	11200728	5900,444
16	1	283,12	2,0298	2755	177,4	11729688	5356,916
17	1	283,40	1,7501	2755	185,4	12258648	4827,099
18	1	283,65	1,5007	2755	193,4	12787608	4317,704
19	1	283,87	1,2796	2755	201,4	13316568	3834,076
20	5	284,32	0,8278	13775	225,4	74517240	13878,73
25	5	284,83	0,3243	13775	265,4	87741240	6402,983
30	5	285,04	0,1103	13775	305,4	100965240	2504,816
E recuperata =		177357	kWh				
P media =		10,12	kW				
P media specifica =		13,43	W/m2				