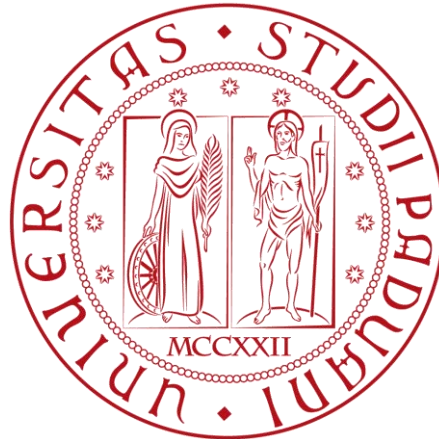


UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica



Tesi di laurea magistrale

Analisi energetica e confronto delle prestazioni della chiesa
Albert Schweitzer considerando diverse configurazioni di
sistemi radianti a bassa temperatura.

Relatore: Prof. Michele De Carli

Laureando: Alexandru Simion

Matricola: 1151468

Anno Accademico 2017/2018

Indice

1	Introduzione.....	1
2	La riqualificazione energetica degli edifici storici	3
2.1	La valutazione dello stato di fatto	4
2.1.1	La ricerca storiografica	4
2.1.2	Indagini diagnostiche in situ.....	4
2.2	Interventi sulle componenti dell'edificio.....	7
2.2.1	Interventi sulle coperture	7
2.2.2	Interventi sulle perimetrazioni verticali	8
2.2.3	Intervento sui solai.....	9
2.2.4	Interventi sugli infissi	9
2.3	Impianti	10
2.4	Gli impianti di riscaldamento nelle chiese storiche.....	11
2.5	Tematiche di studio per l'impianto di riscaldamento	12
2.6	La scelta del sistema	13
2.7	Le tipologie di impianto di riscaldamento	15
2.7.1	Nessun sistema di riscaldamento	15
2.7.2	Impianti di riscaldamento ad aria	15
2.7.3	Impianti radianti ad alta temperatura	17
2.7.4	Impianti di riscaldamento ad acqua calda con radiatori	18
2.7.5	Impianti di riscaldamento ad acqua calda con termoconvettori.....	19
2.7.6	Impianto radiante a bassa temperatura	20
2.7.7	Il riscaldamento a banchi	21
2.8	Il friendly heating.....	22
2.8.1	Risultati dell'analisi del team universitario.....	24
3	L'edificio.....	27
3.1	Descrizione dell'edificio	28

3.2	L’Involucro edilizio	31
3.2.2	Elementi trasparenti	35
3.3	Impianto di climatizzazione invernale.....	36
3.3.1	Calcolo del rendimento del sistema di riscaldamento	36
3.4	Illuminazione artificiale.....	37
4	Trnsys.....	39
4.1	Introduzione al software	39
4.2	Metodo di modellizzazione.....	39
4.3	Suddivisione delle zone.....	40
4.3.1	Zona 1	42
4.3.2	Zona 2.....	43
4.3.3	Zona 3.....	44
4.3.4	Zona 4.....	45
4.3.5	Zona 5.....	45
4.3.6	Zona 6.....	46
4.3.7	Zona 7.....	46
4.3.8	Zona 8.....	47
4.4	Trnbuild e semplificazione delle superfici curve.	47
4.5	Simulation Studio.....	48
5	Lo stato di fatto	49
5.1	Risultati del modello e confronto con i dati reali dell’intero edificio	49
5.2	Analisi del piano superiore	52
6	Interventi di miglioramento dell’involucro.....	55
6.1	Caso di miglioramento dell’involucro 1	55
6.1.1	Simulazione.....	56
6.2	Caso di miglioramento dell’involucro 2	59
6.2.1	Simulazione.....	60
6.3	Caso di miglioramento dell’involucro 3	62
6.3.1	Simulazione.....	63
6.4	Analisi dei costi e dei benefici	64

7	Impianto radiante a pavimento.....	67
7.1	Calcolo dei fattori di vista e della temperatura operante	67
7.2	Caso 1	70
7.2.1	Caso 1.1	72
7.2.2	Caso 1.2	78
7.2.3	Confronto delle soluzioni studiate nel caso di miglioramento dell'involucro 1.....	83
7.3	Caso 2	84
7.3.1	Caso 2.1	84
7.3.2	Caso 2.2	90
7.3.3	Confronto delle soluzioni studiate dopo il caso di intervento 2	95
8	Impianto radiante a soffitto.....	97
8.1	Il pannello radiante	98
8.2	Calcoli in Mirage	99
8.3	Caso 1	102
8.3.1	Modello dell'impianto radiante a soffitto installato su tutta la superficie	103
8.3.2	Impianto radiante a soffitto installato su soffitto parziale	107
8.3.3	Impianto radiante a soffitto installato su parete parziale con controllo climatico	112
8.3.4	Impianto radiante a soffitto installato su parete parziale (50%) con controllo climatico 115	
8.4	Caso 2	118
8.4.1	Modello dell'impianto radiante a soffitto installato su tutta la superficie	118
8.4.2	Impianto radiante a soffitto installato su soffitto parziale	123
8.4.3	Impianto radiante a soffitto installato su parete parziale con controllo climatico	127
8.4.4	Impianto radiante a soffitto installato su parete parziale (50%).....	129
8.5	Riepilogo	132
9	Confronti	135
9.1	La pompa di calore.....	135
9.2	Dimensionamento delle sonde geotermiche	137
9.3	Calcolo delle perdite di carico	138
9.4	Confronti energetici dei diversi sistemi.....	139

9.4.1	Impianti radianti dopo il miglioramento dell'involucro 1	140
9.4.2	Impianti radianti dopo il miglioramento dell'involucro 2	143
9.5	Confronti prestazionali ed economici dei sistemi studiati	146
9.5.1	Confronti prestazionali degli impianti radianti con edificio mediamente isolato.....	146
9.5.2	Confronti prestazionali degli impianti radianti con edificio molto isolato	150
9.5.3	Confronti tra i 2 sistemi studiati	153
9.6	Confronto dei benefici rispetto ad un involucro scadente.....	153
10	Conclusioni.....	157

1 Introduzione

Il seguente lavoro di tesi tratta la riqualificazione energetica di una chiesa berlinese. Gli studi sono stati fatti attraverso simulazioni dinamiche in Trnsys e si è concentrati per lo più sul funzionamento di un ipotetico nuovo impianto di riscaldamento. La peculiarità degli edifici di culto in generale è quella di un funzionamento fortemente intermittente e la richiesta di temperature di esercizio più basse rispetto a quelle degli edifici destinati ad altro uso. Per questo motivo, lo scopo del lavoro è stato quello di eseguire un'analisi di tipo energetico ed economico di impianti radianti a pavimento e a soffitto applicati nella chiesa dopo un intervento di riqualificazione energetica sull'involucro dell'edificio.

La chiesa in sé è una sola parte dell'edificio che la contiene. Infatti, l'edificio ha destinazioni d'uso differenti e lo spazio dedicato alla sola chiesa si limita al piano superiore. L'analisi e gli interventi studiati in questa sede, sono puramente mirati alla chiesa anche se è stato modellato l'intero edificio ma con minor dettaglio per gli spazi di poco interesse.

L'edificio in esame è composto da un tetto inclinato e formato da gusci semicilindrici che sono stati semplificati in più superfici piane con differenti orientazioni. Dopo la modellizzazione dello stato di fatto, si sono studiati i fabbisogni dell'edificio e i suoi punti critici. Successivamente sono stati considerati 2 tipologie di intervento sull'involucro e gli interventi sono stati espressamente richiesti dal committente.

Dopo la previsione del miglioramento dell'involucro, si è ipotizzato e simulato la dinamica della chiesa con gli impianti radianti. Questa tipologia di impianto è stata inserita nei modelli attraverso gli active layers di Trnsys. In particolare, per le analisi si sono considerate diverse configurazioni di impianto: impianto radiante a pavimento, impianto radiante a pavimento isolato, impianto radiante a soffitto totale e parziale (2 casi).

Dopo le simulazioni, che sono state eseguite per 2 anni con cadenza oraria, si sono confrontati i 2 tipi di impianto in termini di comfort interno, fabbisogni energetici, impatto economico e interferenza con l'edificio.

In un'analisi finale si è prevista anche l'installazione di una pompa di calore acqua/acqua e, con delle analisi semplificate si sono confrontate le due soluzioni impiantistiche.

2 La riqualificazione energetica degli edifici storici

Gli edifici sacrali, specialmente se storici, hanno dei fabbisogni energetici e dei costi di mantenimento molto alti dovuti alle loro particolarità strutturali ma anche al loro metodo di utilizzo. In ottica di riqualificazione energetica, per limitare il fabbisogno e per rendere l'edificio più efficiente dal punto di vista energetico ci sono, e si devono svolgere degli studi multidisciplinari richiedenti la collaborazione tra le più diverse figure professionali.

Una chiesa storica solitamente contiene e conserva al suo interno diverse opere d'arte di inestimabile valore. L'edificio stesso spesso è considerato di valore storico e non può essere modificato in alcun modo oppure può esserlo solo in alcune parti. Tutto quell'insieme di opere, strutture architettoniche, affreschi, sculture, ecc. si definisce con: "patrimonio o eredità culturale" e in quanto tale, ne va assicurata la conservazione e la protezione.

Intervenire con una riqualificazione energetica su edifici di questo genere non è mai semplice e non c'è una soluzione generale che valga per tutti gli edifici. A seconda dell'edificio che si studi, del clima, dello stato attuale di conservazione e da molti altri parametri, si può o meno arrivare ad una soluzione rispettando l'edificio ed assicurandone anche il nuovo uso e l'incolumità.

La conservazione del patrimonio artistico e architettonico interno delle chiese storiche può essere compromessa dai sistemi di riscaldamento che alterano la stabilità microclimatica interna. All'interno degli edifici storici infatti, si è creato nel tempo una specie di microclima che ha favorito la conservazione dell'edificio e delle opere d'arte permettendone l'arrivo allo stato attuale. Questo microclima dipende da diversi fattori e si è creato nel tempo a causa dei cicli di temperatura, dell'umidità interna ed esterna e dalla risposta dell'edificio.

Questa tipologia di edifici solitamente non richiede impianti di raffrescamento ma solo quelli di riscaldamento e nella maggior parte dei casi, quando costruiti non ne prevedevano nessuna tipologia. Per questo motivo in questo capitolo verrà trattata solo l'analisi degli interventi sugli elementi architettonici e sugli impianti di riscaldamento.

La riqualificazione energetica delle chiese storiche non è sempre possibile ed è soggetta a molti limiti. Per questa tipologia di intervento inoltre i principi economici hanno un'importanza minore rispetto a quelli della conservazione. I risultati della riqualificazione energetica possono favorire aspetti legati alla conservazione o al comfort con il primo aspetto da preferire.

Ogni progetto sull'esistente deve partire con un particolare studio dello stato di fatto, che nel caso di edifici storici in generale, deve essere molto ben strutturato e ben dettagliato. In edifici di questo genere,

infatti non è sufficiente una semplice analisi sulle strutture, che può essere fatta con diverse metodologie, ma è necessaria anche un'analisi di tipo storiografico.

2.1 La valutazione dello stato di fatto

2.1.1 La ricerca storiografica

Come già accennato, uno studio sullo stato di fatto di un edificio di tipo storico deve partire da una ricerca storiografica. Questa ricerca può aiutare nell'identificazione del microclima, di eventuali modifiche dell'involucro nel tempo, di cambio della destinazioni d'uso dei locali ecc. Avere queste informazioni può aiutare a scegliere meglio una tipologia di intervento piuttosto che un'altra, andando a modificare il meno possibile l'edificio.

Una ricerca di tipo storiografico va fatta con ogni traccia possibile del passato. Questa ricerca deve basarsi su documenti che possono non necessariamente essere scritti ma che devono fornire ogni tipo di testimonianza utile per la conoscenza di eventi di modifica dell'edificio. Prima di ipotizzare un qualsiasi intervento di riqualificazione è bene quindi sapere gli eventi che hanno determinato la costruzione dell'edificio e le sue eventuali modifiche.

La ricerca storiografica deve partire dalle fonti scritte, che possono essere diari, libri, atti privati, contratti, registri contabili, ecc. Successivamente è possibile far uso di ogni altro tipo di testimonianza che può essere di vario tipo e di diverse fonti.

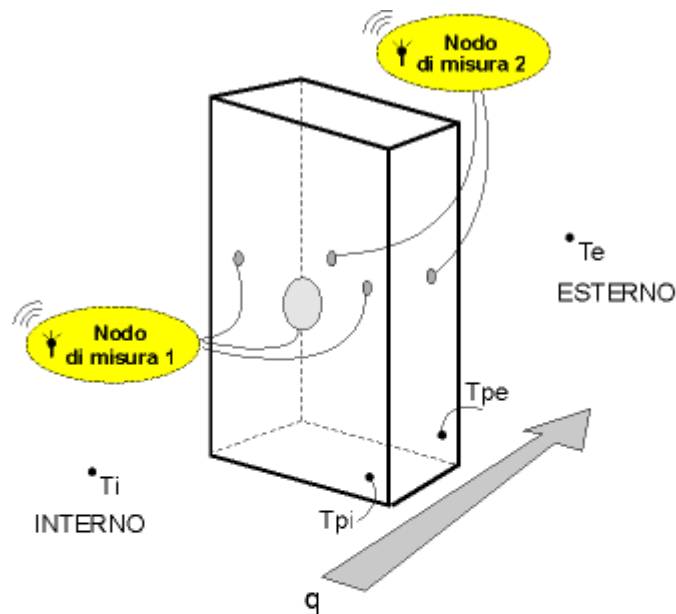
Da tutte queste informazioni quindi sarà possibile ricostruire diversi contesti e sarà possibile trovare un punto d'incontro tra il nuovo e il vecchio nel modo da rendere unica la via della tutela e conservazione dell'esistente con quella della riqualificazione energetica e strutturale.

2.1.2 Indagini diagnostiche in situ

Le indagini che si fanno in situ sono molto importanti e possono essere fatte con diverse metodologie. Quando si ha a che fare con edifici storici, sono da evitare le analisi di tipo distruttivo e quindi si devono usare strumenti particolari. L'obiettivo di queste analisi è quello di capire l'attuale stato dell'edificio determinandone lo stato di conservazione e determinando la stratigrafia degli elementi opachi al fine di identificare la trasmittanza termica delle strutture. Conoscendo la stratigrafia e lo stato dei materiali, sarà poi possibile ipotizzare o escludere diversi tipi di intervento. Per le analisi diagnostiche degli edifici

storici si possono usare per esempio il termoflussimetro oppure strumenti diversi basati sulla termografia.

Il termoflussimetro è uno strumento che consente la misurazione in maniera chiara, semplice, precisa e senza nessun tipo di intervento demolitivo l'esatto stato dell'elemento opaco in termini di trasmittanza. È costituito da una piastra di un materiale di cui si conosce la conducibilità termica e da dei sensori di temperatura posizionati in modo che si possa correlare la densità del flusso termico che passa attraverso la piastra, con il segnale elettrico dei sensori. Con questo strumento quindi è possibile determinare lo stato di isolamento dell'elemento opaco in modo preciso permettendo quindi di ipotizzare diversi miglioramenti dell'elemento.



Dove:

$$q = \frac{\dot{Q}}{A} \left[\frac{W}{m^2} \right] \text{ Flusso termico specifico (flusso riferito all'unità di superficie)}$$

$$\Lambda = \frac{q}{T_{pi} - T_{pe}} \left[\frac{W}{m^2K} \right] \text{ Conducibilità termica}$$

$$U = \frac{q}{T_i - T_e} \left[\frac{W}{m^2K} \right] \text{ Trasmittanza termica}$$

Figura 1 Schema di funzionamento del termoflussimetro.

La termografia invece è una tecnica di analisi non distruttiva che si basa sull'acquisizione di immagini nel campo dell'infrarosso. Nell'edilizia si utilizza la termografia per telerilevamento. Con il termine termografia, si intende la visualizzazione bidimensionale della misura di irraggiamento. Lo strumento

con cui si eseguono le termografie si chiama termocamera, che rileva le radiazioni nel campo dell'infrarosso e compie misure correlate con l'emissione delle radiazioni. Attraverso questo strumento, si può rilevare la temperatura dei corpi misurando l'intensità di radiazione emessa dal corpo in esame poiché tutti i corpi ad una temperatura maggiore dello 0 assoluto emettono radiazioni nel campo dell'infrarosso.

L'utilizzo della termografia non è sufficiente per la determinazione delle patologie edilizie ma se integrata con delle misurazioni attraverso flussimetri o altre prove, anche distruttive, si può ricavare con buona precisione lo stato dell'elemento opaco.



Figura 2 Esempio di un termografia.

Questi metodi di diagnostica permettono di operare all'interno dell'edificio senza dover sospendere le attività normali e permettono di evitare danni alle strutture in esame.

Attraverso la termografia inoltre si possono verificare anche la presenza di problemi legati all'involucro come: ponti termici, dispersioni termiche anomale, umidità della struttura, presenza di canalette, ammorsature tra strutture murarie con tessiture e materiali diversi.

Oltre all'analisi delle strutture opache, nel caso degli edifici storici è utile fare anche misurazioni al fine di identificazione del microclima interno. Le misure dovrebbero essere svolte per più di un anno con

sonde che permettano la misurazione delle temperature e dell'umidità in più punti dell'edificio. Questi dati poi devono essere studiati e analizzati per trovare i punti critici su cui intervenire.

2.2 Interventi sulle componenti dell'edificio

Ogni intervento sulle componenti dell'edificio deve essere fatto e pensato in modo opportuno e adeguato, soprattutto negli edifici di valore storico che hanno peculiarità e valenze artistiche. Per gli edifici storici è difficile trovare un metodo generale di intervento perché generalmente sono sottoposti a diversi vincoli di tipo architettonico che potrebbero escludere modifiche dell'involucro esterno e/o interno. Le componenti in generale che hanno meno problemi legati alla possibilità di intervento sono gli infissi, le coperture e le terrazze ove presenti.

2.2.1 Interventi sulle coperture

Gli interventi proposti devono tener conto della compatibilità in termini di materiali con lo stato esistente e consentire una limitazione delle dispersioni verso l'alto.

In questo caso, non è necessario un intervento di isolamento della struttura portante ma si può, ed è preferibile, studiare interventi che vadano ad agire sull'isolamento dello strato sottotegola se presente, o sotto le lamiere di rame. In questo modo si riescono a limitare le perdite di una delle componenti meno efficienti delle strutture permettendo anche di migliorare la situazione di comfort interno. Questi sistemi solitamente sono molto semplici da gestire e installare specialmente se si hanno delle strutture in legno o in latero-cemento.

Il sistema di isolamento più utilizzato si basa sull'utilizzo di pannelli isolanti autoportanti con una buona resistenza a compressione, che non necessitano ulteriori meccanismi di sostegno e che possono essere direttamente poggiati sulla copertura. Quando si aggiunge lo strato di isolamento, è inoltre necessario proteggere il tutto con una guaina impermeabile all'acqua e traspirante al vapore.

La ventilazione sopra i pannelli può essere garantita da una doppia listellatura con profili in legno o metallici o tramite pannelli sagomati.

Ricapitolando quindi il pacchetto termico di isolamento va posto, generalmente, sotto le tegole o le lamiere di rame e si usano solitamente materiali come la lana minerale o pannelli di polistirene espanso. Dopo l'installazione del pacchetto isolante, il vecchio rivestimento può di nuovo essere applicato e dal

punto di vista visivo l'edificio sarà identico a quello pre-intervento ma dal punto di vista energetico avrà delle prestazioni migliori.

2.2.2 Interventi sulle perimetrazioni verticali

L'isolamento dell'involucro esterno è essenziale al fine di ridurre le perdite per trasmissione dell'edificio. Le pareti perimetrali sono uno degli elementi su cui si hanno però la maggior parte dei vincoli architettonici nei casi di edifici storici. Questo è dovuto al fatto che solitamente sulle pareti si hanno le opere d'arte o la parete stessa è di valenza storica. In generale, se possibile l'isolamento delle pareti esterne deve essere ben progettata e si devono tenere in considerazione diversi aspetti come: compatibilità tra materiali, resistenza termica e meccanica dell'isolante applicato, il corretto posizionamento ecc.

L'intervento di isolamento delle pareti esterne porta a benefici come: benessere termoigrometrico degli ambienti interni, prevenzione della formazione di condensa, notevoli risparmi energetici nel caso in cui non ci fosse già applicato nessun tipo di isolamento.

A parità di trasmittanza, il punto e il metodo di applicazione dello strato isolante influenza in modo significativo il comportamento di tutta la parete. Si possono distinguere 3 casi: isolamento interno, isolamento esterno e isolamento in intercapedine. Nel caso di riqualificazione degli edifici storici ci saranno diversi vincoli e limitazioni, e sarà possibile scegliere uno tra l'intervento interno ed esterno poiché quello in intercapedine è difficilmente attuabile in riqualificazione.

1. Isolamento termico interno. Il materiale isolante è posato all'interno dell'edificio con conseguenti diminuzioni di spazio utile. Questa scelta viene attuata solitamente quando ci sono vincoli sulle facciate esterne. Con l'isolamento interno, in genere, si eliminano i problemi dei ponti termici dei pilastri ma non quelli delle solette dei piani. La problematica principale però è l'alta probabilità di formazione di condensa interstiziale che può essere evitata con particolari accorgimenti in fase progettuale.
2. Isolamento termico in intercapedine. È storicamente, il metodo più diffuso in Italia e prevede l'applicazione dei pannelli isolanti all'interno delle murature a doppio strato. Le metodologie più diffuse sono: l'intercapedine con pannelli a faccia vista e l'intercapedine con laterizi a faccia vista. I materiali più efficaci per questa tipologia di intervento sono gli EPS additivati con grafite. Questo tipo di isolamento non è attuabile in fase di riqualificazione e in genere, quando applicato a nuovo, non elimina i problemi dei ponti termici e condensazione interstiziale.
3. Isolamento termico esterno. Questo tipo di isolamento è meglio conosciuto come intervento a cappotto e viene realizzato applicando lo strato di isolamento esternamente alla parete. Generalmente l'isolante è costituito da pannelli e poi è

rivestito da uno strato di protezione. Questo intervento è relativamente economico e funzionale ma difficilmente viene adottato in caso di riqualificazione di edifici storici. Questa tipologia di intervento elimina totalmente i ponti termici da travi e solai e previene la condensazione interstiziale più dei casi precedenti. In termini di costi benefici questo tipo di intervento è il migliore.

Per gli edifici storici si studierà il 1° o il 3° sistema con l'accorgimento di scegliere quello più indicato in relazione agli obiettivi e alla tipologia di edificio. Nel caso si avesse una facciata esterna di pregio, si opterà per un isolamento interno e il contrario. La fattibilità dipende dalla compatibilità e dalle peculiarità artistiche e strutturali dell'edificio.

2.2.3 Intervento sui solai

L'intervento di miglioramento del solaio, che può essere a terra, di interpiano o del sottotetto, consiste nell'inserimento di un pacchetto termico che può essere inserito sia all'intradosso che all'estradosso del solaio considerato. In linea generale, è sconsigliabile l'intervento dall'intradosso in quanto questo sistema non influisce molto sui ponti termici. L'isolamento ad estradosso invece è più efficiente in quanto permette l'eliminazione dei ponti termici e consente una posa in opera più semplice e agevole. Nel caso di edifici storici in particolare, l'isolamento del solaio non è sempre possibile e dipende dal patrimonio architettonico. Ci sono casi in cui le pavimentazioni sono di particolare pregio e non è possibile prevedere pacchetti isolanti in quanto andrebbe previsto uno smantellamento delle pavimentazioni esistenti. Questo è comunque possibile farlo ma a costi di smontaggio e riposa molto alti in quanto è richiesta una maestranza altamente qualificata poiché sono da evitare le rotture e i danneggiamenti dei materiali.

2.2.4 Interventi sugli infissi

Gli interventi sugli infissi richiedono studi funzionali particolari oltre che aspetti di compatibilità con l'edificio.

L'intervento di sostituzione degli infissi può dover garantire la stessa finitura dello stato di fatto o l'uso degli stessi materiali. Questi interventi non possono andare a modificare l'immagine dell'edificio e devono integrarsi al meglio possibile.

Questa tipologia di intervento è mirata al ridurre la trasmittanza complessiva delle finestre al fine di limitare le perdite per trasmissione e i ponti termici dovuti alle giunzioni tra le finestre e le strutture

murarie. In fase progettuale quindi il sistema muro-finestra deve essere ben studiato e lo si può fare con diversi software come ad esempio Therm o Mirage che, con il metodo degli elementi finiti, possono simulare e permettere il calcolo dei flussi termici in condizioni stazionarie. Questi software permettono inoltre di calcolare le temperature superficiali e in fase successiva si può controllare il problema della condensazione superficiale che è da evitare assolutamente.

Gli interventi sugli infissi sono generalmente molto costosi poiché solitamente prevedono l'installazione di finestre fatte *ad hoc* per poter garantire la compatibilità dell'intervento con l'edificio e la scelta progettuale è limitata al numero dei vetri e agli spessori dei materiali. In rari casi può non essere possibile nemmeno la scelta dell'infisso e quindi in quel caso l'intervento sarà semplicemente mirato alla conservazione dell'esistente.

2.3 Impianti

Con il passare degli anni, il ruolo fondamentale degli edifici ha subito un mutamento radicale. Si è passati dal considerare l'edificio come un luogo di sicurezza da persone e temperie a un luogo strettamente legato al comfort. Questo lo si può dire anche per le chiese e per i luoghi di culto in generale, che sono nati per scopi diversi ma stanno subendo anch'essi questo mutamento. Per il soddisfacimento di questo comfort sono quindi necessari diversi accorgimenti progettuali e diverse tipologie impiantistiche, il che porta a un continuo confronto e collaborazione tra le figure operanti in questi campi come può essere ad esempio quella dell'architetto con quella dell'ingegnere.

Uno dei maggiori problemi degli edifici storici in generale è quello legato ai sistemi di riscaldamento. Questo è dovuto al fatto che per molti edifici storici questa tipologia di impianto non è mai stata prevista oppure non è stata prevista ma integrata molti anni dopo in modo grossolano e senza essersi posti il quesito di quali problematiche possa portare un impianto di questo genere all'edificio. Gli edifici storici, a causa della loro storia e del clima della regione di ubicazione, si creano un loro microclima interno che se alterato, può portare a danni di conservazione dell'edificio stesso e delle opere d'arte al suo interno.

A tale scopo, si è dato vita anche a un progetto Europeo chiamato "Friendly Heating" tra il 2002 e il 2005 che, dopo un'analisi dei principali rischi della conservazione architettonica e dell'eredità culturale dovute agli impianti di riscaldamento ha fatto partire una ricerca per un metodo di riscaldamento alternativo a quelli tradizionali e al quale hanno partecipato molte università europee.

2.4 Gli impianti di riscaldamento nelle chiese storiche

Negli edifici storici, come già menzionato precedentemente, con il passare degli anni si instaura una specie di microclima interno dettato ad esempio dai cicli di temperatura e dell'umidità relativa durante tutta la sua storia. L'edificio e tutta l'eredità culturale al suo interno, si sono adattati a questo microclima che con il tempo li ha modificati permettendone la conservazione e rendendoli unici nel loro genere. Poiché molte opere d'arte sono arrivate ai giorni d'oggi grazie all'esistenza di questo microclima, modificandolo se ne comprometterebbe la conservazione e l'esistenza del patrimonio culturale all'interno di questi spazi e del microclima stesso. D'altro canto, la sempre maggior richiesta di comfort interno, porta inevitabilmente a modificare l'esistente ai nuovi bisogni e ai nuovi usi. L'obiettivo del comfort termico interno spesso e volentieri è in conflitto con quello del mantenimento delle opere d'arte e non c'è, o comunque non è di facile identificazione, una soluzione che possa soddisfare entrambi gli obiettivi. Bisogna quindi cercare una via di mezzo a questi due problemi con coscienza e cognizione di causa.

Il microclima interno creatosi negli anni, può essere facilmente alterato, anche in modo significativo, dopo l'introduzione e/o la modifica dell'impianto di riscaldamento. Nelle chiese, questo problema è ancora più evidente in quanto, solitamente sono caratterizzate da un funzionamento intermittente, e quindi c'è bisogno di riscaldare grandi volumi a temperature considerate il minimo accettabili in tempi brevi e a costi contenuti. Detto ciò, ci possono essere diverse tipologie di impianto e di strategie di gestione ma se queste sono puramente mirate al comfort interno, ci saranno conseguenze, anche di tipo drammatico, sulla conservazione del patrimonio culturale.

Ci sono diversi metodi di intervento sugli impianti di riscaldamento. Innanzitutto, non c'è una soluzione unica e generale per tutti gli edifici storici, ma la scelta ideale dipenderà dalla storia e dallo stato di conservazione della chiesa stessa. Che si intervenga a nuovo, o in fase di riqualificazione, la prima scelta sulla tipologia impiantistica è data dalla strategia di riscaldamento che si vuole adottare:

1. Non si prevede nessun tipo di riscaldamento.
2. Si prevede un sistema di riscaldamento mirato alla conservazione.
3. Si prevede un sistema di riscaldamento mirato al comfort.

È chiaro che diverse strategie, portano a diverse soluzioni e diversi impatti sull'edificio stesso. La prima strategia, mira al mantenimento del microclima interno con la logica che se un'opera d'arte è arrivata ai nostri tempi grazie appunto a quelle condizioni, queste la possono ancora conservare e preservare. La seconda strategia si basa su un riscaldamento blando e controllato in modo da mantenere il più costante possibile l'umidità relativa interna durante tutto il tempo. La terza strategia invece può

essere quella più economica in quanto si può virare su scelte strategiche e impiantistiche consolidate nel tempo ma che possono essere dannose per l'ambiente in cui sono applicati.

Una seconda distinzione degli impianti di riscaldamento può essere sull'invasività dell'impianto stesso per l'ambiente dove va installato. Si può infatti intervenire prevedendo un impianto che riscaldi tutta la chiesa, con soluzioni impiantistiche che modificheranno l'edificio e che saranno molto invasivi. Si può anche intervenire prevedendo un impianto di tipo localizzato che ha lo scopo di riscaldare e assicurare le condizioni di comfort solamente in determinate zone, solitamente in quelle occupate. Questa seconda scelta è da preferire in caso di intervento su ambienti che non sono mai stati riscaldati, in quanto meno invasivo e può compromettere meno il microclima esistente.

2.5 Tematiche di studio per l'impianto di riscaldamento

L'installazione di un nuovo impianto di riscaldamento può avere diverse tipologie di impatto sull'edificio. In fase di progettazione quindi è necessario uno studio multidisciplinare e un continuo confronto con diverse figure professionali. I principali aspetti da tenere in considerazione sono:

1. Reversibilità dell'installazione. Un impianto non è per sempre. La vita utile degli impianti di riscaldamento è di circa 20/30 anni, e una volta dismessi, non devono aver arrecato danni e modifiche all'edificio. Diversi tipi di impianto hanno bisogno di diverse configurazioni che possono essere più o meno invasive sull'architettura stessa. Per esempio, un impianto radiante a pavimento necessita il rifacimento di tutto il pavimento e possono insorgere problemi aggiuntivi laddove ci siano lastre tombali o materiali particolari. Un impianto ad aria invece necessita di grandi condotte e quindi si potrebbe avere la necessità di intaccare le parti murarie.
2. Microclima. Compromettere il microclima interno può arrecare danni interni principalmente sotto 3 punti di vista. Questi problemi sono legati all'integrità fisica delle opere d'arte, alla deposizione degli inquinanti sulle superfici e alla condensazione di vapore sulle superfici fredde. L'integrità fisica del patrimonio culturale conservato negli edifici è strettamente legata alla temperatura e all'umidità relativa perché queste modificano le proprietà dei materiali e possono portare a stress di tipo meccanico o di altro tipo con conseguenti rotture, crepature, fessurazioni, fenomeni di distacco ecc. La variazione dell'impianto di riscaldamento può variare i moti d'aria all'interno e le temperature superficiali delle strutture. Questo può incrementare il problema della deposizione degli inquinanti sulle superfici con conseguenti danni agli affreschi, quadri, sculture ecc. Infine, nei climi freddi i problemi di condensazione del vapore acqueo sulle superfici fredde può arrecare diversi danni come: ossidazione o corrosione dei metalli, biodegradamento delle sostanze organiche, migrazioni saline, ecc.

3. Moti d'aria eccessivi: quando il pavimento è più freddo del soffitto, l'aria stratifica naturalmente a causa della differenza di densità e non ci sono problemi di moti d'aria, almeno alle altezze di interesse. Quando invece si inverte il gradiente di temperatura delle superfici, si instaurano nuovi moti d'aria e in qualche occasione possono essere anche eccessivi. L'eccessivo moto d'aria può portare a diversi problemi tra i quali anche quelli dovuti alla deposizione degli inquinanti sopraccitati. Per il contenimento di questo problema ci sono diverse linee guida e soluzioni impiantistiche.
4. Comfort termico. Il comfort termico è definibile come una particolare condizione di benessere tale che non fa allontanare un individuo dall'ambiente in esame. Questa situazione può essere facilmente compromessa con temperature e livelli di umidità relativa troppo elevati o bassi. Diverse tipologie d'impianto portano a diverse tipologie di comfort e hanno bisogno di diverse strategie per il raggiungimento di questa condizione.
5. Ventilazione. La ventilazione degli ambienti riguarda anche il comfort interno generale, in quanto l'aria interna ha bisogno di un ricambio per poter tenere a livelli contenuti la concentrazione di CO₂, fumi e altri inquinanti. D'altra parte, però una ventilazione non controllata può compromettere il microclima interno e la creazione di moti convettivi sulle superfici delle opere d'arte favorendone la degradazione.
6. Conservazione degli organi. L'organo è uno strumento musicale di grande rilievo nella liturgia della chiesa cattolica. Questo strumento musicale è costruito con materiali come il legno e diversi metalli che possono risentire della temperatura interna e dell'umidità relativa. In generale, i problemi legati al sistema di riscaldamento possono essere: degradazione delle parti in legno, corrosione degli elementi metallici, condensazione, creeping e problemi acustici dovuti al fatto che diverse parti dell'organo lavorano a diverse temperature. Per contenere questi problemi è necessario contenere la variabilità della temperatura e dell'umidità relativa e di assicurare una loro uniformità. Uno degli accorgimenti da seguire per la limitazione di questi problemi, ma anche di quelli generali della chiesa è di mantenere un gradino termico di temperatura massimo di 1 °C/h sia in caso di riscaldamento che in caso di raffreddamento della chiesa dopo le varie attività.

2.6 La scelta del sistema

Come già menzionato precedentemente, non esiste un sistema di riscaldamento preferibile rispetto ad un altro. La scelta finale dell'impianto stesso e della strategia da adottare dipende dall'edificio e dagli obiettivi, e deve avvenire dopo uno studio completo delle tematiche trattate nel sotto capitolo relativo alle tematiche di studio prima dell'installazione dell'impianto.

La scelta di diverse strategie porta a diversi vantaggi e svantaggi, e la scelta finale deve essere fatta in relazione agli obiettivi da raggiungere. Così come può essere conveniente un impianto localizzato per

gli ambienti usati in modo intermittente, può essere conveniente anche un impianto globale e invasivo nel caso l'edificio abbia bisogno, per una ragione o per un'altra, di essere sempre riscaldato.

In generale quindi non c'è una scelta ottimale e senza controindicazioni, ma ci sono diverse ricerche che hanno portato a delle linee guida da adottare in diversi casi. Il principale quesito da porsi, se si pensa a un impianto di riscaldamento mirato alla conservazione del patrimonio culturale è: conviene lasciare l'edificio non riscaldato o integrare un sistema di riscaldamento? Anche in questo caso la risposta è: dipende. La soluzione e la risposta dipendono dal clima esterno, dallo stato di conservazione attuale dell'edificio e delle opere d'arte. Per esempio, se il valore dell'umidità relativa in media è favorevole alla conservazione del patrimonio culturale, è preferibile non riscaldare. Se il valore dell'umidità relativa è troppo basso, un sistema di riscaldamento può solo peggiorare la situazione. Se invece il valore è troppo alto, si consiglia di adottare un sistema di riscaldamento e di modularne il funzionamento in modo da aiutare la conservazione dello stato di fatto.

Per climi freddi e secchi, un sistema di riscaldamento continuativo non può essere una soluzione valida dal punto di vista della conservazione poiché questo farà abbassare il valore dell'umidità relativa interna. Si può infatti notare che la maggior parte delle opere d'arte meglio conservate, si trovano in edifici posti in questa tipologia di clima. In alcuni casi però hanno avuto un rapido degradamento una volta installato il sistema di riscaldamento. In questi casi, se un sistema di riscaldamento è necessario, sono da preferire gli impianti localizzati come possono essere ad esempio gli impianti radianti a banchi.

Per climi umidi e inverni piovosi, il problema maggiore è dato dall'alta umidità e all'instaurarsi di muffe. In questi casi l'umidità è più facilmente controllabile con gli impianti di riscaldamento invece che con umidificatori/deumidificatori. A seconda che si vogliano assicurare i comfort o la conservazione, si adotteranno sistemi diversi in termini di principi di funzionamento e di costi. Difficilmente questi due approcci portano a un'unica scelta d'impianto. Nel caso si avesse l'obiettivo di favorire la conservazione, si consigliano impianti localizzati e dove non possibile, impianti che permettano di modulare costantemente i valori delle temperature e umidità relativa con costi impiantistici ed energetici molto alti. Quando si ha a che fare con edifici storici però la salvaguardia del patrimonio cultura è da porre sopra ogni aspetto di tipo economico. A causa delle diverse problematiche che possano instaurarsi a causa dell'umidità ci sono diverse tipologie di impianto da preferire quando persiste un determinato tipo di problema piuttosto che un altro.

In totale quindi non c'è una scelta ottimale ma tutto dipende da molti fattori che devono essere ben studiati e ben inseriti nel contesto progettuale considerato. Non sono possibili scelte a priori. È essenziale avere le idee chiare sulle principali problematiche che si possono instaurare e che possono essere legate allo stato di fatto o all'impiantistica. Fermo restando che un patrimonio culturale, per legge, non può essere danneggiato/distrutto le scelte progettuali sono lasciate al progettista e la soluzione ottimale è diversa da caso a caso lasciando spazio alla fantasia e all'ingegnerizzazione del problema.

2.7 Le tipologie di impianto di riscaldamento

Dal progetto europeo “Friendly Heating” si è riusciti a stilare una lista di possibili tipologie di impianto e i loro relativi pro e contro. In questa sezione ne sono elencate alcune delle soluzioni possibili e più usate nelle chiese storiche. Tra queste tipologie di impianto c'è anche la non previsione di alcuna specie di riscaldamento in quanto è una strategia che in moltissimi casi favorisce la conservazione del patrimonio culturale ma che anche a degli svantaggi.

2.7.1 Nessun sistema di riscaldamento

Gli ambienti non riscaldati sono la “casa” delle opere che sono giunte ai nostri giorni conservandosi per centinaia di anni. Per un ambiente chiuso e in climi non troppo umidi, una soluzione di questo genere è la migliore.

Poiché le opere si sono adattate al clima interno negli anni, se possibile, non intervenire in alcun modo favorisce la conservazione del patrimonio culturale.

Ci sono però dei casi eccezionali. Se una chiesa è per esempio dentro una caverna o in climi particolarmente umidi, ci sono diverse tipologie di problemi legati generalmente all'umidità.

I punti a favore di questa soluzione sono quelli dovuti alla conservazione delle opere, al basso impatto umano sull'ambiente e la totale assenza di costi di riscaldamento.

I punti di svantaggio invece non sono sempre presenti ma in determinate circostanze possono essere quelli della poca protezione delle opere dall'ambiente esterno, dall'umidità con i suoi molteplici effetti sul patrimonio culturale e il basso comfort.

2.7.2 Impianti di riscaldamento ad aria

Questi sistemi consistono nel riscaldare l'aria che può essere esterna, ricircolata o un mix di queste, dentro un'unità di trattamento dell'aria. Successivamente, con delle condotte si porta l'aria calda negli ambienti da riscaldare e la si inietta. L'iniezione dell'aria calda può avvenire in diversi modi e da diverse parti. Si può per esempio iniettare l'aria con dei diffusori a parete oppure con delle griglie a pavimento. La scelta del sistema di immissione dell'aria nell'ambiente non è di facile interpretazione e ogni soluzione ha i suoi pro e contro.

Generalmente questa tipologia di impianto è usata in modo intermittente, durante le celebrazioni liturgiche o comunque quando lo spazio è occupato da persone. Con questa tipologia di impianto si può anche tenere sempre riscaldato l'ambiente ma viene fatto molto raramente e in generale si preferisce, nei casi in cui si vogliono/devono mantenere certi livelli minimi di temperatura, di operare con una strategia mista. Si riscalda costantemente l'ambiente con una potenza minima, ma la si alza quando c'è bisogno di raggiungere il comfort interno voluto. Questa strategia è più favorevole per garantire una conservazione delle opere d'arte rispetto a una strategia basata sull'intermittenza.

I benefici di questa soluzione impiantistica sono limitati e sono legati alla velocità di riscaldamento e ai bassi costi operativi, infatti basta accendere l'impianto anche mezz'ora prima delle messe.

Le problematiche di questa tipologia di impianto invece sono molteplici. Quelle che si possono riscontrare sono legati a diversi campi tra i quali: basso comfort, instaurazione di moti convettivi, stratificazione, cattiva conservazione delle opere d'arte ecc.

Con questa tipologia di impianto, l'aria tende ad alzarsi verso l'alto a causa della differenza di densità sopra riscaldando la parte alta della chiesa. In questo modo si instaura una stratificazione dell'aria e quindi un gradiente interno in termini di temperatura e umidità. Questo porta a danneggiamenti del soffitto della chiesa e a una bassa efficienza energetica dell'impianto di riscaldamento. Il problema della stratificazione è legato principalmente alla temperatura e velocità dell'aria. All'aumentare della temperatura, questo fenomeno si intensifica mentre all'aumentare della velocità si riesce ad avere un miscelamento migliore dell'aria con conseguenti temperature più uniformi. Fermo restando che la stratificazione è inevitabile, questa può essere limitata ma con conseguenti instaurazioni di problemi di rumore (dei ventilatori), correnti d'aria troppo veloci, temperature dell'aria modeste.

Con una strategia di tipo intermittente, si avranno dei cicli con innalzamenti e abbassamenti molto veloci di temperatura e umidità che compromettono la conservazione delle opere. Per esempio, un ciclo caratterizzato da cambi repentini di umidità porta alla rottura del legno e quindi in questi casi le strutture devono essere ben monitorate in modo da permettere le migliori condizioni possibili per la loro conservazione. In questo caso si possono prevedere dei sistemi di umidificazione/deumidificazione ma per la maggior parte delle volte è molto difficile trovare un equilibrio riguardante i livelli di vapore d'acqua da mantenere nell'aria. Per esempio, umidificando l'aria quando si è in riscaldamento può favorire la conservazione dei dipinti ma aumenta il rischio di condensazione di vapore sulle pareti esterne con relativi danni agli elementi architettonici.

Quando l'aria calda è immessa dal pavimento, attraverso delle griglie, ci può essere il problema dell'innalzamento delle polveri o comunque degli inquinanti in generale che poi circolano nell'ambiente e possono depositarsi sulle superfici interne. Questo può portare a danneggiamenti delle opere ma anche a una scarsa qualità dell'aria interna. Quando l'aria è immessa dalle pareti, questo problema può essere limitato, ma in questo modo si favorisce la stratificazione dell'aria, e ai livelli bassi, dove c'è più bisogno di alta temperatura, spesso l'aria è fredda e stagna.

Dal punto di vista del comfort, con questo sistema si riescono a raggiungere livelli scadenti. Questo a causa della stratificazione. La parte alta del corpo sarà a una temperatura maggiore, mentre piedi e gambe (le parti più sensibili in questi ambienti) staranno a una bassa temperatura con relativo discomfort.

Questi impianti inoltre, hanno bisogno di grandi spazi per le condotte, griglie e diffusori. Questi portano a danni oltre che di tipo visivo anche di tipo strutturale dell'edificio a causa delle modifiche da fare sulle pareti, pavimento, vani.

2.7.3 Impianti radianti ad alta temperatura

Questo sistema di riscaldamento sfrutta lo scambio per radiazione tra due corpi dovuto alla loro temperatura. In questa tipologia di impianti in particolare, c'è un emettitore che viene riscaldato ad alta temperatura (con acqua calda, gas di combustione o energia elettrica) e che scambia poi calore con gli occupanti. Sono dei sistemi ad alta/altissima temperatura (più di 400°C) e quindi gli emettitori sono di solito posti in alto e distanti. Possono essere sospesi dal soffitto oppure attaccati ai muri. Esistono diverse tipologie di emettitori e si differenziano tra loro per tipologia di alimentazione e per le diverse temperature di esercizio. I principi di funzionamento, e molti aspetti funzionali sono però generalmente simili tra loro.

Gli aspetti positivi di questa tipologia d'impianto sono principalmente 3. Come primo aspetto positivo si ha la velocità di riscaldamento. Questa tipologia d'impianto infatti non necessita grandi tempi di accensione per il raggiungimento del comfort desiderato. Questo è dovuto anche al fatto che lo scambio di energia avviene per via della radiazione nel campo dell'infrarosso, senza andare a riscaldare l'aria dell'ambiente. Questa tipologia di impianto inoltre non porta a particolari moti convettivi e infine hanno dei bassi costi operativi. Un altro punto a favore può essere quello della sua semplicità componentistica.

Questa tipologia di impianto però non è la miglior scelta per il riscaldamento di una chiesa storica per diversi motivi. Un sistema di questo genere, che opera a temperature veramente alte, può essere dannoso per la preservazione delle opere. Poiché solitamente posto in alto, l'emettitore irraggia una grande superficie, ma bisogna evitare l'irraggiamento diretto delle opere d'arte poiché queste ne risentono e si possono instaurare anche fenomeni di combustione. Un altro problema dell'irraggiamento è dato anche dal fatto che l'emettitore scambia con diverse superfici flussi diversi. Questo porta a temperature superficiali diverse in posti diversi con relativi problemi di dilatazione dei materiali. Non esistendo una omogeneità termica, si possono creare diversi stress meccanici o si possono instaurare moti convettivi sulle superfici a temperature diverse con relativi problemi di innalzamento di polveri e inquinanti

Dal punto di vista del comfort, si ha un comfort di tipo localizzato e solamente nelle aree in vista diretta con l'emettitore. Ci possono quindi essere problemi di comfort per persone che stanno in

penombra o in genere, per i bambini a causa della loro altezza. Per assicurare un buon livello di comfort, dovrebbero esserci più emettitori e in posizioni ben studiate in modo da distribuire il calore in modo più simmetrico e più omogeneo possibile.

Questi sistemi sono visibili e hanno un alto impatto visivo. Questo può essere considerato un punto negativo in quanto è un componente estraneo per una chiesa storica. Dal punto di vista dei problemi strutturali arrecati da questi sistemi, non se ne segnalano in particolare. Ci sono da installare delle piccole condotte o cavi elettrici ed è possibile farlo solamente in assenza di affreschi o dipinti.

2.7.4 Impianti di riscaldamento ad acqua calda con radiatori

I radiatori sono dei terminali di impianto, alimentati ad acqua calda che scambiano energia termica con l'ambiente in parte per convezione naturale e in parte per irraggiamento. Sono uno dei corpi scaldanti più usati negli impianti ad acqua calda e sono un elemento fondamentale nel processo di cessione di calore all'ambiente. La resa di questa tipologia di impianto, con questa tipologia di terminale, è molto condizionata dal corretto posizionamento, temperatura di alimentazione e proprietà del radiatore stesso.

Negli impianti tradizionali si alimentano i radiatori con acqua calda di 45-80°C attraverso una rete di distribuzione che collega il terminale con il generatore. I radiatori possono essere di diversi materiali, finiture e possono avere anche altre componenti ausiliari come per esempio resistenze elettriche al loro interno.

Questa tipologia di impianto è molto conosciuta e ampiamente usata anche in circostanze diverse da quelle delle chiese. Per questo motivo uno dei benefici principali che si ha è il basso costo di installazione e gestione senza considerare anche il facile controllo. Altri benefici di questi impianti sono l'uso di sistemi di generazione tradizionali e il fatto che una persona non scambia calore solo con l'aria calda ma anche per irraggiamento con il terminale d'impianto con conseguenti maggiori comfort.

Le problematiche di questa tipologia di impianto sono molteplici e per lo più legate alla conservazione delle opere d'arte. Si consideri che il comfort termico può non essere raggiunto se non si prevedono il numero giusto e la locazione giusta dei radiatori, e un tempo sufficiente di preriscaldamento della chiesa prima dell'uso.

Per quanto riguarda la preservazione delle opere d'arte e dell'involucro si possono avere problemi diversi a seconda se si utilizzi una strategia di riscaldamento continuo o intermittente. Durante il funzionamento dell'impianto, spesso il valore dell'umidità relativa (in inverno) può essere troppo basso e portare ai problemi delle opere d'arte. Questo si manifesta molto più gravemente se si opta per un riscaldamento continuo. Nel caso di riscaldamento intermittente il problema non è più solo sulle opere d'arte in sé ma anche sulla struttura dell'edificio stesso a causa dei cicli di ricristallizzazione dei sali

solubili che segue la dinamica dei cicli di riscaldamento. A causa del meccanismo di scambio termico tra il radiatore e l'aria, si instaura un moto d'aria dal basso verso l'alto che può portare ai problemi di sollevamento di polveri e inquinanti con i loro relativi problemi di deposizione sulle opere d'arte. In questo caso, il problema è più grave con un riscaldamento di tipo continuo.

I meccanismi di deterioramento più comuni per questa tipologia di impianto sono quindi legati ai cicli di temperatura e dell'umidità relativa che portano a cicli di ricristallizzazione dei sali, ai problemi di condensazione sulle superfici fredde, alla sospensione di particolato nell'aria che poi si deposita sulle superfici delle opere.

In totale quindi questa tipologia di impianto porta a diverse problematiche legate alla conservazione delle opere ma porta a livelli medi di comfort. Con una corretta progettazione, un sistema di questo genere può essere più che valido specialmente in caso di soffitto isolato. In questo modo si limiterebbe la differenza di temperatura tra l'alto e il basso abbassando quindi i rischi della conservazione delle opere.

2.7.5 Impianti di riscaldamento ad acqua calda con termoconvettori

Questa tipologia d'impianto è basata su un sistema di rete di distribuzione ad acqua calda che viene generata da un generatore e poi mandata al terminale che è un termoconvettore. I termoconvettori sono dei corpi scaldanti che cedono calore soprattutto per convezione, generalmente naturale. Sono realizzati con batterie alettare e vanno installati anche dispositivi di tiraggio naturale per aumentarne la resa. Solitamente sono molto piccoli e poco invasivi esteticamente e può essere installato in diversi modi, come ad esempio a pavimento. Questa tipologia di terminale si alimenta a temperature tra 60°C e 80°C e grazie alla sua bassa inerzia termica, trovano applicazione in ambienti riscaldati in modo intermittente.

Questi sistemi non portano a gravi problemi dal punto di vista dell'impatto visivo/strutturale e sono dei sistemi molto compatti e relativamente economici. Possono portare a buoni livelli di comfort se si adotta un riscaldamento continuo installando i terminali a battiscopa o pavimento. È possibile installarli anche sotto i banchi.

Gli svantaggi di questa tipologia di sistemi sono simili a quelli degli impianti ad acqua calda con radiatori (cambia solo il terminale). Per avere un basso impatto visivo, solitamente i terminali sono installati a pavimento e quindi a causa dei moti convettivi c'è un alto innalzamento di polveri, specialmente in ambienti pubblici perché vengono continuamente importate.

I rischi dovuti ai cicli termici e di condensazione sulle superfici fredde sono relativamente bassi se si adotta una strategia basata su un riscaldamento continuo, mentre aumentano sempre più con l'aumentare dell'intermittenza. Per contro, un riscaldamento continuo porta a problemi di umidità troppo basse e di deposizione di inquinanti sulle opere d'arte.

2.7.6 Impianto radiante a bassa temperatura

Gli impianti radianti a bassa temperatura possono essere di diverso tipo a seconda delle applicazioni. In genere, sono dei sistemi idronici radianti consistenti in serpentine annegate in determinate tipologie di strutture che permettono di riscaldare un ambiente principalmente per scambi radiativi. Poiché sono dei sistemi a grande superficie, possono lavorare a temperature dell'acqua di alimentazione relativamente basse e quindi questi sistemi sono una soluzione molto interessante per il possibile ed eventuale integrazione con sistemi di generazione ad alta efficienza o con fonti rinnovabili.

Gli impianti a bassa temperatura per usi civili si distinguono per impianti a pavimento, a parete e a soffitto. Funzionano per lo stesso principio, ma per fattori pratici sono composti da componenti diversi e in fase di funzionamento hanno comportamenti simili ma non del tutto. Per esempio un impianto radiante a pavimento scambia 50% dell'energia per scambi convettivi e 50% per scambi radiativi. Nel caso dell'impianto a parete, questi valori si dividono in 69% e 31%, e nel caso a soffitto 8% e 92%.

2.7.6.1 Impianto radiante a pavimento

I benefici di questa tipologia di impianto sono molteplici ma che vanno a scontrarsi con il problema dell'impatto strutturale che si ha sulle chiese storiche.

Questi sistemi permettono un'ottima omogeneità di riscaldamento permettendone anche una gestione graduale. Sono da installare, preferibilmente in climi umidi e si consiglia un funzionamento continuo. Può essere utile optare per un riscaldamento a potenza minima in modo continuo, e poi integrare, anche con altri sistemi quando ci sono da raggiungere livelli di comfort maggiori. In totale, si raggiungono ottimi livelli di comfort poiché il pavimento sarà caldo, il soffitto più freddo e i muri perimetrali a una temperatura superficiale intermedia.

Le problematiche sono date principalmente dalla cattiva preservazione delle opere a causa di un funzionamento continuo e quindi un valore basso di umidità relativa interno. Questo problema è risolvibile, anche in modo abbastanza semplice integrando anche un sistema di umidificazione dell'aria. Nel caso di riscaldamento intermittente, la parte bassa dei muri perimetrali può essere soggetta a fenomeni di dissoluzione-ricristallizzazione dei sali a causa dei ripetuti cicli.

Anche in questi sistemi, a causa dei moti convettivi che si instaurano, ci sono problemi di deposizione di polveri e inquinanti sulle superfici delle pareti e delle opere d'arte.

L'impatto strutturale di questi sistemi è veramente alto, in quanto tutto il pavimento dovrebbe essere sostituito o comunque reso adatto a questo sistema.

2.7.6.2 Impianto radiante a parete

Generalmente questi sistemi hanno circa gli stessi benefici degli impianti a pavimento. A causa della loro struttura, solo il 70% del pannello può essere effettivamente considerato attivo e quindi a parità di superficie e condizioni una soluzione di questo genere, permette una resa minore.

Questo tipo di sistema può eliminare ogni tipo di problema di condensazione sui muri freddi e limita, rispetto al caso a pavimento, i moti convettivi con conseguente mitigazione del problema legato alle polveri e sostanze inquinanti sospese nell'aria.

Generalmente costano più dei sistemi a pavimento e solitamente si alimentano a temperature maggiori.

Dal punto di vista degli impatti strutturali, questa tipologia non richiede la distruzione delle pareti, ma ne richiede la ricopertura.

Gli impianti radianti a parete portano a condizioni di comfort simili a quelli dell'impianto a pavimento nel caso di chiese piccole mentre si riesce a raggiungerlo sempre meno con l'aumentare dei volumi da riscaldare.

In totale, questa tipologia di impianto è meglio se funziona in modo continuo (anche per una sola parte della potenza richiesta). Con questo tipo di operazione si eliminano i problemi di condensazione. L'installazione però è molto invasiva dal punto di vista visivo ma anche strutturale e quindi non è possibile l'installazione quando ha a che fare con muri con opere d'arte o di valore storico. Un funzionamento intermittente è sconsigliato e porta alle problematiche dell'impianto radiante a pavimento.

2.7.7 Il riscaldamento a banchi

Il riscaldamento a banchi è un sistema di riscaldamento diverso da quelli sopra citati in quanto è di tipo localizzato. Consiste nell'installazione di sistemi caldi, che possono essere di vario genere come sistemi radianti ad acqua o sistemi radianti elettrici, sotto il banco o l'inginocchiatoio. Questi sistemi riscaldano in modo localizzato garantendo il comfort che si vuole raggiungere in un determinato posto, lasciando inalterata la parte restante dell'ambiente.

Questi sistemi, se progettati e installati bene, sono ad alta efficienza perché non disperdono calore nell'ambiente e lo riscaldano solo quando necessario. Generalmente non portano a particolari danni interni perché poco invasivo, a meno che i banchi non siano di valore storico. Rimane sempre il problema della qualità dell'aria a causa dei moti convettivi a bassa quota.

A seconda del tipo del vettore energetico, ci possono essere problemi di temperature troppo alte che possono portare a problemi di sicurezza.

Grazie alla loro bassa inerzia, sono dei sistemi molto versatili e veloci. Sono una ottima soluzione per climi miti e secchi. Nel caso di climi umidi hanno delle limitazioni poiché non vanno a proteggere la struttura in sé.

2.8 Il friendly heating

Il progetto Europeo “Friendly Heating”, che ha avuto luogo tra il 2002 e il 2005, si è posto l’obiettivo del trovare e sviluppare una soluzione tecnologica che permettesse il riscaldamento delle chiese storiche in modo meno invasivo e più efficiente possibile. Questo sistema doveva permettere un riscaldamento diretto per le persone occupanti senza alterare il microclima interno creatosi nel tempo.

Il risultato di questo progetto è il sistema, che prende il nome del progetto stesso e si basa su un riscaldamento di tipo localizzato. Il FH si è sviluppato dal già conosciuto sistema a banco da cui però si differisce per diversi aspetti. I vecchi sistemi di riscaldamento a banco funzionano solitamente a temperature molto alte, ma dagli studi e dalle prove fatte in laboratorio per questo progetto, si è arrivati ad affermare che la miglior scelta di riscaldamento sono dei sistemi a bassa temperatura, compresa tra i 40 e i 70°C operanti nel campo dell’infrarosso.

L’emettitore del FH è costituito da lamine di diverse dimensioni e operanti a diverse temperature racchiuse dentro una struttura metallica che può anche essere a griglia per proteggere la lamina dai danni meccanici causati dagli oggetti o dagli atti vandalici. Queste lamine sono fatte da uno strato alimentato elettricamente che è composto da granuli di grafite depositati su fibra di vetro e sigillato da due fogli di plastica. Quando si alimenta la lamina con energia elettrica, la grafite si riscalda per effetto Joule e a causa della variazione di temperatura varia la resistenza elettrica. In particolare, all’aumentare della temperatura, aumenta la resistenza elettrica, che quindi fa abbassare la corrente elettrica con

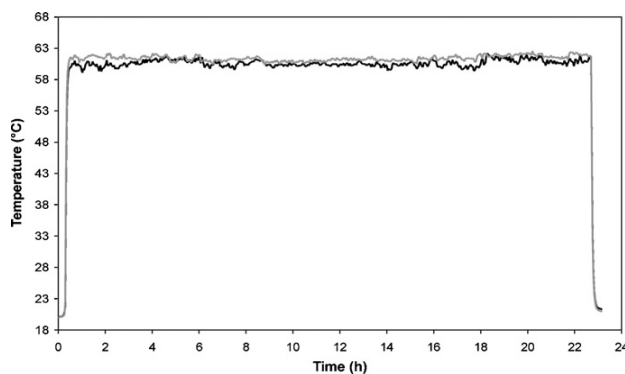


Figura 3 Esempio della temperatura del nastro emettitore.

conseguente diminuzione di temperatura. L'effetto totale è quello di avere un emettitore che autoregola la sua temperatura massima. Si possono quindi progettare e gestire queste lamine in modo da avere temperature diverse in punti diversi di installazione. Sul retro di ogni lamina ci sono inoltre dei sistemi di riflessione e uno strato di isolamento, per limitare le emissioni e le perdite verso dietro evitando anche potenziali danneggiamenti dei banchi. La griglia che racchiude l'emettitore vero e proprio, può prevedere diversi sistemi di protezione o no, e a causa del suo basso coefficiente di assorbimento, permette una buona emissione della lamina.

L'emettitore assieme alla cassa di protezione, si installa sui banchi semplicemente con 4 viti. Nel caso che i banchi avessero un valore storico, questo non sarebbe possibile e quindi vanno previsti sistemi diversi come ad esempio quelli basati su sostegni metallici. In questi casi va però previsto un buon isolamento tra l'emettitore e il banco al fine di evitare cicli di temperatura che danneggerebbero il legno. Le posizioni di installazione possono essere molteplici e dipendono dagli obiettivi da raggiungere.

Questi sistemi sono stati studiati, modellizzati e sperimentati da diversi team universitari tra i quali anche uno di Padova di cui verranno esposti i risultati.

Il FH è stato applicato in una chiesa e si sono misurati i diversi parametri di funzionamento dell'impianto e il comfort ottenuto. Si è assunto un'attività metabolica di 1 MET per le persone sedute e di 1.2 MET per quelle in piedi. A causa della bassa attività metabolica quindi i piedi, le gambe e le mani sono le parti più sensibili che hanno più bisogno di riscaldamento esterno. Il resto del corpo si suppone adeguatamente isolato dai vestiti limitando quindi il bisogno di riscaldamento esterno.

Si sono misurati i profili di temperatura in altezza di un sistema composto da emettitori a bassa temperatura per ogni banco, installati in modo tale da soddisfare il fabbisogno termico delle specifiche parti del corpo.

Dalle misurazioni è risultato che generalmente ci sono 3 posizioni ideali per gli emettitori: sotto l'inginocchiatoio, sotto il poggia mani e sotto il banco. Sotto il banco si usa un emettitore a 55°C con una forma semicilindrica tale da emettere verso le gambe d'avanti e dietro il banco; sotto l'inginocchiatoio si usa un emettitore a 65°C posto in modo da radiare verso il basso e per il poggia mani si usa un emettitore a 60°C che irradia verso la persona dietro il banco.

Un esempio di andamento della temperatura rispetto all'altezza è mostrato nella figura 5 che mostra come effettivamente si riesca ad assicurare un riscaldamento localizzato e interessato solo alle parti del corpo più problematiche.

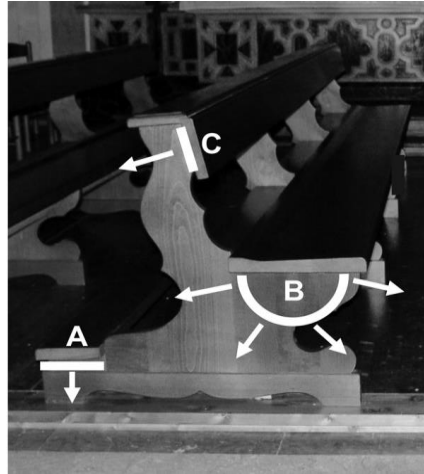


Figura 4 Posizionamento degli emettitori.

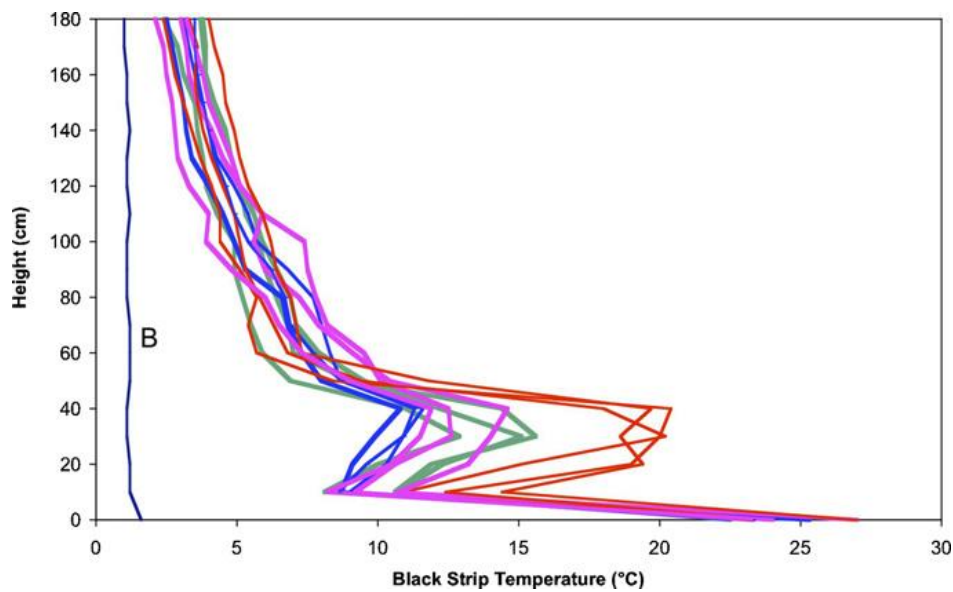


Figura 5 Profilo di temperatura verticale con diverse configurazioni.

2.8.1 Risultati dell'analisi del team universitario

Dalle misurazioni risulta che la temperatura del pavimento varia solamente laddove va installato l'impianto.

Dal punto di vista degli impatti sul soffitto e sugli affreschi, non si denotano particolari cambiamenti. Nei casi più estremi, si è registrato un innalzamento di temperatura nella zona non riscaldata di appena 0.5°C dopo 1 ora di funzionamento dell'impianto. Questo valore è confrontabile con quello che può

essere semplicemente dovuto alla presenza delle persone o all'impianto di illuminazione di vecchia data. In media, in realtà la temperatura nel volume rimane costante perché una regione si riscalda e l'altra si raffredda a causa dei moti convettivi. Da questi risultati quindi si può affermare che questo impianto non porti a problemi di dissoluzione/ricristallizzazione dei sali sulle opere favorendone la conservazione nel tempo.

Dal punto di vista della distribuzione della temperatura nel volume d'aria, si raggiungono le temperature volute nella zona occupata, e già a partire da un'altezza di 2 metri, è come se l'impianto non esistesse.

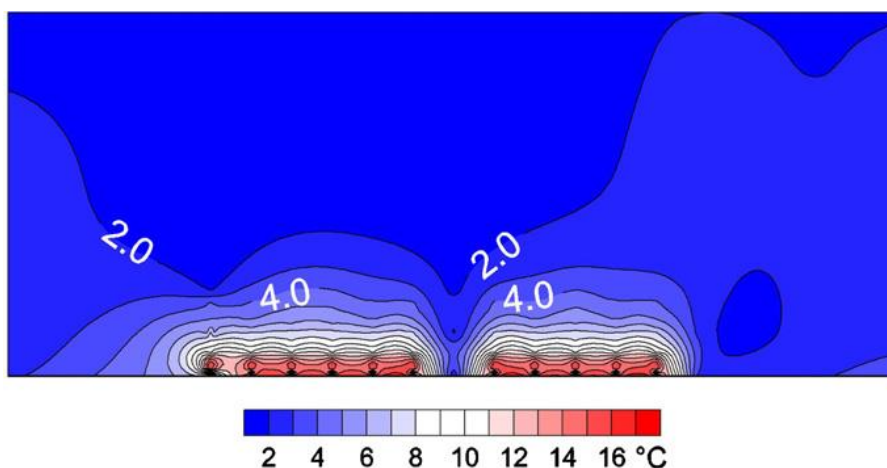


Figura 6 Distribuzione della temperatura nell'ambiente.

La temperatura e l'umidità relativa sono state monitorate nel tempo in diversi punti e non si sono registrati particolari fluttuazioni nel tempo. Le fluttuazioni registrate sono simili a quelle naturali e quindi confrontabili con quelle del microclima già esistente. Questi dati si sono confrontati anche con quelli dell'impianto preesistente nella chiesa e dalla figura 7 si può vedere come effettivamente l'area

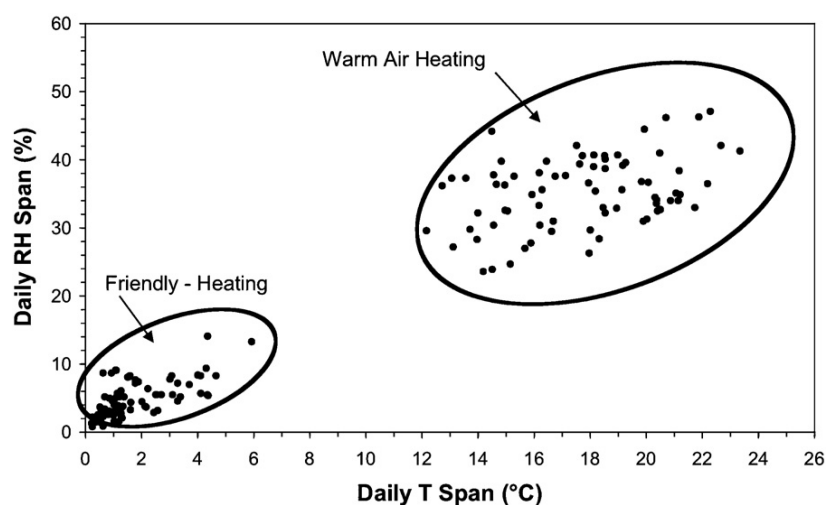


Figura 7 Variabilità della temperatura e dell'umidità relativa con 2 diversi sistemi di riscaldamento.

relativa al FH è molto minore e quindi si ha una bassa variabilità che si traduce in un mantenimento del microclima esistente e in una buona integrazione dell'impianto con l'edificio storico.

Il comfort è stato valutato con 3 metodi diversi e tutti hanno portato all'approvazione di questa tipologia di impianto. I metodi usati sono: questionario degli occupanti, monitoraggio della temperatura, velocità e turbolenza dell'aria, misurazione della temperatura sulla pelle. Se si confrontassero i risultati con quelli dovuti a un sistema ad aria, si vedrebbe che con il FH il comfort viene percepito anche quando le temperature nella chiesa sono basse in quanto si riescono a riscaldare le zone di maggior interesse in modo efficiente e adeguato. Un esempio di confronto può essere visto nella figura 8.

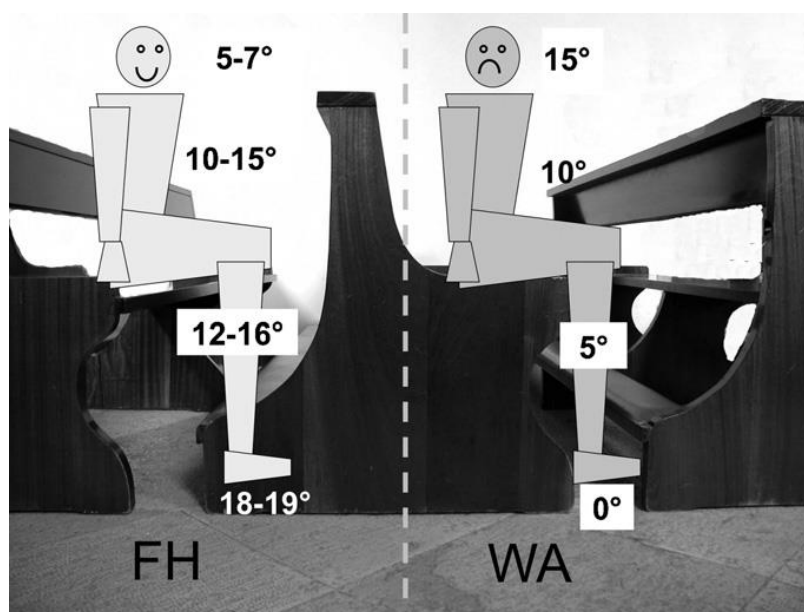


Figura 8 Sensazione di comfort con le 2 tipologie di impianto confrontate.

Generalmente questi sistemi, se installati in contesti favorevoli hanno problemi solo dal punto di vista della preservazione del banco e ai moti convettivi che si instaurano a causa della differenza di temperatura tra pavimento e le altre superfici fredde. Questo movimento d'aria è più attenuato nella parte centrale ma aumenta avvicinandosi alle pareti.

Il FH è quindi un ottimo e valido sistema di riscaldamento per chiese storiche che hanno bisogno di un riscaldamento solamente di tipo localizzato, intermittente e che permetta la conservazione del patrimonio culturale che detiene.

3 L'edificio

L'edificio in esame è una chiesa evangelista. È intitolata ad Albert Schweitzer ed è sita a Berlino, nel distretto Reinickendorf. Fu costruita tra il 1966 e il 1968, e il suo centro comunitario è stato inaugurato il 20 aprile del 1969. La chiesa è stata progettata dall'architetto Peter Poelzig, figlio del famoso architetto e pittore tedesco Hans Poelzig, a metà del secolo scorso seguendo lo stile architettonico dell'epoca.

L'architettura della Albert Schweitzer Kirche può essere definita di tipo moderna e ne è la prova l'uso del calcestruzzo a vista, la ricorrenza alle forme geometriche regolari come ad esempio l'uso della forma cilindrica per le scale esterne, i gusci semicilindrici di cui è composto il tetto inclinato della chiesa, e dalla sezione triangolare. Un'altra grande peculiarità della chiesa può essere data dalla sua grande facciata quasi completamente vetrata e rivolta a Ovest.



Figura 9 Vista esterna della chiesa.

3.1 Descrizione dell'edificio

L'edificio in esame è sito nel distretto di Reinickendorf che è il dodicesimo distretto di Berlino. Questo distretto nasce nel 1920 come suddivisione amministrativa della nuova "Grande Berlino" ed è composta da 11 quartieri. La Albert Schweitzer Kirsch sta nel quartiere di Reinickendorf in un contesto urbanistico basato su edifici sviluppati in altezza e con molte zone verdi.

L'intero edificio è composto da un volume di 6230 m³ e una superficie calpestabile totale di 1552 m² divisa su due piani. La chiesa ha una superficie calpestabile di circa 500 m² ed è al secondo piano, mentre il piano terra ne ha circa 1000. Data la differenza di superficie piana, il piano terra ha anche un tetto piano. Questa superficie è per la maggior parte agibile e da qui si può anche accedere alla chiesa.

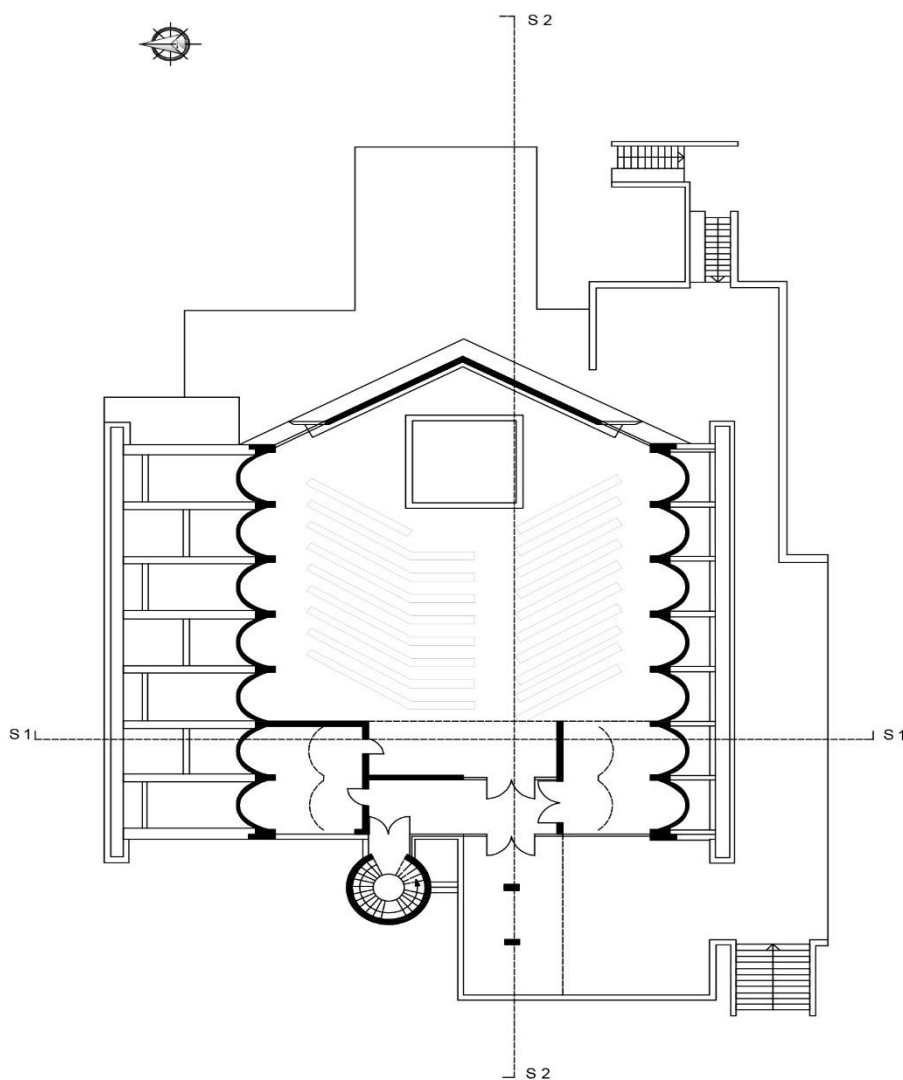


Figura 10 Pianta del piano superiore.

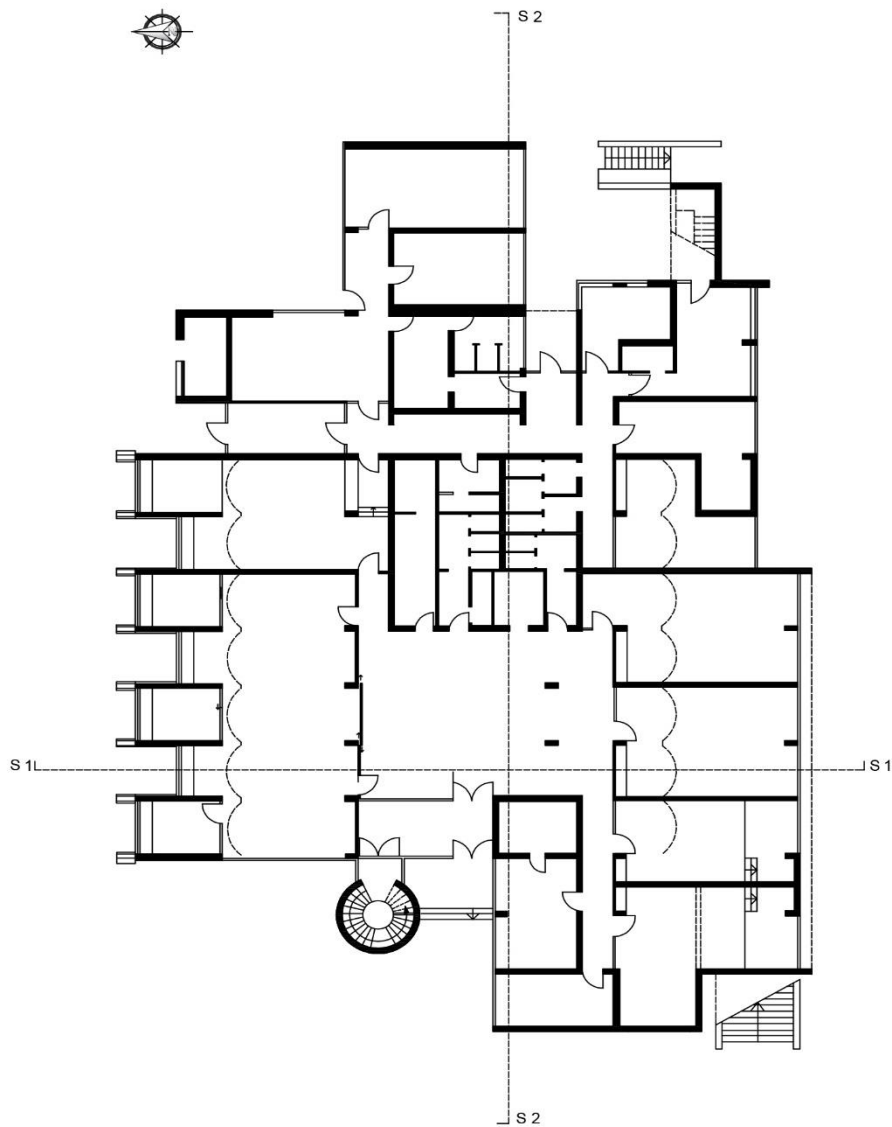


Figura 11 Pianta del piano inferiore.

La chiesa può essere divisa su due livelli con scopi e usi differenti dei locali. Al piano terra ci sono diversi spazi per le attività culturali e comunitarie, un asilo nido, dei dormitori, uno spazio dedicato al coro della chiesa ecc. Al piano superiore invece si trova la chiesa vera e propria e degli spazi dedicati ad essa.

L'ingresso principale è posto a ovest dove si ha una grande facciata quasi interamente vetrata. Da qui si può accedere al piano inferiore ma anche alla chiesa adoperando le scale esterne a chiocciola dentro una struttura cilindrica composta di calcestruzzo armato. Si può accedere alla chiesa anche dal tetto piano raggiungibile con delle scale da un altro livello del terreno.

Il tetto della chiesa, lungo la sezione principale, è di forma triangolare ed è composto da 7 gusci semi-cilindrici per falda (Nord e Sud) e da due falde piane prismatiche dal lato Est che vanno a chiudere la struttura. Il tetto del piano terra invece è in parte calpestabile e in parte non, in particolare il tetto della parte est non lo è.

Il tetto inclinato continua fino ad altezza terra dal lato nord mentre dal lato sud si ferma ad un'altezza di circa 4 m rispetto al basamento dell'edificio. Dal lato sud, si può vedere una grande superficie vetrata ed un ampio spazio esterno.

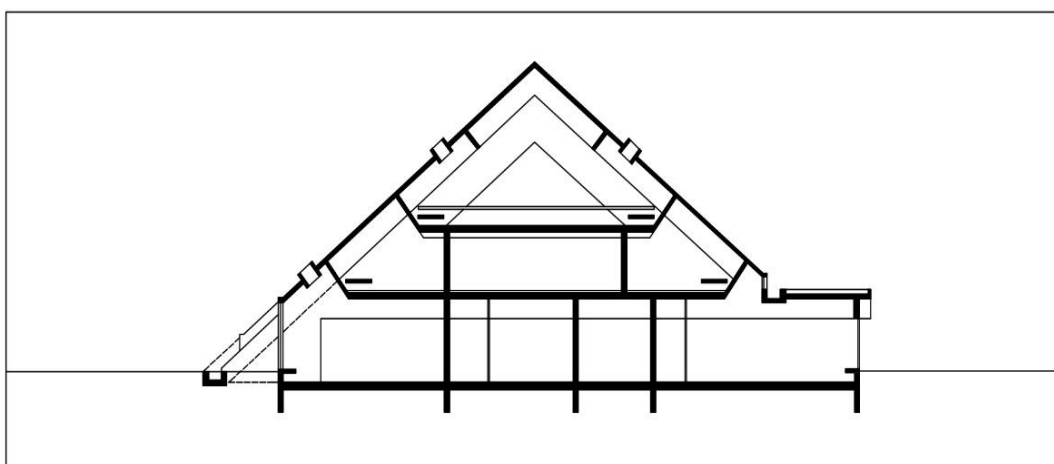


Figura 12 Sezione 1.

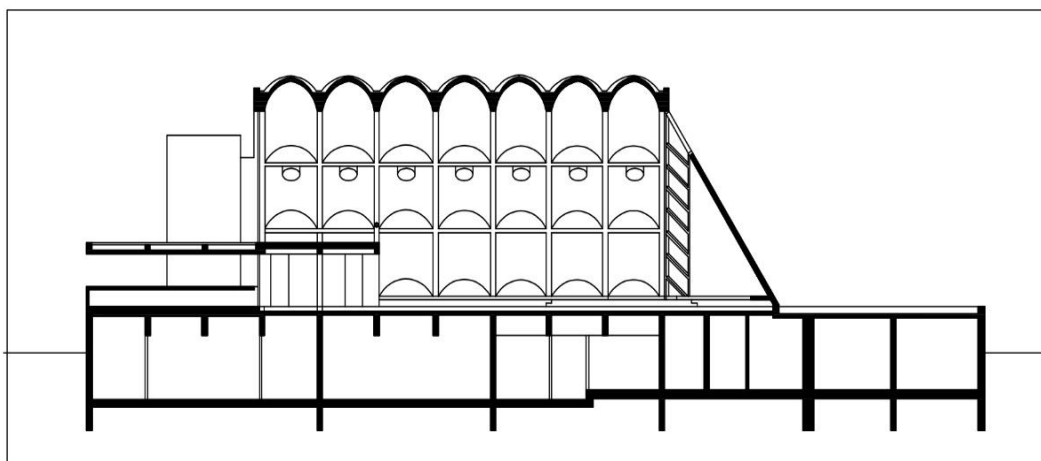


Figura 13 Sezione 2.

3.2 L'Involucro edilizio

3.2.1.1 Elementi opachi

Si riportano di seguito le stratigrafie delle strutture opache presenti nella struttura e la trasmittanza calcolata con la seguente relazione:

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{int}} + \frac{1}{\alpha_{ext}} + \sum \frac{s_i}{\lambda_i}} \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Dove:

- U_o è la trasmittanza dell'elemento considerato
- s_i è lo spessore dello strato i-esimo
- λ_i è la conducibilità termica del materiale i-esimo
- $\alpha_{i,e}$ è il coefficiente di scambio liminare interno ed esterno

Si è considerato un coefficiente liminare interno $\alpha_i = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ed esterno $\alpha_e = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

3.2.1.2 Muro esterno

Il muro esterno è composto da 22 cm di calcestruzzo e uno strato di intonaco interno. Come normale per i tempi di costruzione, il muro non è isolato e presenta quindi scarse prestazioni energetiche



Figura 14 Stratigrafia del muro esterno.

	s [m]	ρ [kg/m ³]	c [kJ/kgK]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Intonaco interno	0.015	1800	1	1.100	0.014
Calcestruzzo	0.22	2400	1	2.300	0.096

Tabella 1 Stratigrafia del muro esterno.

$$U_0 = 3.65 \frac{W}{m^2K}$$

3.2.1.3 Solaio contro terra

Il solaio è composto principalmente da calcestruzzo. Non è isolato e ha un'alta trasmittanza.

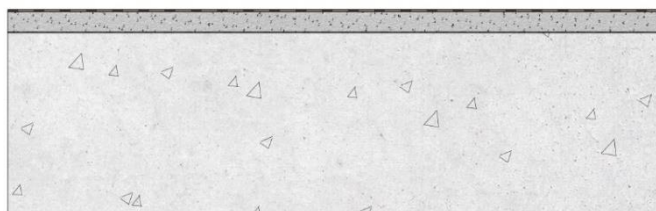


Figura 15 Stratigrafia del solaio contro terra.

	s [m]	ρ [kg/m ³]	c [kJ/kgK]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Rivestimento sintetico	0.003	1400	1.6	0.15	0.02
Massetto	0.03	2200	1	0.80	0.038
PE-Foil	0.0002	940	1.8	0.40	0.001
Calcestruzzo armato	0.265	2400	1	1.370	0.193

Tabella 2 Stratigrafia del solaio contro terra.

$$U_0 = 1.99 \frac{W}{m^2K}$$

3.2.1.4 Solaio interpiano

Il solaio interpiano è uguale a quello contro terra a meno della barriera al vapore.

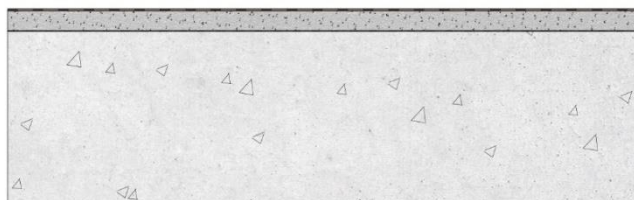


Figura 16 Stratigrafia del solaio interpiano.

	s [m]	ρ [kg/m ³]	c [kJ/kgK]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Rivestimento sintetico	0.003	1400	1.6	0.15	0.02
Massetto	0.03	2200	1	0.80	0.038
Calcestruzzo armato	0.265	2400	1	1.370	0.193

Tabella 3 Stratigrafia del solaio interpiano.

$$U_0 = 1.99 \frac{W}{m^2K}$$

3.2.1.5 Tetto piano calpestabile e non

Il tetto piano è composto da 25 cm di calcestruzzo ma presenta anche 9 cm di isolamento esterno. Grazie a questo strato di isolante, la trasmittanza è bassa rispetto alle componenti precedenti.

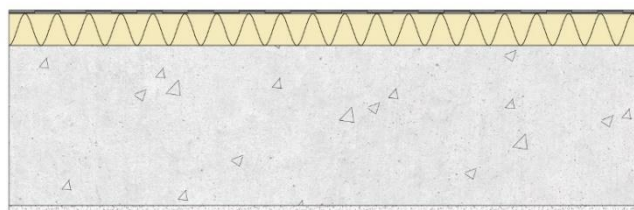


Figura 17 Stratigrafia del tetto piano.

	s [m]	ρ [kg/m ³]	c [kJ/kgK]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Intonaco interno	0.015	1800	1	1.100	0.014
Calcestruzzo armato	0.250	2400	1	2.300	0.109
Isolante	0.090	30	0.9	0.148	2.195
Guaina bituminosa	0.005	1300	1	1.440	0.013

Tabella 4 Stratigrafia del tetto piano.

$$U_0 = 0.40 \frac{W}{m^2 K}$$

3.2.1.6 Tetto inclinato

Il tetto inclinato ha una struttura portante composta di calcestruzzo di spessore di 8 cm ed è isolato e rivestito con lastre di rame sostenute da del tavolato in legno.

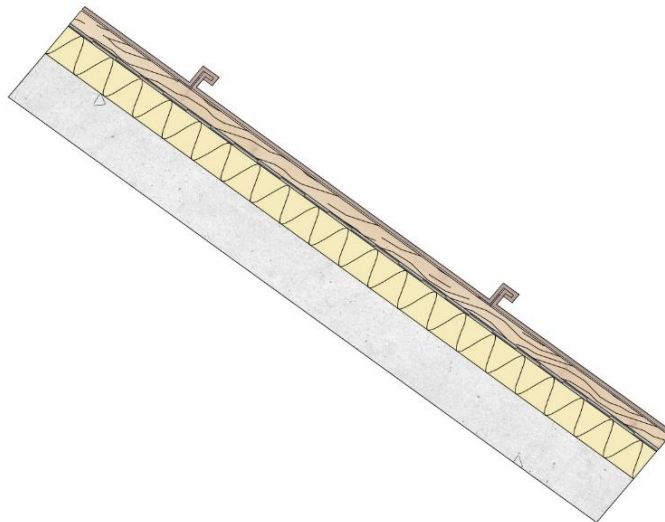


Figura 18 Stratigrafia del tetto inclinato.

	s [m]	ρ [kg/m ³]	c [kJ/kgK]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Calcestruzzo armato	0.080	2400	1	2.3	0.035
Isolante	0.050	30	0.9	0.201	0.898
Guaina bituminosa	0.005	1300	1	1.440	0.013
Tavolato in legno	0.024	1000	2	0.936	0.092
Lastre di rame	0.005	8900	3.9	1368	0.00001

Tabella 5 Stratigrafia del tetto inclinato.

$$U_0 = 0.83 \frac{W}{m^2K}$$

3.2.2 Elementi trasparenti

Gli elementi trasparenti sono tutti composti da un vetro con una trasmittanza $U_v = 1.9 \text{ W/m}^2\text{K}$ e con un g-factor di 0.77. Il telaio invece ha una trasmittanza $U_t = 2.27 \text{ W/m}^2\text{K}$ e un rapporto di superficie telaio/vetro pari a 15%.

Il calcolo della trasmittanza totale della finestra si esegue con la relazione:

$$U_f = \frac{A_v \cdot U_v + A_t \cdot U_t + \Psi_t}{A_v + A_t} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

Dove:

- $A_{v,t}$: è la superficie del vetro o del telaio.
- $U_{v,t}$: è la trasmittanza del vetro o del telaio.
- Ψ_t : è la trasmittanza termica lineare dovuta ai ponti termici.

$$U_f = 1.95 \frac{W}{m^2K}$$

3.3 Impianto di climatizzazione invernale

Non si hanno molti dati a disposizione per quanto riguarda l'insieme dell'impianto di riscaldamento esistente. Le uniche informazioni date a disposizione sono relative alla tipologia del sistema di emissione.

Il sottosistema di emissione è di due tipologie. Al pian terreno l'emissione avviene con tradizionali radiatori, mentre al piano superiore, cioè nella chiesa si ha un misto di radiatori e ventilconvettori.

Per quanto riguarda invece il sottosistema di distribuzione e regolazione, non si hanno informazioni. Visto il periodo di costruzione della chiesa, si è assunto una distribuzione su pareti esterne con classe di isolamento basso/scadente e una regolazione climatica con regolatore di zona on-off.

Il sottosistema di generazione invece non esiste, nel senso che l'edificio è collegato a un sistema di teleriscaldamento della città. Non avendo nessuna informazione per quanto riguarda la rete e la tipologia di teleriscaldamento i calcoli dei fabbisogni dell'edificio saranno riferiti all'energia finale.

3.3.1 Calcolo del rendimento del sistema di riscaldamento

Il calcolo del rendimento del sistema di riscaldamento è stato calcolato secondo la UNI/TS 11300-2 in quanto non è stato possibile reperire la normativa tedesca. Poiché i risultati comunque saranno espressi in termini relativi, questa scelta non ha peso sul risultato.

η_e	Rendimento del sottosistema di emissione	Prospetto 17, 18
η_{rg}	Rendimento del sottosistema di regolazione	Prospetto 20
η_d	Rendimento del sottosistema di distribuzione	Prospetto 21e
η_{gn}	Rendimento del sistema di generazione	Prospetto 27

Tabella 6 Prospetti di riferimento per il calcolo dei rendimenti dei sottosistemi.

Come già menzionato, non si hanno informazione sulla rete di teleriscaldamento quindi si assume un rendimento di generazione pari al 100%.

Nella chiesa si ha un'altezza di circa 10 metri e considerando l'emissione attraverso ventilconvettori si ottiene un rendimento di emissione $\eta_e=0.93$

Al pian terreno, si considerano radiatori su parete esterna con carico termico annuo alto, ottenendo un valore di rendimento di emissione base di $\eta_e=0.96$ a cui va però applicata una riduzione di 0.04 e correzione di 0.01 a causa del muro non isolato e alla correzione sulla temperatura di mandata dell'acqua assumendola a 65°C.

La regolazione assunta è quella di regolazione climatica e a zona con regolatore on-off.

La distribuzione considerata avviene con montanti su parete esterna non isolata e tubi con isolamento scarso/scadente.

	Piano terra	Piano superiore
Rendimento di emissione	0.920	0.950
Rendimento di regolazione	0.930	0.930
Rendimento di distribuzione	0.930	0.930
Rendimento di generazione	1.000	1.000

Tabella 7 Rendimenti dei sottosistemi considerati.

Il rendimento totale del sistema di riscaldamento è stato calcolato come prodotto dei singoli sottosistemi.

$$\eta_{t,piano\ inferiore} = 79.6 \%$$

$$\eta_{t,piano\ superiore} = 82.2 \%$$

3.4 Illuminazione artificiale

L'intero edificio è illuminato da lampade a fluorescenza per una potenza totale di 3.7kW. Si è scelto di dedicare il 25 % alla chiesa e il restante 75 % al piano terra. Le schede degli orari di utilizzo dell'illuminazione artificiale saranno presentate nel capitolo relativo a Trnsys.

4 Trnsys

4.1 Introduzione al software

Le simulazioni sono state eseguite con il software commerciale TRNSYS che è un ambiente di simulazione dinamica dedicato a diversi tipi di sistemi compresi gli edifici multizona. È un software molto usato in ambito ingegneristico grazie alla sua affidabilità e all'ampia varietà dei campi di applicazione che va dai più semplici scambiatori di calore fino a sofisticati e complessi progetti comprendenti per esempio: edificio, impianto, sistemi ad energia alternativa, strategie di controllo, comfort ecc.

Due dei punti cardini del software sono la sua struttura modulare e la quasi totale personalizzazione dei progetti da parte dell'utente. Il software infatti consiste nell'inserzione di una serie di "Type" che sono dei moduli preinstallati e nel collegamento tra di loro. In base all'obiettivo del progetto, si hanno delle type specifiche come per esempio quelle dei fenomeni fisici, dei componenti o anche dei dati climatici ma che sono quasi totalmente personalizzabili modificando i parametri di interessi ma anche il modo di collegamento tra loro.

4.2 Metodo di modellizzazione

Per le simulazioni si è usato TRNBuild e Simulation Studio. In TRNBuild si è costruito il modello dell'edificio considerando le stratigrafie reali dei componenti opachi, le finestre, la presenza o meno della ventilazione, infiltrazione, riscaldamento, apporti interni e solari, ecc. Poiché il software calcola la temperatura media in un solo punto, chiamato "air node", si è diviso l'edificio in più zone in modo da poter gestire diversamente ambienti differenti e per ridurre il più possibile gli errori dovuti alla non completa coincidenza del modello rispetto al caso reale.

Dopo aver completato il modello dell'edificio (per ogni caso in esame), si richiama il modello in Simulation Studio attraverso apposite types, e in base agli scopi si possono collegare altre type a quella dell'edificio.

Generalmente possiamo dividere le type usate in type di input e type di output (rispetto a quella del modello). Come types di input ci sono per esempio le types relative ai dati climatici, alla temperatura del terreno, alle temperature di riscaldamento delle zone, ai tassi di ventilazione delle zone, alla presenza

delle persone delle zone, e agli apporti interni. Le types di output possono per esempio essere quelle del salvataggio dei file o altro.

I dati climatici di Berlino sono stati scaricati da EnergyPlus e caricati su Simulation Studio con la type apposita. La temperatura del terreno viene calcolata con una type che però richiede come input la temperatura media annua, la differenza della temperatura media annua con quella del giorno più caldo e il numero di giorni di differenza tra il primo giorno di simulazione e quello più freddo. Attraverso questi dati, il software è capace di simulare il comportamento del terreno e di crearne il profilo di temperatura. Per i restanti dati di input, si sono usati fogli di calcolo in Excell che sono stati compilati con i dati necessari in modo da simulare il più possibile il reale uso dell'edificio.

4.3 Suddivisione delle zone

La suddivisione delle zone è un passo molto importante nella definizione degli edifici multizona. La suddivisione deve essere fatta cercando di tenere insieme ambienti il più possibile simili tra loro in termini di orientazione, destinazione d'uso, comportamento degli occupanti, strategie di controllo, modalità di riscaldamento, temperature di riscaldamento, ecc. Per quanto riguarda il lavoro di tesi, la concentrazione è posta totalmente sul comportamento energetico della chiesa nelle diverse configurazioni d'impianto e non sull'intero edificio. Il piano inferiore quindi è stato diviso cercando di seguire i criteri sopracitati ma senza entrare in particolari dettagli.

L'intero edificio è stato inizialmente diviso in 2 parti: il piano terra e il piano superiore. Il piano superiore è stato diviso in 3 zone: la zona 1 composta dalla sala delle cerimonie, la zona 2 composta da una piccola stanza con la parete a ovest quasi interamente vetrata, la zona 3 composta dall'ingresso nella chiesa. Il piano inferiore è stato invece diviso in 4 zone in base all'orientazione e tipo di uso degli ambienti: la zona 4 è l'area a est, dove rientrano i bagni e una serie di uffici, la zona 5 a nord composta da un piccolo asilo e da una grande stanza per conferenze, la zona 6 a sud composta da una serie di aule e dormitori, la zona 7 nord-ovest composta da dormitori e una grande area comune.

Per ognuna di queste zone si sono definite le temperature di riscaldamento, i tassi di ventilazione, la presenza delle persone e gli apporti interni su cadenza oraria.

Per quanto riguarda gli apporti interni, sono stati legati alla presenza delle persone nei locali. Si è considerato il valore totale degli apporti interni e si è dedicato il 25% al piano superiore e il 75% al piano inferiore. Questi 25% e 75%, sono stati rapportati alla superficie degli ambienti e si attivano quando i locali sono occupati. Nel caso del piano inferiore gli apporti vengono considerati nulli durante gli orari notturni anche in presenza di persone nei locali.

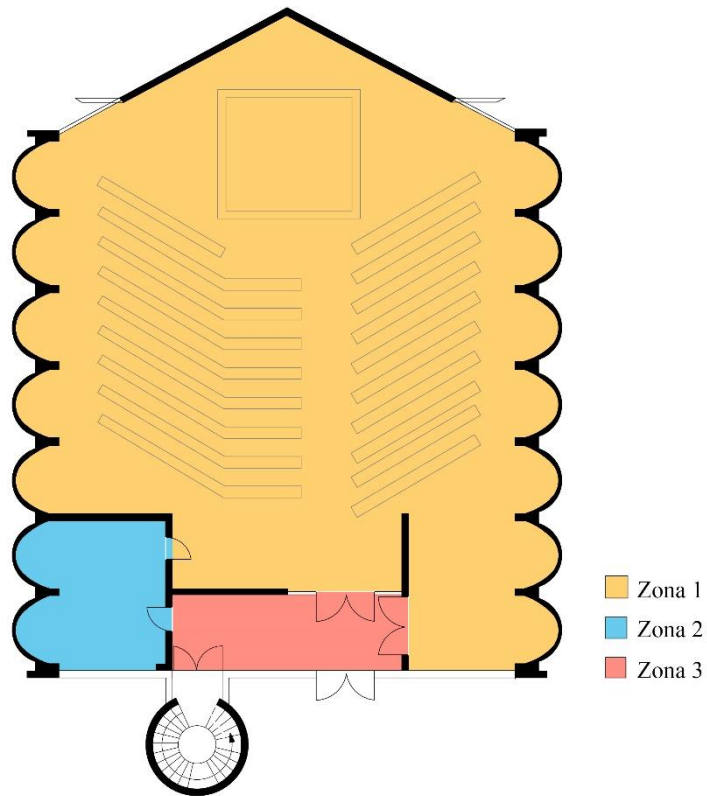


Figura 19 Suddivisione delle zone del piano superiore



Figura 20 Suddivisione delle zone del piano inferiore.

4.3.1 Zona 1

La zona 1 è la chiesa stessa. È composta da un ambiente di grande volume ed è sottoposta a tutte le orientazioni. Qui si è imposto una temperatura interna durante l'uso (set-point) di 16°C e una temperatura minima (set-back) di 12°C. Il riscaldamento e il raffreddamento dell'ambiente vengono controllati imponendo un gradino di 1°C/h per non andare a interferire con il microclima dell'ambiente e per favorire la conservazione degli elementi costruttivi e dei strumenti musicali, come si farebbe in una chiesa storica.

La presenza delle persone è stata considerata secondo l'andamento nelle figure 21,22,23.

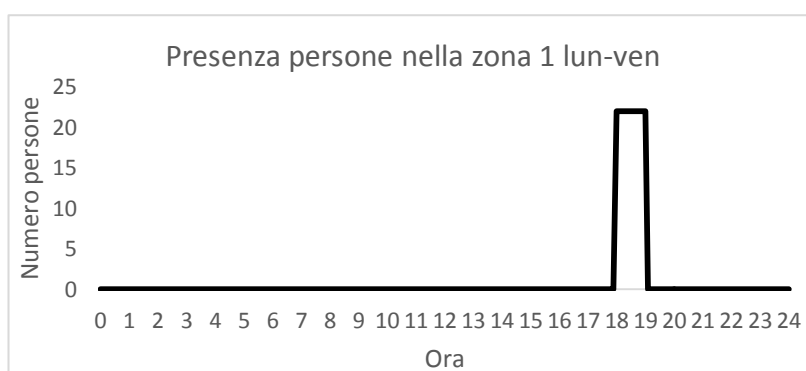


Figura 21 Grafico della presenza delle persone da lunedì al venerdì.

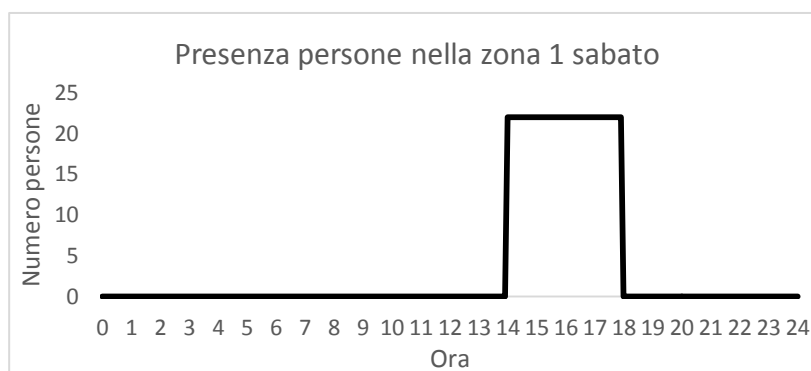


Figura 22 Grafico della presenza delle persone il sabato.

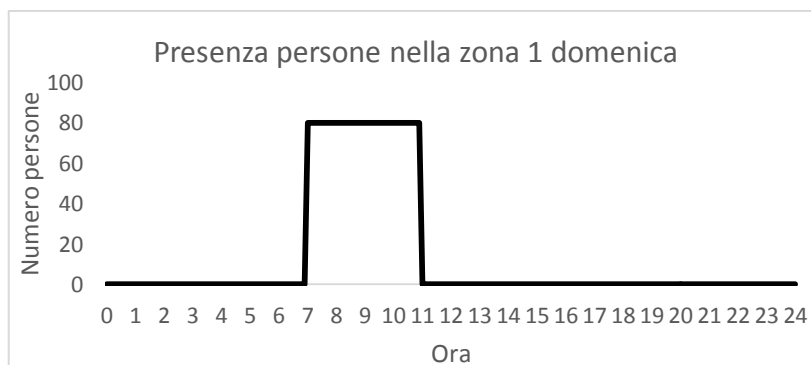


Figura 23 Grafico della presenza delle persone la domenica.

Sono stati considerati 3 tipi diversi di affluenza durante la settimana. Dal lunedì al venerdì la chiesa viene usata dalle 18 alle 19 con un'affluenza media del 20% della capienza massima. Il sabato l'orario di affluenza è dalle 14 alle 18 considerando il 20% della capienza massima e la domenica dalle 7 alle 11 considerane l'80%.

Il tasso di ventilazione e gli apporti interni sono legati alla presenza di persone nell'ambiente. In particolare, si è considerato un tasso di ventilazione pari a 0.8 vol/h quando la zona è occupata da persone e 0 vol/h in loro assenza. Si è considerato anche un tasso di infiltrazione costante e pari a 0.2 vol/h dovuto alla struttura. In totale, il tasso di ricambio dell'aria della chiesa è di 1 vol/h quando è occupata e 0.2 vol/h quando non lo è.

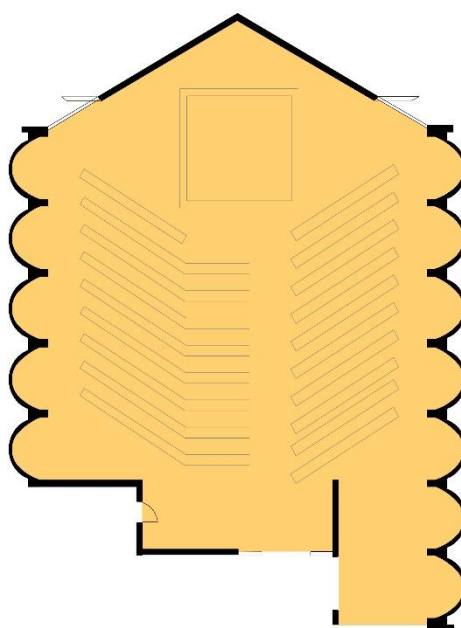


Figura 24 La zona 1.

La figura 24 mostra la geometria considerata per la zona 1 che però non è del tutto esatta. Questo perché la zona 2 e 3 non si estendono su tutta l'altezza della chiesa. Sopra queste due zone l'ambiente è stato considerato facente parte della zona 1.

4.3.2 Zona 2

La zona 2 è composta da un piccolo locale della chiesa che però risulta essere separato dall'ingresso e dall'ambiente dedicato alle cerimonie. Questo ambiente è esposto a Ovest e a Nord. A ovest è quasi

completamente vetrato mentre a nord è composto dal tetto inclinato della chiesa con i suoi gusci semicilindrici.

Le temperature, la presenza delle persone nella zona e i tassi di ventilazione, sono uguali a quelli della zona 1 considerano però presenti massimo 2 persone.

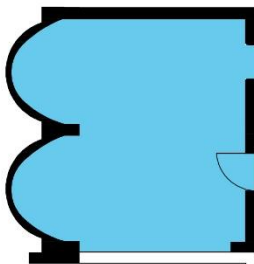


Figura 25 La zona 2.

4.3.3 Zona 3

La zona 3 è composta dall'ingresso nella chiesa. Da qui si può accedere alla zona 1 e alla zona 2. È un piccolo ambiente ed è esposto solo a Ovest.

In questa zona non si considera nessun tipo di riscaldamento, non si considerano persone in quanto è solo una zona di accesso, nessun apporto interno e tasso di ventilazione. Si assume solo il tasso fisso di infiltrazione ma che energeticamente non dovrebbe interferire con la simulazione.

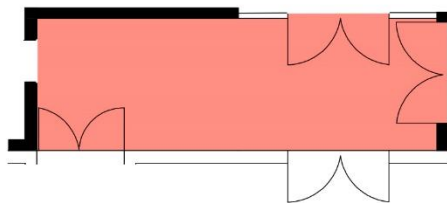


Figura 26 La zona 3.

4.3.4 Zona 4

La zona 4 è la prima zona presa in considerazione al piano terra. È una zona molto grande comprendente diversi locali in quanto un'analisi dettagliata non è richiesta per il piano terra. È esposta principalmente a est e ha qualche superficie esposta a nord. Questa zona è composta da bagni, una serie di uffici e locali privati.

Nella zona 4, così come per tutto il piano terra si è imposto una temperatura di set-point di 20 gradi e una temperatura di set-back di 18°C. I 20°C sono da raggiungere nelle ore diurne, mentre il riscaldamento nelle ore notturne viene abbassato a 18 gradi.

Non avendo abbastanza informazioni per comporre la scheda delle attività, si sono considerati sempre presenti 2 persone in tutta la zona. Il tasso di ventilazione considerato è pari a 0.3 vol/h che va a sommarsi ai 0.2 vol/h dovuti all'infiltrazione. Gli apporti interni sono considerati solo nelle ore diurne, dalle 8 alle 23 per ogni giorno della settimana.

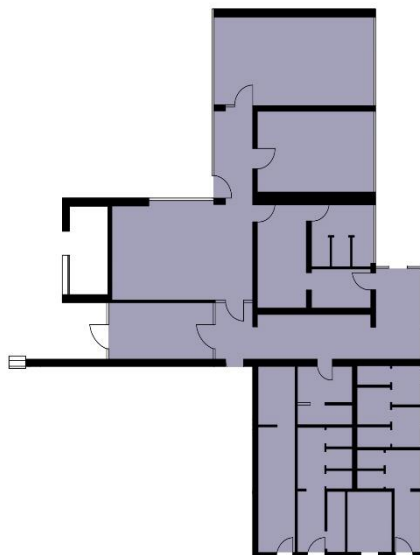


Figura 27 La zona 4.

4.3.5 Zona 5

La zona 5 è una zona dedicata all'asilo nido gestito dalla comunità e a una grande area conferenze. È esposta principalmente a Nord e in parte a Ovest.

Si sono considerate 35 persone in orari mattutini (dalle 8 alle 15) esclusi weekend e festivi e per il resto della giornata si è considerato la zona non occupata in quanto l'uso della sala conferenze non è programmabile.

Le temperature di set-point e set-back considerate sono le stesse della zona 4, in questo caso però l'accensione e/o spegnimento dell'impianto di riscaldamento è legato all'occupazione della stanza.

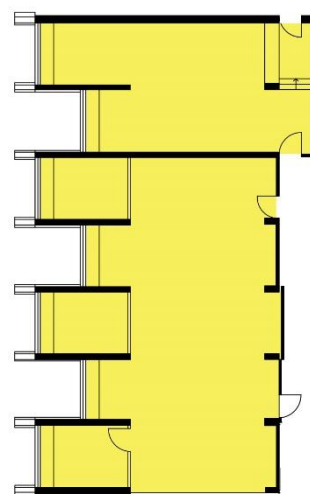


Figura 28 La zona 5.

Il tasso di ventilazione e gli apporti interni considerati sono legati anch'essi all'occupazione della zona.

4.3.6 Zona 6

La zona 6 è composta da un insieme di locali differenti tra i quali un'aula dedicata al coro della chiesa, dei dormitori, aule gioco per bambini e altro. È esposta principalmente a Sud, anche con ampie superfici vetrate.

In questa zona, si è considerata la presenza delle persone solamente dalle 16 alle 18 per tutto l'anno.

La scheda di attivazione e spegnimento dell'impianto di riscaldamento è collegata all'occupazione della zona e lavora nel range di temperatura di 18-20 °C.

Il tasso di ventilazione e gli apporti interni considerati sono anche essi collegati alla presenza di persone nell'ambiente.

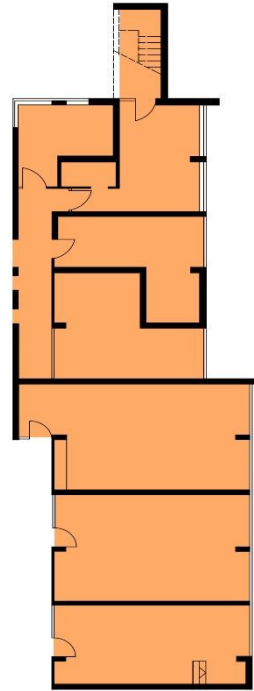


Figura 29 La zona 6.

4.3.7 Zona 7

La zona 7 è composta da dormitori e un'area comune. È esposta principalmente a sud, verso dove ha anche molta superficie vetrata. Verso ovest è contro terra e ha una piccola superficie rivolta anche a nord.

La scheda delle attività considerata per questi ambienti è uguale a quella della zona 4.

Non avendo abbastanza informazioni si sono previste sempre presenti 2 persone.

Gli apporti interni vengono disattivati durante gli orari notturni anche in presenza di persone.

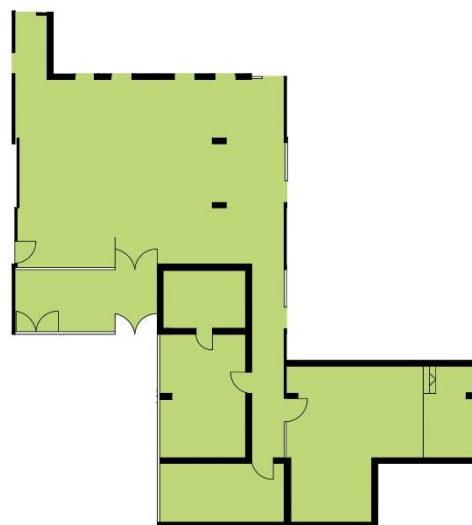


Figura 30 La zona 7.

4.3.8 Zona 8

La zona 8 è composta dalle scale a chiocciola che permettono l'accesso diretto nella chiesa dal piano terra e dal livello inferiore del terreno a ovest della struttura. Questa zona non influenza i calcoli, ma per completezza è stata aggiunta.

Per questa zona non si è considerato nessun tipo di riscaldamento, non si sono considerate persone e non si è considerato un tasso di ventilazione specifico. Si considera solamente un tasso di infiltrazione di 0.2 vol/h dovuto alla struttura.

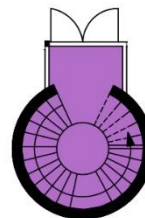


Figura 31 La zona 8.

4.4 Trnbuild e semplificazione delle superfici curve.

In TrnBuild si è costruito il modello dell'edificio considerando la geometria e l'esposizione reale. Si è considerato un impianto di potenza infinita che permette il raggiungimento delle temperature imposte momento per momento.

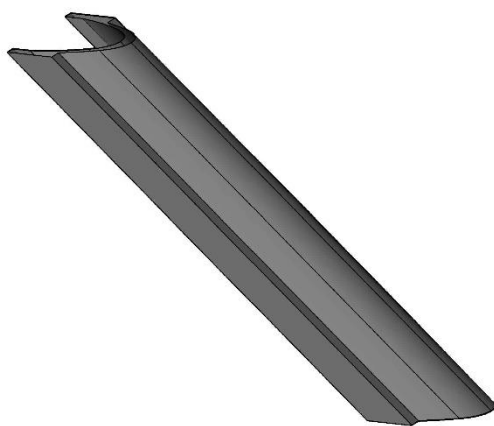


Figura 32 Forma reale dei gusci semicilindrici.

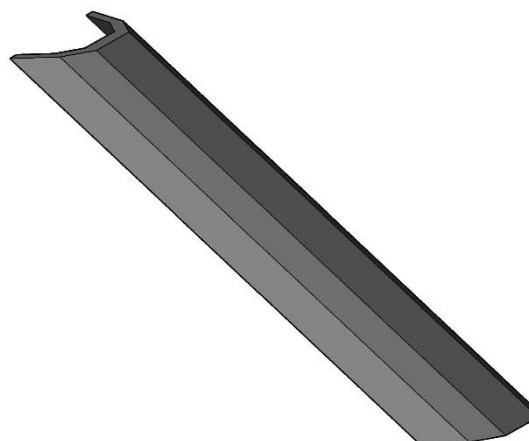


Figura 33 Modello semplificato considerato in Trnsys dei gusci semicilindrici.

Vista la struttura particolare della chiesa, costituita da gusci semicilindrici, la si è semplificata. Trnsys non permette l'inserimento di superfici curve ma il problema è stato risolto considerando il tetto inclinato con una struttura equivalente composta da più parti piane e che abbia una superficie e

stratigrafia equivalente a quelle reali. In particolare, si è diviso il guscio semicilindrico in 6 parti piane e uguali, con un angolo tra queste superfici di 30°. Un guscio semicilindrico quindi è stato definito con 6 superfici e 5 orientazioni (2 superfici hanno la stessa orientazione). La semplificazione considerata può essere vista nella figura 33.

Lo stesso è stato fatto anche per le scale a chiocciola che sono però state divise in sole 8 parti in quanto non era necessario nessun grado di dettaglio.

4.5 Simulation Studio

In Simulation Studio si sono utilizzate le types necessarie per le simulazioni e impostati i parametri di simulazione. Le types principalmente usate sono quelle relative al caricamento del modello in TrnBuild, delle scheduling, dei controlli, delle equazioni usate per i controlli climatici e per la stampa degli output.

Per tutti i modelli studiati, si è impostato un tempo di simulazione di 2 anni con cadenza oraria. Si è effettuato questa scelta per eliminare ogni tipo di inerzia dell'edificio dovuta ai valori di partenza usati dal software.

5 Lo stato di fatto

Il modello è stato costruito considerando i componenti reali dell'edificio e il piano delle attività descritto nei capitoli precedenti. I calcoli dei fabbisogni energetici sono stati fatti in termini di fabbisogno energetico netto e finale poiché non si hanno informazioni sufficienti riguardanti il sistema di generazione dell'energia termica.

Questo modello è stato successivamente usato come punto di partenza per gli altri modelli studiati adattandolo ai casi studio in particolare.

La simulazione è stata fatta per 2 anni e per i calcoli svolti si sono usati solamente i dati del secondo anno. Questo è stato fatto per evitare di avere interferenze dovute ai valori di partenza della simulazione.

5.1 Risultati del modello e confronto con i dati reali dell'intero edificio

Per verificare l'attendibilità della simulazione si è usato come riferimento il valore dell'energia termica estratta dalla rete di teleriscaldamento. Questo dato è stato fornito in fase iniziale assieme ai disegni e alla descrizione dell'edificio. Il valore dell'energia finale reale è quindi di: **332019 kWh/anno**.

Dalla simulazione di questo modello si ha un fabbisogno netto di 261373 kWh/anno. Nella tabella 8, si può vedere come è distribuito il fabbisogno tra i due piani. Si nota quindi come il piano superiore (comprendente la chiesa e gli spazi adibiti ad essa) sia responsabile di meno del 10% del fabbisogno di energia netta di tutto il fabbricato. Questo suggerisce quindi che un intervento di riqualificazione energetica mirata solo al miglioramento dell'involucro del piano superiore, porterà a dei benefici limitati.

	kWh/anno	Termini relativi
Q_{sens} zona 1	22523	8.43%
Q_{sens} zona 2	2219	0.83%
Q_{sens} zona 3	0	0.00%
Q_{sens} piano superiore	24742	9.26%
Q_{sens} piano inferiore	242446	90.74%
Q_{sensi} totale	267188	

Tabella 8 Fabbisogni termici netti dello stato di fatto.

Considerando i vari sottosistemi dell'impianto di riscaldamento si può ricondurre questo fabbisogno di energia netta al fabbisogno di energia finale. I valori dei rendimenti sono stati calcolati nel capitolo 3, diversi tra il piano terra e il piano superiore e applicati zona per zona. Nella tabella 9 si hanno i valori del fabbisogno di energia finale divisa per piano.

Il risultato del fabbisogno di energia finale ottenuto dalla simulazione di questo modello è di **334804 kWh/anno** che si discosta dal valore reale di solo **+1%**. Si assume quindi questo modello come modello di riferimento per quelli studiati di seguito. Un errore dell'1% è ritenuto un ottimo risultato in quanto non si hanno informazioni dettagliate sull'uso dell'edificio e software di questo genere sono conosciuti per errori fino ai 10/15% in quanto eseguono una simulazione dinamica e non prevedono comportamenti umani non previsti.

	kWh/anno	Termini relativi
Fabbisogno zona 1	27411	8.19%
Fabbisogno zona 2	2701	0.81%
Fabbisogno zona 3	0	0.00%
Fabbisogno piano superiore	30112	8.99%
Fabbisogno zone restanti	304692	91.01%
Fabbisogno totale	334804	

Tabella 9 Fabbisogno di energia finale dello stato di fatto.

Dalla tabella 9 si vede come la distribuzione del fabbisogno di energia finale è simile a quello dell'energia netta anche se si hanno sistemi di emissione diversi. Questo perché il fabbisogno della zona 1 è molto limitato rispetto all'intero edificio anche se è composto dal 50% del volume totale.

Una prima analisi che si è svolta è quella dello scomporre le voci di perdita dividendole per tipologia: perdite dovute all'infiltrazione, quelle dovute alla ventilazione e quelle dovute alla trasmissione. Si vede come considerando l'intero edificio, le perdite dovute alla trasmissione sono preponderanti (89%)

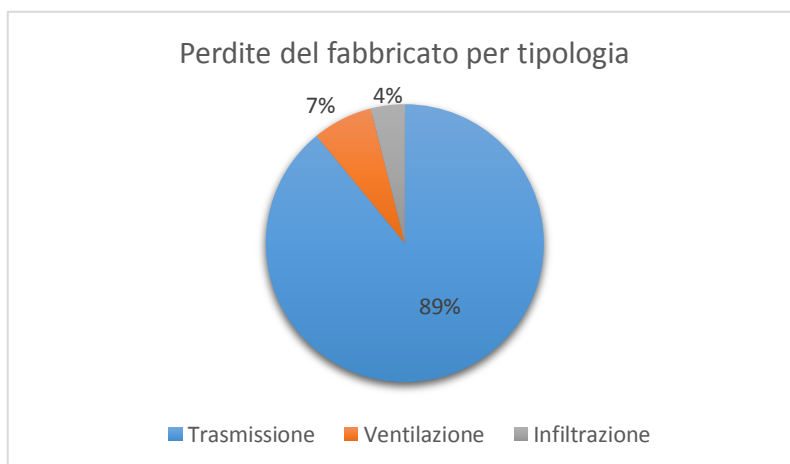


Figura 34 Voci di perdita dello stato di fatto.

rispetto a quelli del ricambio dell'aria. Questo suggerisce che in fase di riqualificazione è logico intervenire inizialmente sull'involucro esterno piuttosto che sulla gestione della ventilazione.

Nelle tabelle 10 e 11 sono riportati i fabbisogni di energia dell'edificio zona per zona. Da queste tabelle si vede come la zona 1 assieme alla zona 2 sono responsabili del 9% del fabbisogno totale mentre il piano sottostante si divide il fabbisogno in modo abbastanza uniforme tra le zone di cui è composto. Per arrivare ad un buon risultato, per quanto riguarda la riqualificazione energetica, è quindi suggerito intervenire su queste zone piuttosto che solamente sulla chiesa, ma questo va oltre lo scopo dello studio fatto in quanto lo scopo finale della tesi svolta è quello di studiare diversi sistemi di emissione per la sola chiesa. Vengono comunque segnalati queste particolarità in modo da intervenire nel miglior modo possibile su tutto l'edificio piuttosto che su una singola parte.

Nella figura 35 si vede invece come è distribuito il fabbisogno di energia netta per mese. I mesi più critici sono gennaio e febbraio in concomitanza con le temperature più critiche. Nei mesi di aprile e ottobre, il fabbisogno dell'intero edificio rimane comunque significativo e come si vedrà successivamente, ha un andamento diverso rispetto al fabbisogno della sola chiesa.

	Fabbisogno [kWh/anno]	Termini relativi
Zona 1 (Sala)	22007	8%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	2172	1%
Zona 3 (Ingresso)	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	62981	24%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	46662	18%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	64005	24%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	63546	24%
Zona 8 (Scale)	0	0%

Tabella 10 Fabbisogni di energia netta per zona.

	Fabbisogno [kWh/anno]	Termini relativi
Zona 1 (Sala)	26784	8%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	2643	1%
Zona 3 (Ingresso)	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	79151	24%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	58643	18%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	80437	25%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	79861	24%
Zona 8 (Scale)	0	0%

Tabella 11 Fabbisogni di energia finale per zona.

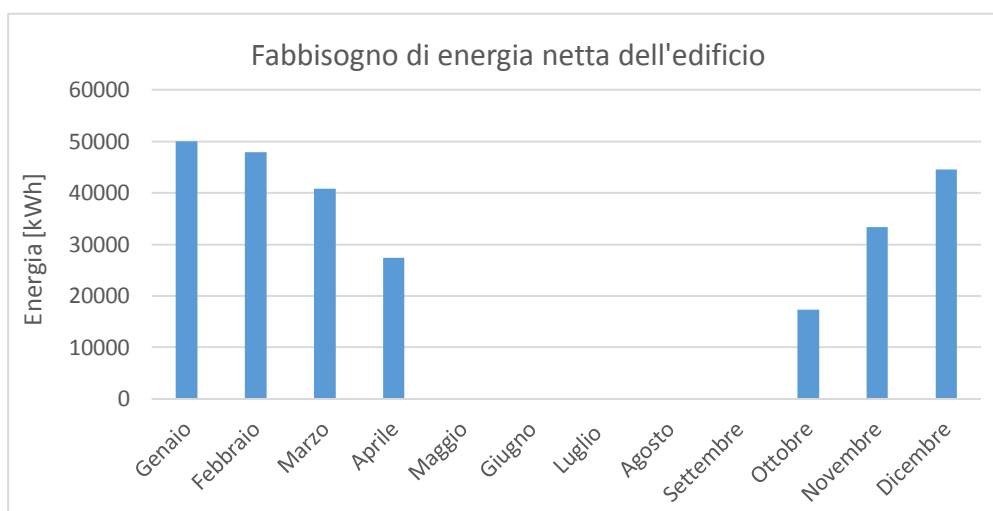


Figura 35 Distribuzione mensile del fabbisogno di energia netta.

5.2 Analisi del piano superiore

Dopo l'analisi dell'intero edificio si è svolta un'analisi simile per quanto riguarda il piano superiore costituito dalla chiesa e dagli spazi adibiti ad essa. Durante l'analisi dei dati si sono osservati comportamenti diversi tra la zona 1 e il resto dell'edificio. Queste differenze sono date sostanzialmente dalla differente geometria e dell'uso diverso degli spazi. Questa zona è composta da un grande volume e da un'ampia superficie irraggiata. Questo fa sì che gli apporti solari siano sfruttati molto diminuendo sostanzialmente il fabbisogno di energia netta. C'è da evidenziare anche il fatto che la chiesa opera a temperature sempre minori rispetto a quelle del piano inferiore e questo comporta uno scambio di energia termica tra le zone dovute alle differenze di temperatura che è minimo durante l'uso della chiesa e massimo durante le prime ore del giorno.

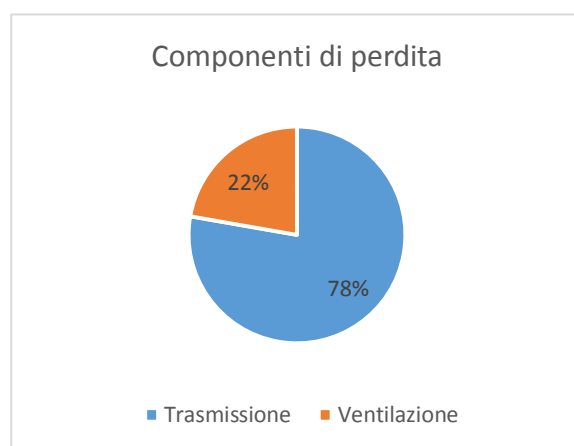


Figura 36 Componenti di perdita della sola chiesa.

A causa del grande volume (ma anche delle temperature inferiori) la distribuzione delle perdite di energia sono diverse rispetto a quelle dell'intero edificio. Nella chiesa si ha infatti un'incidenza diversa delle perdite dovute alla ventilazione e infiltrazione. Come si vede nella figura 36, per quanto riguarda il piano superiore, le perdite per trasmissione si aggirano a circa il 78% delle perdite totali. Queste rimangono comunque una voce preponderante confermando la necessità di un intervento sull'involucro esterno al fine di diminuire il fabbisogno di energia.

Vista la netta differenza delle componenti di perdita tra i due piani si è analizzato più in dettaglio le perdite del piano terra e si è dedotto che le perdite al terreno, con il loro 34%, sono la parte preponderante delle perdite per trasmissione. Si segnala quindi la necessità di intervento sul pavimento a terra che però non è stato considerato.

Anche la distribuzione del fabbisogno energetico mensile è in parte diverso rispetto a quello dell'intero edificio.

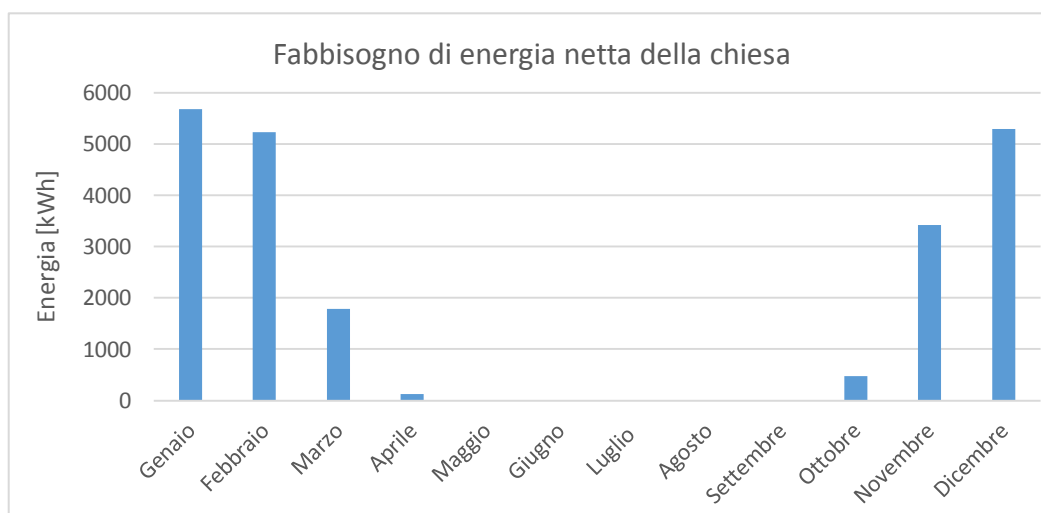


Figura 37 Distribuzione mensile del fabbisogno di energia netta della sola chiesa.

I mesi più critici rimangono comunque quelli invernali mentre quelli primaverili in termini relativi sono molto meno impattanti con aprile che è quasi trascurabile. In generale però, l'autunno ha un peso maggiore rispetto alla primavera mentre considerando l'intero edificio questi due mesi assumono ruoli inversi.

La temperatura viene raggiunta come da scheduling e la chiesa ha una richiesta di potenza di riscaldamento massima si 27 kW.

6 Interventi di miglioramento dell'involucro

Dopo lo studio dello stato di fatto si è studiato il modello dell'edificio prevedendo 3 diversi interventi sull'involucro edilizio. Gli interventi studiati non sono stati scelti analizzando le criticità descritte nel capitolo precedente ma sono stati imposti dal committente. Una volta impostati questi 3 modelli si è studiato il comportamento della chiesa con i diversi sistemi di emissione a pannelli radianti.

Per la modellizzazione di questi 3 modelli si è usato il modello dello stato di fatto come riferimento e si sono modificate le stratigrafie delle componenti su cui si è intervenuto. Non si è invece modificato il tasso di infiltrazione dovuto al miglioramento dell'involucro.

6.1 Caso di miglioramento dell'involucro 1

Il caso di miglioramento dell'involucro edilizio 1 prevede un intervento poco impattante sull'edificio. Si vanno a isolare alcune componenti opache e a sostituire gli elementi trasparenti della facciata ovest e della chiesa. In particolare, gli interventi possono sintetizzarsi in 4 tipologie:

- 1- Isolamento interno del muro della facciata ovest con 16 cm per il raggiungimento di una trasmittanza $U_{\text{parete}}=0.21 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- 2- Sostituzione degli elementi trasparenti della facciata ovest con finestre composte da vetro di trasmittanza $U_{\text{vetro}}=1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ e telaio di $U_{\text{telaio}}=1.6 \text{ W/m}^2\text{K}$. Il g-value del vetro è pari a 0.4.
- 3- Sostituzione degli elementi trasparenti della facciata est con elementi uguali a quelli del punto 2.
- 4- Sostituzione degli elementi trasparenti del tetto inclinato con elementi uguali a quelli del punto 2.
- 5- Isolamento esterno del tetto piano calpestabile con 25 cm di isolamento totale per il raggiungimento di una trasmittanza $U_{\text{tetto,piano}}=0.14 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- 6- Isolamento interno del tetto inclinato con 6 cm per il raggiungimento di una trasmittanza $U_{\text{tetto,inclinato}}=0.39 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Un intervento di questo genere, mirato essenzialmente alla sola chiesa, può portare a dei benefici limitati. In ottica di un intervento sugli impianti della sola zona 1 e 2 può però abbassare le potenze richieste. Da un lato, questo intervento permetterà di ridurre le perdite per trasmissione verso l'esterno

grazie all'involucro migliorato ma dall'altro lato invece diminuiranno gli apporti solari sfruttabili a causa dell'abbassamento del g-value.

Nella tabella 12, sottostante a questo paragrafo, sono elencati gli interventi con i relativi costi unitari e totali. Questi costi sono stati forniti dal committente.

Il costo totale dell'intervento è di circa 335 000 €. Le voci più pesanti dell'intervento sono quelle dovute alla sostituzione della facciata vetrata e all'isolamento del tetto inclinato corrispondente da solo a circa 1/3 del costo totale. La sostituzione degli elementi trasparenti è responsabile del 50% dei costi.

	Unità	Unità di misura	Costo p.u. [€/p.u.]	Costo totale [€]
Isolamento del muro verticale esterno	26	m ²	120	3163
Sostituzione finestre della facciata ovest	100	m ²	900	90000
Sostituzione finestre a est	54	m ²	1100	59400
Sostituzioni lucernai tetto inclinato	28	m ²	600	16800
Isolamento del tetto piano calpestabile	300	m ²	180	54000
Isolamento del tetto inclinato	860	m ²	130	111758
			Totale	335122 €

Tabella 12 Costi degli interventi del miglioramento dell'involucro 1.

6.1.1 Simulazione

Per la simulazione di questo modello non si è modificato nulla per quanto riguarda il SimulationStudio.

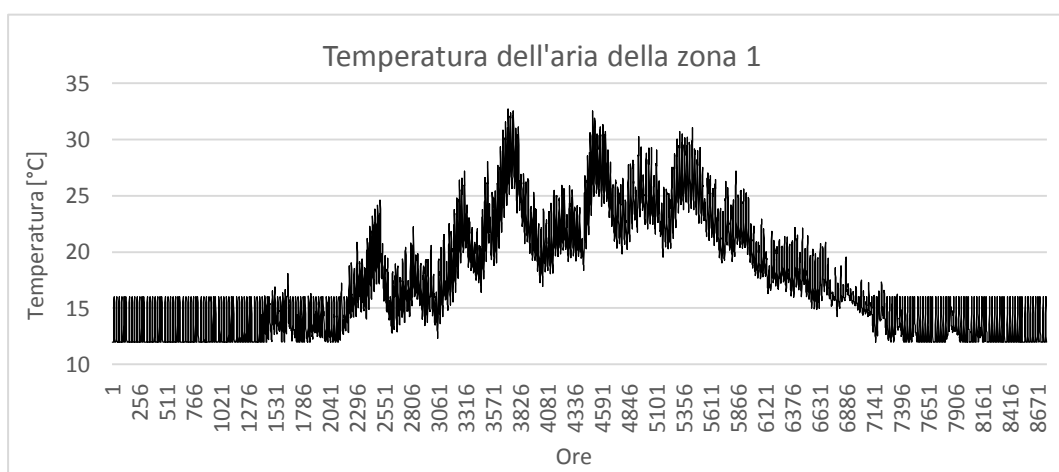


Figura 38 Andamento della temperatura della chiesa durante l'anno simulato.

L'intervento di isolamento 1 ha portato, come previsto, a dei benefici limitati in termini di energia finale sull'intero edificio. Dopo questo intervento, la richiesta di potenza massima è di 20kW rispetto

ai 27kW dello stato di fatto, corrispondente a circa il -26%. Un abbassamento della potenza termica massima richiesta si traduce in costi minori dovuti agli impianti e taglie minori.

Nella figura 38 si vede l'andamento della temperatura della zona 1 nel 2° anno di simulazione e nelle figure sotto si può vedere come effettivamente varia la temperatura all'interno della chiesa durante un giorno invernale preso casualmente e come varia durante tutta una settimana di gennaio. Poiché questo modello non comprende un impianto di emissione reale, si vede come il gradino venga rispettato e l'andamento della temperatura nel tempo sia uguale a quello dello stato di fatto in quanto si sta considerando un riscaldamento a potenza infinita.

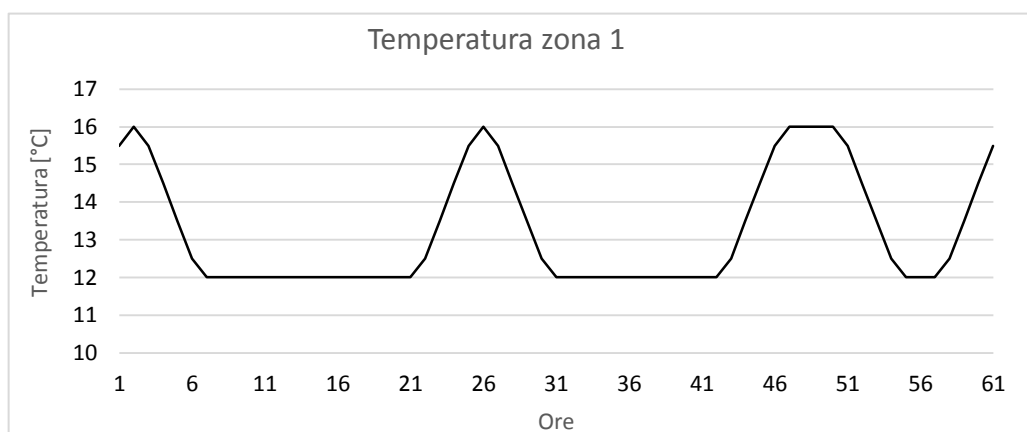


Figura 39 Andamento della temperatura dettagliato.

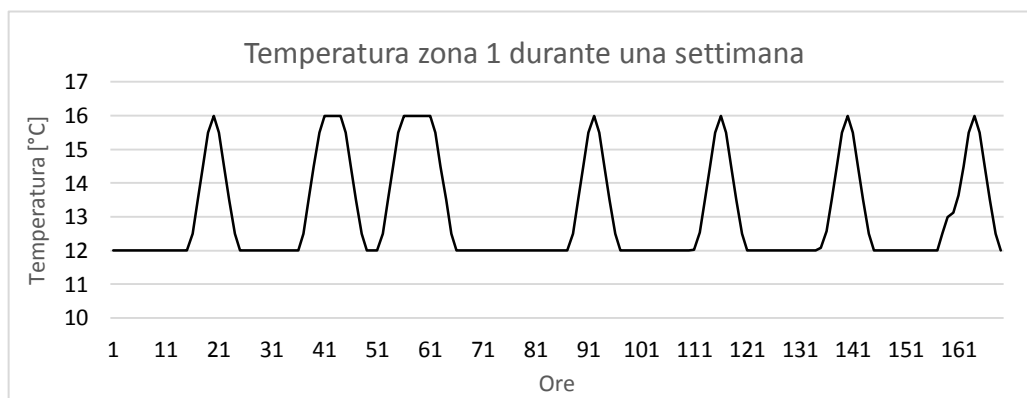


Figura 40 Temperatura della chiesa durante una settimana di simulazione.

Si sono analizzate anche le voci di perdita e, guardando l'edificio nel suo insieme, le perdite dovute alla trasmissione e alla ventilazione sono rimaste pressoché costanti in termini relativi con un abbassamento a 88% rispetto ai 89% delle perdite per trasmissione rispetto allo stato di fatto. Questo perché buona parte delle perdite per trasmissione sono da attribuire alle perdite al terreno. Il miglioramento dell'involucro del piano superiore quindi non ha grande influenza sulle dispersioni totali dell'edificio. In termini assoluti, si riescono a limitare le perdite per trasmissione di circa 50000 kWh.

Nelle tabelle sottostanti sono illustrati i fabbisogni di energia netta e finale zona per zona pre e post retrofit proposto.

Energia utile	Pre [kWh]	Post [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	22523	12610	9912	44%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	2219	738	1481	67%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	62962	61885	1077	2%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	51942	45147	6794	13%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	64020	61061	2958	5%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	63522	61002	2520	4%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Totale	267188	242444	24744	9%

Tabella 13 Fabbisogni di energia netta zona per zona.

Energia finale	Pre [kWh]	Post [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	27411	15347	12064	44%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	2701	898	1803	67%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	79128	77774	1354	2%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	65277	56738	8539	13%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	80456	76738	3718	5%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	79831	76664	3167	4%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Totale	334804	304160	30644	9%

Tabella 14 Fabbisogni di energia finale zona per zona.

Dalle tabelle si vede che l'intervento di isolamento 1 porta ad un risparmio di energia finale sull'intero edificio di circa il 9% corrispondente a 30640 kWh/anno. La zona 1 porta a un risparmio del 44% e la zona 2 a un risparmio di 67%. Assieme, queste due zone che compongono la chiesa, portano a un risparmio di circa 14000 kWh/anno corrispondente a un 46% di risparmio rispetto al piano superiore dello stato di fatto.

L'intervento di miglioramento dell'involucro 1, anche se riguardante solo il piano superiore (aggiungendo l'intervento sul tetto piano), porta a risparmi di energia anche al piano inferiore. La zona 4 non subisce nessun tipo di intervento ma ha una diminuzione di fabbisogno di energia del 2%. Questo è dovuto al fatto che c'è scambio di energia termica tra le due zone a causa della differenza di temperatura. Questo si nota molto meglio osservando la zona 5 che abbassa il proprio fabbisogno di ben 13%, anche se qui si è intervenuti sul muro esterno lato Ovest e sul tetto inclinato. Questa zona scambia però con la zona 1 tutta la superficie del suo soffitto.

6.2 Caso di miglioramento dell'involucro 2

Il caso di miglioramento dell'involucro 2 prevede un intervento più massiccio sull'edificio. Questo intervento parte da quello descritto precedentemente, ma si interviene con spessori di isolamento maggiori e sul muro esterno di tutta la chiesa. In particolare, gli interventi considerati sono:

- 1- Isolamento della parete esterna con 20 cm di isolante per il raggiungimento di una trasmittanza $U_{\text{parete}}=0.14 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- 2- Sostituzione degli infissi come descritto nel caso di isolamento 1.
- 3- Isolamento esterno del tetto piano calpestabile con 30 cm di isolamento totale con l'isolante usato nel caso 1.
- 4- Isolamento esterno del tetto piano non calpestabile con 30 cm di isolamento totale per il raggiungimento di una trasmittanza $U_{\text{tetto,piano}}=0.11 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- 5- Isolamento interno del tetto inclinato con 16 cm per il raggiungimento di una trasmittanza $U_{\text{tetto,inclinato}}=0.21 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Questo caso può considerarsi simile, in termini di tipologia di interventi, a quello descritto precedentemente ma in generale, l'intervento tocca tutto l'edificio. Da questo modello ci si aspetta un risparmio di energia maggiore rispetto al caso 1 ma con costi maggiori. Dalla tabella dei costi si vede come alcuni interventi aumentino di poco il costo rispetto al potenziale beneficio a cui possono portare. Per esempio, l'aggiunta dell'isolamento interno sul muro perimetrale del caso 1 costa 120 €/m² e permette di raggiungere la trasmittanza di 0.21 W/m²K. Come si può vedere dalla tabella 15, nel caso 2 si prevede l'aggiunta di altri 4 cm di isolante a soli 10 €/m² in più ma si riesce a raggiungere una trasmittanza di 0.14 W/m²K.

	Unità	Unità di misura	Costo p.u. [€/p.u.]	Costo totale [€]
Isolamento del muro verticale esterno	548	m ²	130	71287
Sostituzione finestre della facciata ovest	100	m ²	900	90000
Sostituzione finestre a est	54	m ²	1100	59400
Sostituzioni lucernai tetto inclinato	28	m ²	600	16800
Isolamento del tetto piano calpestabile	300	m ²	190	57000
Isolamento del tetto piano non calpestabile	120	m ²	150	18000
Isolamento del tetto inclinato	860	m ²	170	146146
			Totale	458632

Tabella 15 Costi del miglioramento dell'involucro 2.

Il costo totale dell'intervento, come si può vedere dalla tabella 15 è di 458632 € e l'intervento più costoso, rimane anche in questo caso quello dovuto al miglioramento del tetto inclinato della chiesa. Al secondo posto rimane comunque l'intervento della sostituzione degli infissi della facciata ovest. Se si

considerassero insieme le voci riguardanti la sostituzione degli infissi, questi compongono il 35% del costo di intervento.

6.2.1 Simulazione

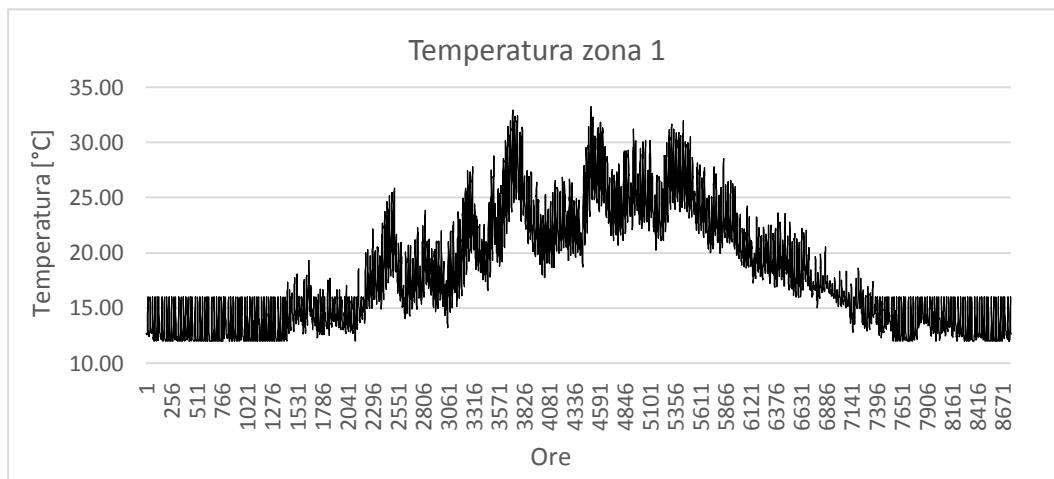


Figura 41 Andamento della temperatura della zona 1.

Dalla figura 41 si vede l'andamento della temperatura nella zona 1 per tutta la durata del 2° anno di simulazione. L'intervento di isolamento 2 ha portato, come ci si aspettava, un beneficio in termini di energia finale sull'intero edificio migliore rispetto a quello dell'intervento 1. Dalla simulazione si ha un abbassamento della potenza massima di riscaldamento richiesta dalla sola chiesa a 17 kW rispetto ai 27kW dello stato di fatto e ai 20 kW rispetto al caso di isolamento 1, corrispondente a circa il -38% sullo stato di fatto.

Le figure 42 e 43 mostrano gli andamenti della temperatura della chiesa più in dettaglio. Esse mostrano la temperatura all'interno della chiesa nello stesso giorno e stessa settimana usati nelle figure riguardanti

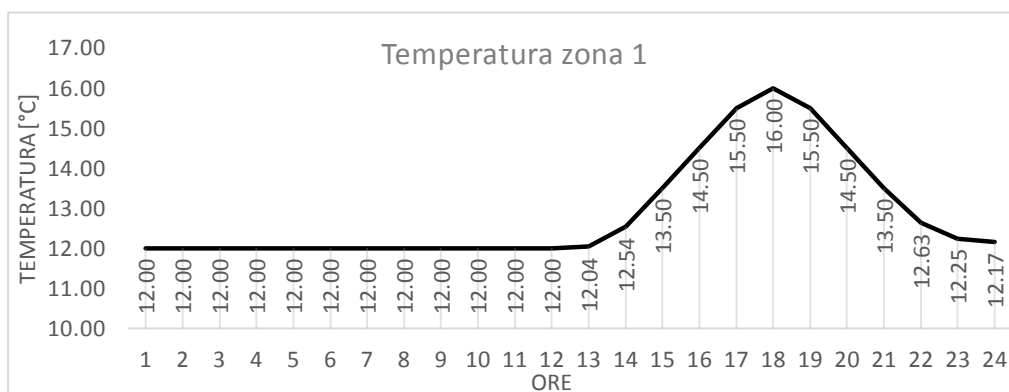


Figura 42 Andamento della temperatura durante un giorno.

il caso di isolamento 1. Anche qui, poiché il modello non comprende un impianto di emissione reale, si vede che il gradino termico è rispettato come imposto da scheduling.

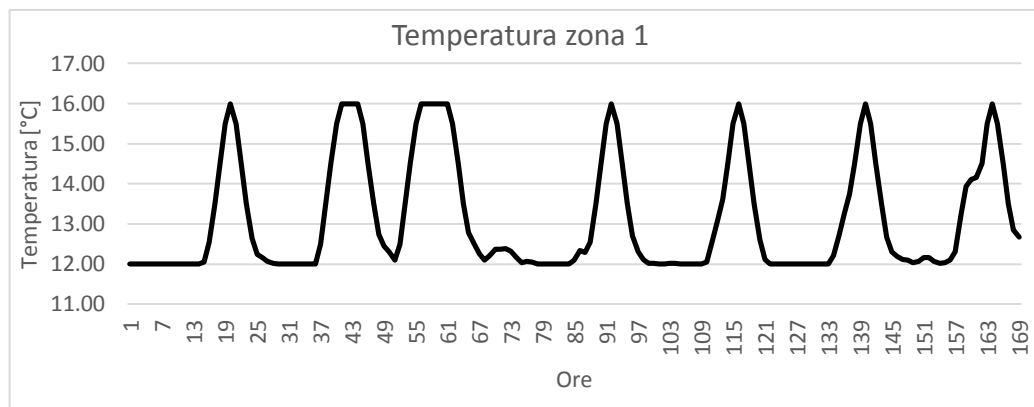


Figura 43 Andamento della temperatura settimanale.

Anche in questo caso si sono analizzate le componenti di perdita. Grazie agli interventi sugli elementi opachi, si è riusciti a diminuire, anche se di poco, il contributo delle perdite dovute alla trasmissione. Nel caso di isolamento 2 infatti si riescono a diminuire le perdite per trasmissione di 158871 kWh/anno. In totale però, le perdite per trasmissione sono dominanti rispetto a quelle dovute alla ventilazione e all'infiltrazione con il loro 83% sul totale. Una diminuzione ulteriore delle perdite dovute alla trasmissione sarà possibile solamente con un ulteriore intervento sul pavimento a terra.

Voce di perdita	kWh	
Trasmissione	255970	83%
Ventilazione	52763	17%

Tabella 16 Voci di perdita.

Nelle tabelle 17 e 18 si riportano i fabbisogni di energia netta e di energia finale delle singole zone prima e dopo il caso di miglioramento dell'involucro 2.

Energia utile	Pre [kWh]	Post [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	22523	7047	15476	69%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	2219	459	1760	79%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	62962	45164	17799	28%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	51942	34591	17350	33%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	64020	37039	26980	42%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	63522	46386	17136	27%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Totale	267188	170687	96501	36%

Tabella 17 Fabbisogni di energia netta differenziata per zona.

Dalla tabella 17, si vede come nel caso di intervento 2 ci sia un risparmio sull'intero edificio del 36% corrispondenti a 96500 kWh/anno di energia termica netta. Nel caso in esame si ha un ulteriore risparmio del fabbisogno nelle due zone di cui è composta la chiesa per un totale di circa 17000 kWh all'anno risparmiati. Anche il resto dell'edificio dà un'ottima risposta con risparmi fino a 42% sulle singole zone.

Energia finale	Pre [kWh]	Post [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	27411	8577	18835	69%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	2701	559	2142	79%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	79128	56759	22368	28%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	65277	43473	21805	33%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	80456	46549	33907	42%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	79831	58295	21536	27%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Totale	334804	214212	120593	36%

Tabella 18 Fabbisogno di energia finale differenziato per zone.

Questo intervento è da considerarsi di livello superiore se si guarda l'intero edificio, mentre se si guarda solamente la chiesa, porta a benefici limitati visto il basso fabbisogno. Anche se, in termini relativi, l'intervento di isolamento 2 porta a un risparmio ulteriore dell'84% rispetto al caso di isolamento 1 (nella sola chiesa), in termini assoluti questa differenza di risparmio di fabbisogno di energia finale è di circa 9500 kWh/anno corrispondenti a circa 950€/anno. Questo risparmio aggiuntivo in termini economici viene però a costare più di 35000 € in più.

6.3 Caso di miglioramento dell'involucro 3

Il caso di miglioramento dell'involucro 3 prevede gli stessi interventi del caso di isolamento 2 ma con l'aggiunta dell'intervento di sostituzione di tutti gli elementi trasparenti dell'edificio. Questo intervento non può quindi dare notevoli benefici in termini di fabbisogni energetici, ma il costo di intervento aumenta molto.

Nella tabella 19 sono riportati i singoli interventi e i loro costi per un totale di 586432€.

	Unità	unità di misura	Costo p.u. [€/p.u.]	Costo totale [€]
Isolamento del muro verticale esterno	548	m ²	130	71287
Sostituzione finestre della facciata ovest	100	m ²	900	90000
Sostituzione finestre a est	54	m ²	1100	59400
Sostituzioni lucernai tetto inclinato	28	m ²	600	16800
Sostituzione di tutti gli elementi trasparenti	213	m ²	600	127800
Isolamento del tetto piano calpestabile	300	m ²	190	57000
Isolamento del tetto piano non calpestabile	120	m ²	150	18000
Isolamento del tetto inclinato	860	m ²	170	146146
			Totale	586432

Tabella 19 Voci di investimento per il miglioramento dell'involucro 3.

6.3.1 Simulazione

Dalla simulazione di questo modello si hanno gli stessi andamenti delle temperature del caso 2 e dall'analisi dei dati si vede come questo ulteriore intervento, costato più di 120 000 €, non abbia portato quasi a nessun beneficio aggiuntivo.

Per semplicità si riporta la sola tabella relativa al fabbisogno di energia finale divisa zona per zona e confrontata con il fabbisogno dello stato di fatto.

Energia finale	Pre [kWh]	Post [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	27411	7737	19674	72%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	2701	495	2206	82%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	79128	57615	21512	27%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	65277	38645	26632	41%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	80456	48387	32069	40%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	79831	58646	21185	27%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Totale	334804	211526	123278	37%

Tabella 20 Fabbisogno di energia finale differenziato per zona.

Dalla tabella si vede come rispetto al caso di isolamento 2, il risparmio di energia finale sia aumentato di meno dell'1% (circa 3000kWh). Per questo motivo questa ipotesi di intervento viene scartata e non più analizzata nei prossimi capitoli che prevedranno i sistemi a impianto radiante.

6.4 Analisi dei costi e dei benefici

I due casi di intervento sul miglioramento dell'involucro sono molto costosi e non portano a grandi benefici.

Per questa breve analisi di tipo economico si è assunto un prezzo dell'energia termica estratta dalla rete di teleriscaldamento di 10 centesimi di euro al kWh. Si suppone una durata di vita utile e garantita delle componenti introdotte in questi casi di studio di 40 anni e un tasso di interesse compreso di quello monetario e di inflazione dello 3.5%. Non si è considerato il valore residuo delle componenti dopo i 40 anni e non si è considerato nessuna specie di costi evitati.

Il caso di isolamento 1 porta a un risparmio in termini economici di 3371 €/anno. Il motivo di un risparmio economico così basso è dovuto al fatto che l'intervento è mirato alla sola chiesa. Si migliorano molto le componenti dell'involucro con enormi sforzi economici su una zona che detiene circa il 10% del fabbisogno totale. Per questo intervento si sono calcolati 3 indici economici senza la previsione di nessun tipo di incentivazione e, successivamente, si sono ricalcolati applicando i criteri di incentivazione in uso in Italia per questa tipologia di interventi.

Costo intervento	335122	€
Risparmio annuo in bolletta	3371	€/anno
Risparmio annuo di energia	30644	kWh/anno

Tabella 21 Risparmi annui.

PB	99.42	anni
VAN	-263136	€
CEC	0.51	€/kWh

Tabella 22 Indici economici calcolati senza nessun tipo di incentivazione.

PB	62.10	anni
VAN	-137354	€
CEC	0.32	€/kWh

Tabella 23 Indici economici considerando gli incentivi italiani.

Come si vede dalle tabelle 22 e 23, questo intervento presenta dei costi dell'energia risparmiata (CEC) molto maggiori rispetto a quello con cui la si compra. Il tempo di payback dell'intervento è di quasi 100 anni e dopo 40 anni il VAN continua a essere molto negativo.

Il caso di isolamento 2, a differenza di quello di tipo 1, risulta essere molto più interessante. Costa circa 100 k€ in più ma porta a un risparmio complessivo del fabbisogno dell'involucro del 36% corrispondente a 12059 €/anno. Anche in questo caso si sono calcolati i 3 indici economici senza previsione di incentivazione e poi ricalcolati prevedendo un sistema di incentivazione uguale a quello italiano. In questo caso l'incentivo massimo è di 157882€.

Costo intervento	458632	€
Risparmio annuo	12059	€/anno
Risparmio annuo	120593	kWh/anno

Tabella 24 Risparmi annui.

PB	38.03	anni
VAN	-201106	€
CEC	0.18	€/kWh

Tabella 25 Indici economici calcolati senza sistemi di incentivazione.

PB	24.94	anni
VAN	-43224	€
CEC	0.12	€/kWh

Tabella 26 Indici economici calcolati considerando il sistema di incentivazione italiano.

Dalle tabelle 25 e 26 si può vedere come questo secondo intervento sia effettivamente più conveniente. Il tempo di payback è di 38 anni ed è in linea con i tempi di ritorno degli interventi su edifici di quell'età considerando anche che l'edificio di partenza è già isolato e ha dei buoni infissi. Senza nessun tipo di incentivazione, il costo dell'energia risparmiata è di 18 c€/kWh che è l'80% in più del prezzo dell'energia termica estratta dalla rete di teleriscaldamento. Nel caso incentivato, il tempo di ritorno scende a 25 anni ma il valore attuale netto (VAN) continua a essere negativo.

Dall'analisi si possono trarre due conclusioni. In primo luogo, è necessario un intervento di isolamento del pavimento a terra in quanto migliorando tutto il resto dell'involucro si è ottenuto un risparmio di solo 36%. In secondo luogo, si consiglia di ristudiare questi due interventi senza però la sostituzione degli elementi trasparenti. Dalla tabella dei costi infatti, questi interventi in totale compongono metà spesa garantendo un beneficio limitato dal momento che la trasmittanza delle finestre esistenti è già abbastanza bassa. Nel caso però che le componenti vetrate siano da sostituire perché fortemente danneggiate o perché hanno bisogno di un importante intervento di manutenzione, i loro costi andrebbero considerati come costi evitati favorendo nel totale gli indici economici esposti e rendendo più interessante la proposta di intervento.

Anche se dall'analisi economica questi due interventi appaiono poco convenienti, i casi verranno analizzati assieme a diversi sistemi di emissione basati su pannelli radianti a bassa temperatura.

7 Impianto radiante a pavimento

In questo capitolo si vogliono simulare e studiare i modelli dell'edificio in esame prevedendo un impianto radiante a pavimento a bassa temperatura. I risultati ottenuti in questi modelli verranno confrontati con quelli dell'impianto radiante a parete in un capitolo a parte.

L'installazione dell'impianto radiante a pavimento è prevista dopo il miglioramento dell'edificio. Si sono considerati quindi due tipologie di pannelli radianti per ogni caso, e due tipologie di controllo differenti. In totale quindi si hanno 8 modelli; 4 per ogni tipo di intervento sull'involucro.

Dal momento che il comfort interno degli edifici è dato sia dalla temperatura media radiante che dalla temperatura effettiva dell'aria, per confrontare questi due differenti tipi di impianto di emissione si è adoperata la temperatura operante che tiene conto di entrambi i fattori. Con un impianto di tipo radiante, la temperatura media radiante è più importante rispetto a quella dell'aria, poiché a parità di comfort, la temperatura effettiva dell'aria può essere inferiore a quella solitamente imposta negli edifici. Per il calcolo della temperatura radiante si sono calcolati quindi i fattori di vista delle diverse superfici semplificando la struttura.

Le due tipologie di impianto verranno quindi confrontate a parità di condizioni di comfort cercando di raggiungere sempre una temperatura operante di 16°C quando la chiesa è usata.

7.1 Calcolo dei fattori di vista e della temperatura operante

Vista la complessa geometria della chiesa, per il calcolo dei fattori di vista si sono usate delle semplificazioni. Si è usato il software Trisnfe, che fornisce i fattori di vista di un edificio di sezione trasversale e longitudinale rettangolare inserendo le quote lungo gli assi x,y e z. Per l'inserimento delle quote quindi, si è dovuto ricondurre la geometria reale a una geometria rettangolare fittizia. Per far ciò si è ricorso alle definizioni degli angoli solidi.

Considerando due superfici dA_1 e dA_2 a distanza r , comunque orientate nello spazio e definendo φ_1 e φ_2 come ampiezza degli angoli formati tra la congiungente dei due elementi e le rispettive normali, si può definire l'angolo solido come:

$$d\omega_{1-2} = \frac{dA_2 \cdot \cos \varphi_2}{r^2}$$

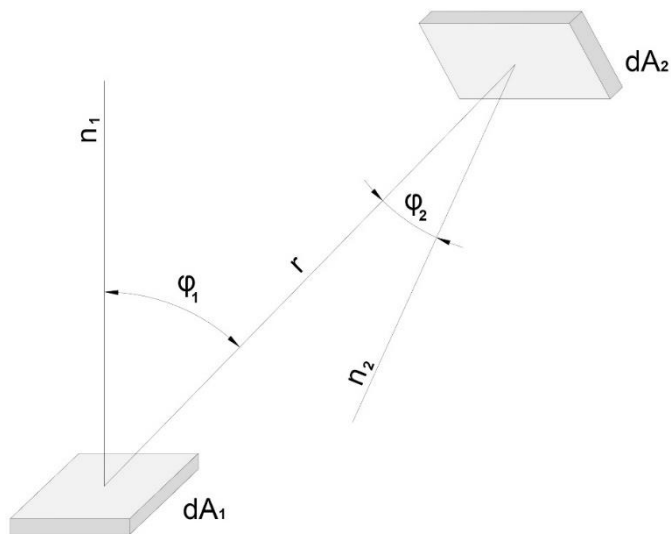


Figura 44 Riferimenti per il calcolo dell'angolo solido.

Questo angolo solido rappresenta l'ampiezza dell'angolo secondo il quale l'elemento 2 è visto dall'elemento 1.

Una prima semplificazione è stata fatta passando dalla geometria reale a quella di tipo 1 come si vede nella figura 45. Nella geometria 2, si è considerato una superficie piana che fa da soffitto a partire da un'altezza del 66 % rispetto a quella totale. Da questa geometria, si sono calcolati tutti gli angoli solidi delle superfici rispetto a un punto nel baricentro della superficie del pavimento e ad un'altezza di 1.1 metri che rappresenta il punto dove si vogliono stabilire le condizioni operative.

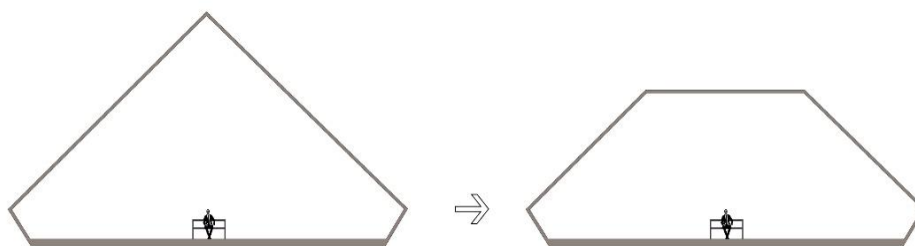


Figura 45 Semplificazione dell'edificio 1.

Una volta calcolati tutti gli angoli solidi, si è passati alla geometria di tipo 3 imponendo la stessa lunghezza del pavimento, la stessa altezza dei muri perimetrali e gli stessi angoli solidi (figura 46). Da

questi vincoli, si sono calcolate delle superfici fittizie che rispetto al punto di controllo hanno lo stesso angolo solido rispetto al caso reale.



Figura 46 Semplificazione dell'edificio 2.

Inserendo questa nuova geometria come parametro di input al software, si sono ottenuti i fattori di vista delle superfici opache e vetrate rispetto al punto voluto. Questi fattori di vista non sono però del tutto esatti in quanto il software riceve solo 3 dimensioni, quindi il soffitto considerato dal programma, è rappresentato da una superficie maggiore rispetto a quello calcolato nei casi di semplificazione. Si sono comunque presi per buoni questi risultati per una prima analisi indicativa.

Sup	Parete Est	Parete Nord	Parete Ovest	Parete Sud	Soffitto	Pavimento
F.d.V	0.055	0.048	0.057	0.048	0.299	0.456

Tabella 27 Fattori di vista delle superfici della chiesa.

La temperatura operante rappresenta la temperatura di un ambiente fittizio che è termicamente uniforme e che scambierebbe con un individuo la stessa quantità di calore per irraggiamento e convezione scambiata nell'ambiente reale. È la combinazione della temperatura dell'aria con quella media radiante delle superfici e quindi, tiene conto delle differenti temperature degli oggetti irraggianti sull'individuo. La temperatura operante è definita come:

$$T_{op} = \frac{(h_{conv} \cdot T_a) + (h_{irr} \cdot T_{mr})}{h_{comb}}$$

$$h_{comb} = h_{conv} + h_{irr}$$

- h_{conv} è il coefficiente di scambio per convezione
- h_{irr} è il coefficiente di scambio per irraggiamento
- T è la temperatura

Per ambienti termicamente moderati, la temperatura operativa può essere approssimata dalla media aritmetica tra la temperatura dell'aria e quella media radiante.

$$T_{op} \cong \frac{T_a + T_{mr}}{2}$$

La temperatura media radiante è calcolata secondo la:

$$T_{mr,p} = \sqrt[4]{\sum_1^n F_{p-i} \cdot (t_i + 273)^4}$$

- F_{p-i} è il fattore di vista tra p e la superficie i-esima
- t_i è la temperatura della superficie i-esima

7.2 Caso 1

In questa parte del capitolo viene analizzato il caso di installazione dell'impianto radiante a pavimento dopo l'intervento di miglioramento dell'involucro 1. In particolare, si studierà la dinamica dell'edificio dal punto di vista energetico prevedendo un impianto radiante a terra annegato nel massetto isolato e non. Poiché il funzionamento dell'impianto a temperatura costante porterà a temperature troppo elevate quando le temperature esterne saranno relativamente alte, si prevedrà in seconda analisi anche un controllo di tipo climatico.

La presenza dell'impianto radiante a terra è stata considerata nel modello di Trnsys attraverso gli active layers. Un active layer è caratterizzato dalla geometria e la disposizione delle tubazioni nel massetto. Il software inoltre ha dei limiti sugli spessori degli strati sopra e sotto l'active layer.

Una volta scelto il tipo di pannelli si è dimensionato l'intero impianto in modo da non avere lunghezze eccessive delle tubazioni di ogni circuito, non avere perdite di carico significative e rientrando nei valori di velocità dell'acqua nei tubi consoni con questa tipologia di impianto.

L'active layer è stato definito con la geometria della tabella 28.

Passo tra tubi	0.2 m
Diametro esterno	22 mm
Spessore dei tubi	2 mm
Conduttività termica	0.22 W/mK

Tabella 28 Definizione dell'active layer dell'impianto radiante a pavimento.

Il dimensionamento è stato fatto caso per caso ed esposto nei sotto-capitoli relativi ad ognuno di essi. Su Trnsys si sono inseriti il numero di circuiti, la temperatura di alimentazione dell'acqua nei tubi e la portata. Per quanto riguarda la portata, si considera un funzionamento a portata costante e controllata in funzione della temperatura dell'ambiente. In particolare, si è inserito su SimulationStudio una type che confronta la temperatura dell'ambiente con quella di progetto ora per ora, e che accende o spegne la portata in TrnsysBuild. Nella figura 47, si può vedere lo schema costruito su SimulationStudio. Anche in questo caso, così come nello stato di fatto si continua a considerare un gradino di temperatura massimo di 1°C/h.

Per il dimensionamento dell'impianto radiante a pavimento si sono considerati 415 m² di superficie e per i modelli relativi a questo caso una potenza termica massima richiesta di 20kW.

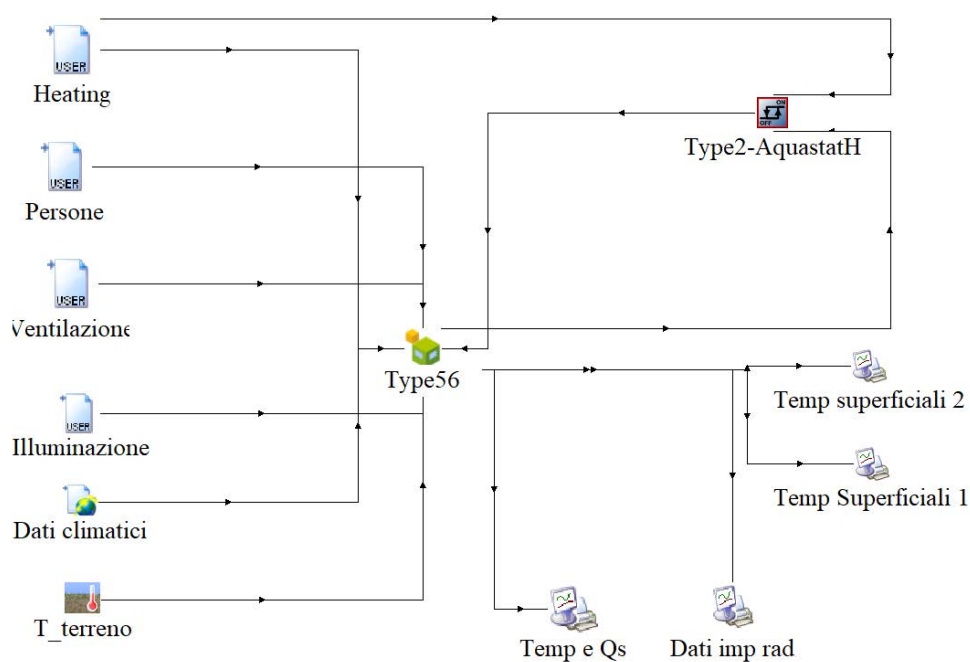


Figura 47 Schema a blocchi in SimulationStudio.

7.2.1 Caso 1.1

In questo caso studio si suppone un impianto radiante a pavimento con tubi annegati nel massetto non isolato dopo l'intervento di miglioramento dell'involucro 1. La geometria del solaio è esposta nella figura 48 e consiste nell'aggiunta di uno strato di massetto di 12 cm con i tubi annegati dentro.

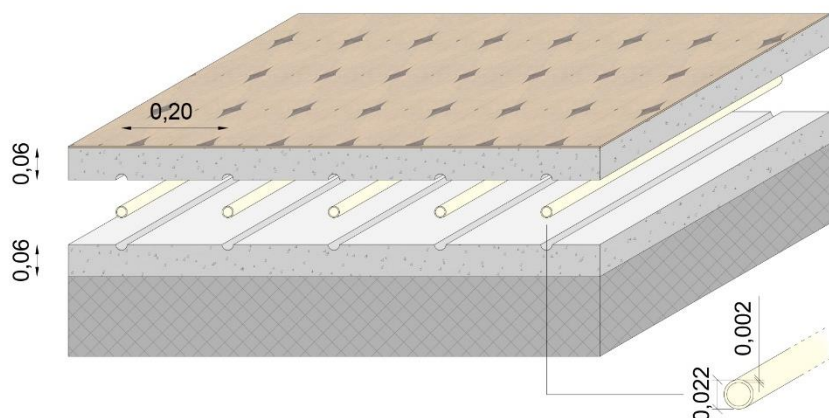


Figura 48 Schema dell'impianto radiante a pavimento considerato.

In TrnsysBuild si è dovuto modificare la stratigrafia del solaio, correggendo anche il coefficiente di scambio convettivo della superficie in $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ verso l'alto e in $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ verso il basso.

Il dimensionamento dell'impianto è stato fatto dividendo la superficie totale del pavimento in 4 parti relative alle superficie scambianti tra la zona 1 e le zone 4,5,6 e 7. Nella tabella sotto, si riportano il numero di circuiti considerati per ogni superficie chiamandola con il nome della zona verso cui la zona 1 è adiacente, la portata totale, la lunghezza dei singoli circuiti, la velocità dell'acqua nei tubi e le perdite di carico.

	Superficie [m ²]	Numero di circuiti	Portata [l/h]	Lunghezza [m]	Velocità [m/s]	Perdite di carico [mca]
Zona 4	124	11	2335	56	0.23	0.38
Zona 5	101	10	1904	51	0.21	0.28
Zona 6	65	6	1227	54	0.22	0.34
Zona 7	125	12	2340	52	0.21	0.30

Tabella 29 Dati dell'impianto radiante nel caso 1.1

I criteri adottati per la progettazione consistono nel prevedere una lunghezza massima dei tubi di 100 m a circuito, una velocità compresa tra 0.5 e 0.2 m/s e delle perdite di carico massime di 1.5 mca.

Dalla tabella si ha una portata totale di 7806 l/h e delle perdite di carico massime di 0.38 mca. La temperatura di alimentazione dell'acqua nei tubi si considera costante e pari a 35°C.

7.2.1.1 Simulazione del caso 1.1 a temperatura di alimentazione costante

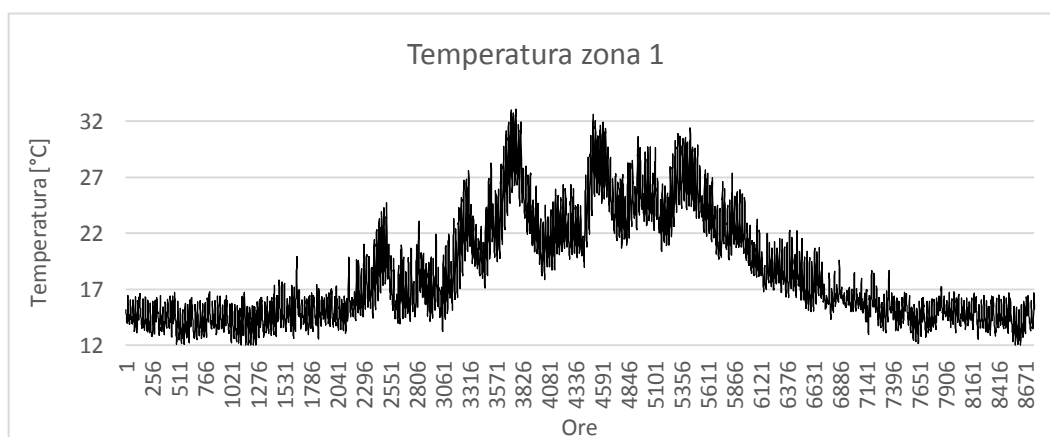


Figura 49 Andamento della temperatura dell'aria nella zona 1.

La figura 49 mostra l'andamento della temperatura dell'aria della chiesa durante il secondo anno di simulazione. Già da una prima analisi visiva si vede come la temperatura dell'aria raggiunga effettivamente la temperatura di set-back di 12°C in rare occasioni corrispondenti alle temperature esterne minime. La scelta di alimentare l'acqua dell'impianto radiante a 35°C è stata quindi fatta per garantire la temperatura operativa di 16° anche nel giorno più freddo dell'anno. Nella figura 50 è rappresentata la temperatura dell'aria durante una giornata invernale casuale e si può vedere come la sua fase di raffreddamento sia molto smorzata. Questo andamento si ha perché anche se l'acqua non circola più, questa si raffredda cedendo effettivamente energia termica agli ambienti. Il fenomeno è ancora più evidente osservando la temperatura dell'aria per un'intera settimana. Il gradino di temperatura imposto è comunque sempre rispettato.

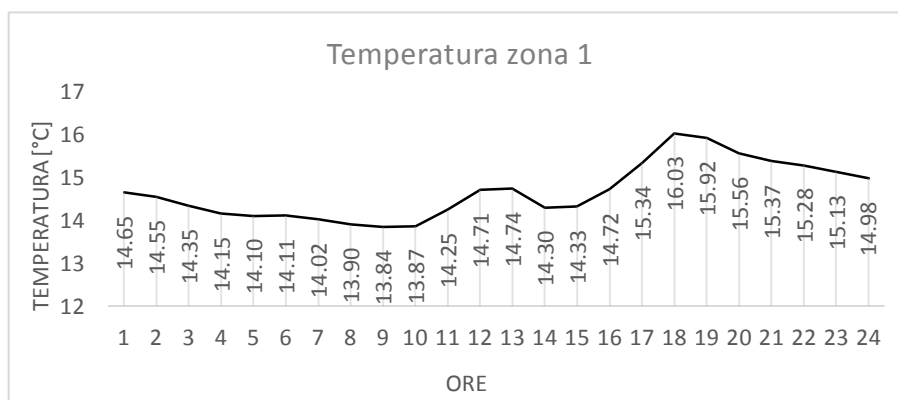


Figura 50 Andamento della temperatura dell'aria in una giornata.

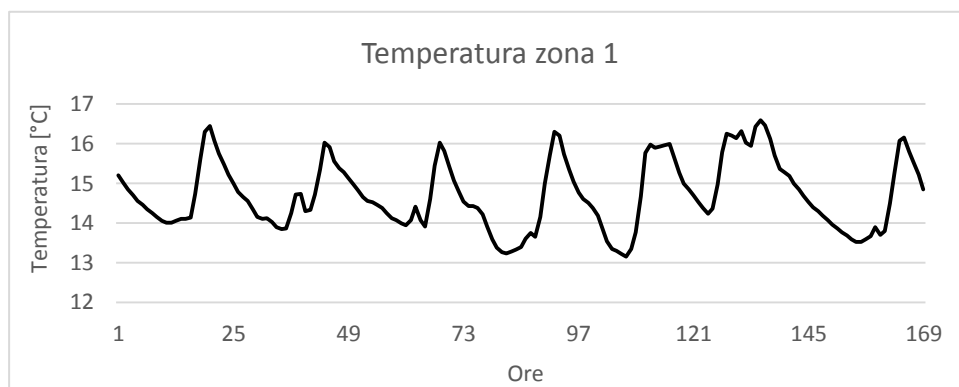


Figura 51 Andamento della temperatura dell'aria durante una settimana.

Nelle figure 52 e 53, sono invece rappresentate le temperature operative rispettivamente nella prima e nella seconda parte della stagione di riscaldamento. Le temperature operative minime negli orari dell'uso della chiesa si posizionano sempre intorno ai 16 °C voluti, ma spesso superano questo livello a causa della temperatura costante di alimentazione. Sarà quindi utile introdurre un controllo di tipo climatico della temperatura dell'acqua in funzione alla temperatura esterna. È da osservare però il fatto che dopo lo spegnimento dell'impianto durante il sabato, passano poche ore all'accensione dell'impianto per la domenica successiva e spesso si hanno le domeniche con temperature operative molto alte. Il contrario succede invece tra la domenica e il lunedì, dove l'impianto rimane spento per più ore del solito, con conseguenti basse temperature operative il lunedì.

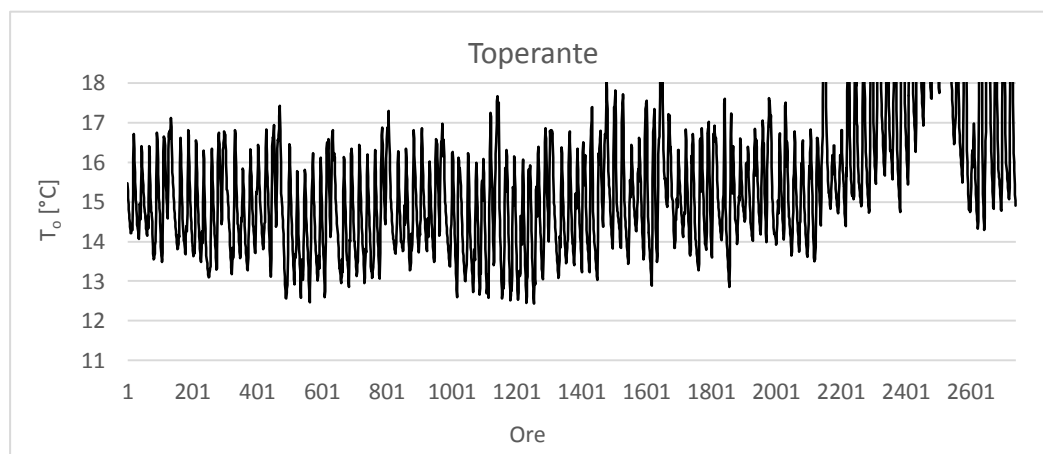


Figura 52 Andamento delle temperature operative durante la prima parte della stagione di riscaldamento.

L'installazione dell'impianto radiante a terra modifica quindi molto la dinamica termica dell'edificio. Si può dire in generale che la chiesa rimanga per tutto il tempo a una temperatura maggiore e che raggiunga le temperature minime imposte in rare occasioni. Le variazioni di temperatura sono molto contenute durante le giornate e questo può favorire ad un ottimo mantenimento dell'edificio stesso.

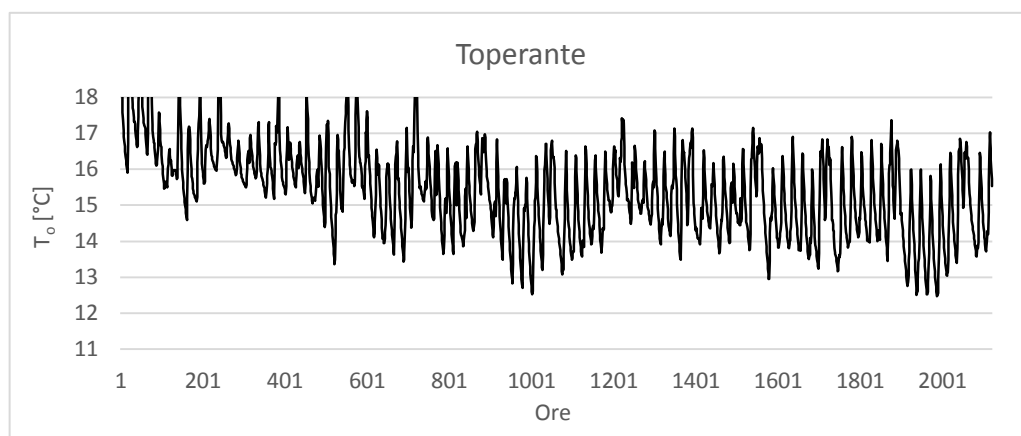


Figura 53 Andamento delle temperature operative durante la seconda parte della stagione di riscaldamento.

Dal punto di vista energetico, i risultati della simulazione sono illustrati nella tabella 30 che indica il valore dell'energia termica da fornire all'acqua durante tutto l'anno di simulazione e il numero di ore di funzionamento all'anno. Il valore dell'energia da fornire all'acqua circolante nei tubi fornita da Trnsys è da considerarsi comprendente del rendimento di regolazione e del rendimento di emissione. Per questo motivo, nelle tabelle relative ai fabbisogni delle singole zone non verrà rappresentato il fabbisogno di energia netta in quanto non significativo. Applicando il rendimento di distribuzione fino ai pannelli radianti, si avrà il fabbisogno dell'energia finale da fornire all'acqua di riscaldamento.

Q _{acqua}	33308	kWh/anno
Ore di funz.	567	Ore/anno

Tabella 30 Parametri di funzionamento dell'impianto.

Nella tabella 31 si vedono invece i fabbisogni di energia termica finale zona per zona considerando un impianto convettivo e quello radiante nelle stesse condizioni dell'involucro.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	15347	0	15347	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	898	587	311	35%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	77774	71550	6224	8%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	56738	51269	5469	10%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	76738	74213	2525	3%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	76664	70069	6595	9%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	35816	-35816	0%
Totale	304160	303505	655	0%

Tabella 31 Fabbisogni energetici finali differenziati per zona.

L'installazione dell'impianto radiante a pavimento non ha portato a risparmi di energia termica finale notevole se considerato l'intero edificio. Il vantaggio principale però di questa tipologia di impianto è data dalle sue basse temperature di funzionamento, e quindi dalla facile e conveniente integrazione con sistemi di generazione ad alta efficienza come caldaie a condensazione, pompe di calore o altri sistemi alternativi.

In totale il fabbisogno dell'acqua di riscaldamento è maggiore rispetto a quello della sola zona 1 e responsabile del 14% del fabbisogno totale dell'edificio. Questo perché la zona 1 riceve sempre energia dalle zone sottostanti che sono in ogni momento a temperatura maggiore rispetto a quelle della chiesa. Questo intervento, infatti comporta un risparmio dell'8 % nella zona 4, del 10% nella zona 5, del 3% nella zona 6 (che ha una piccola superficie di scambio) e del 9% nella zona 7. Questi risparmi non sono da attribuire soltanto all'inefficienza dell'impianto radiante che ha una resa anche verso il basso, ma anche allo scambio per trasmissione che si evita tra le zone del piano inferiore e la zona 1 dovuto alla differenza di temperatura.

7.2.1.2 Simulazione del caso 1.1 con controllo climatico

Visto l'andamento della temperatura operante nel caso di alimentazione dell'impianto a temperatura costante, si è deciso di prevedere un controllo climatico sulla temperatura di mandata. In questo modo si può evitare di salire troppo in temperatura negli ambienti con conseguente risparmio di energia termica.

Il controllo climatico è stato considerato in SimulationStudio attraverso una equazione che collega la temperatura esterna a quella dell'acqua di alimentazione. Si è scelto una relazione di tipo lineare che garantisca una temperatura di alimentazione di 35°C, come nel caso precedente, nel giorno più freddo e che abbia una pendenza di -0.15.

Da questa seconda simulazione si ha un andamento giornaliero e settimanale simile a quello del caso precedente, ma il grafico dell'andamento della temperatura operante è migliore. Questo tipo di controllo però non è sufficiente, infatti il problema delle temperature, come si può vedere nelle figure 54 e 55, durante le domeniche e i lunedì esposto precedentemente è molto più marcato. Dalle due figure si vede come il controllo non sia ottimale e che qualche volta la temperatura operante non raggiunga effettivamente i 16°C. Si accetta comunque questo controllo senza modificare la pendenza della curva di controllo in quanto i fattori di vista non sono del tutto reali e quindi si ritiene accettabile un'oscillazione di temperatura di 0.5°C intorno a quella di progetto.

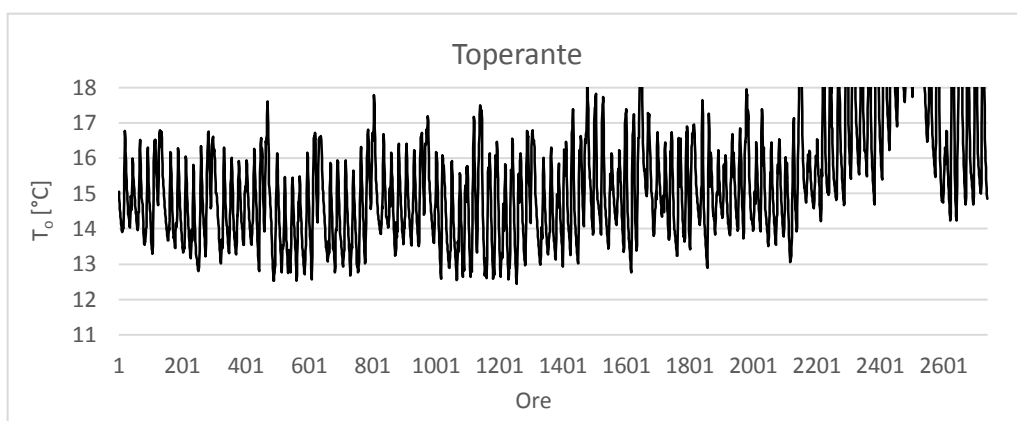


Figura 54 Andamento delle temperature operative durante la prima parte della stagione di riscaldamento.

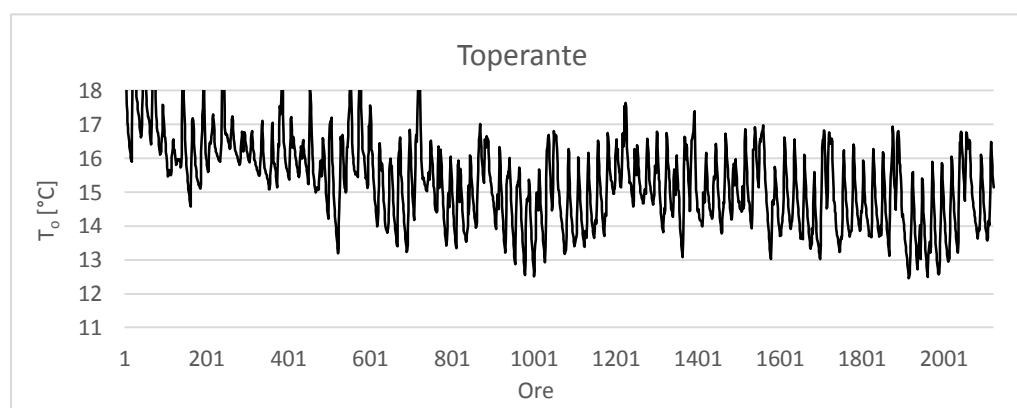


Figura 55 Andamento delle temperature operative durante la prima parte della stagione di riscaldamento.

Il fabbisogno di energia termica dell'acqua di alimentazione e il numero di ore di funzionamento dell'impianto sono indicati nella tabella 32. Si vede come il fabbisogno sia inferiore ma il numero di ore di funzionamento sia superiore.

Q_{acqua}	32471	kWh
Ore di funz.	619	ore

Tabella 32 Parametri di funzionamento dell'impianto.

Nella tabella 33 sono riportati i valori dei fabbisogni zona per zona considerando il caso di isolamento 1 con impianto convettivo e radiante con controllo climatico. In questa tabella si sono elencati i risparmi energetici zona per zona considerando i 2 modelli.

	Isolato [kWh]	Post [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	15347	0	15347	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	898	608	290	32%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	77774	71685	6088	8%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	56738	51388	5351	9%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	76738	74294	2445	3%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	76664	70216	6448	8%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	34916	-34916	0%
Totale	304160	303106	1054	0%

Tabella 33 Fabbisogni di energia finale differenziata per zona.

Anche in questo caso valgono le considerazioni espone per il modello senza controllo climatico. L'aggiunta di questo tipo di controllo ha portato a un risparmio energetico ulteriore su tutto l'edificio ma in generale è diminuito per le zone del piano terra.

In totale quindi il controllo climatico comporta un risparmio di 400 kWh/anno termici ma un aumento di funzionamento dell'impianto di 52 ore/anno con relative spese di pompaggio dell'acqua.

7.2.2 Caso 1.2

In questo caso studio si suppone un impianto radiante a pavimento con tubi annegati nel massetto isolato verso il basso dopo l'intervento di miglioramento dell'involucro 1. La geometria del solaio è esposta nella figura 56 e consiste nell'aggiunta di uno strato di massetto di 12 cm con i tubi annegati dentro e uno strato addizionale di isolamento verso il basso di 4 cm con una conducibilità termica di 0.035 W/mK. L'aggiunta di questo strato di isolamento dovrebbe limitare l'emissione dell'impianto verso il basso con rispettive diminuzioni di fabbisogno energetico lato acqua.

Il dimensionamento dell'impianto è stato fatto come nel caso precedente. L'aggiunta dello strato dell'isolamento aiuta a limitare l'emissione verso il basso il che permette un risparmio in termini di numero di circuiti e di portata dell'impianto ma aumentano le perdite di carico dei circuiti. Nella tabella sotto, si riportano il numero di circuiti considerati per ogni superficie chiamandola con il nome della zona verso cui è adiacente, la portata totale, la lunghezza dei singoli circuiti, la velocità dell'acqua nei tubi e le perdite di carico.

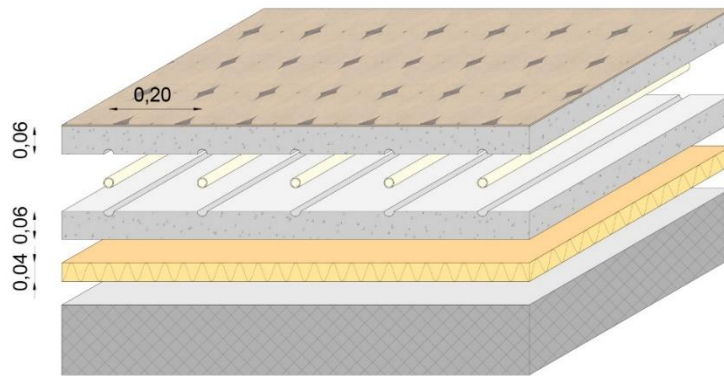


Figura 56 Configurazione dell'impianto radiante a pavimento 2.

	Superficie [m ²]	Numero di circuiti	Portata [l/h]	Lunghezza [m]	Velocità [m/s]	Perdite di carico [mca]
Zona 4	124	8	1589	77	0.22	0.46
Zona 5	101	7	1295	72	0.20	0.38
Zona 6	65	4	835	81	0.23	0.53
Zona 7	125	7	1592	89	0.25	0.67

Tabella 34 Dati dell'impianto radiante a pavimento 2.

Dalla tabella si ha una portata totale di 5311 l/h e delle perdite di carico massime di 0.67 mca. La temperatura di alimentazione dell'acqua nei tubi è costante e pari a 35°C.

7.2.2.1 Simulazione del caso 1.2 con temperatura di alimentazione costante

In questo caso, come in quello precedente si riesce a mantenere la temperatura dell'aria della zona 1 tra la temperatura di set-back e set-point senza particolari problemi. Come per il caso precedente, la temperatura di set-back si raggiunge in rari casi. La scelta di alimentare l'acqua dei tubi a 35°C, anche in questo caso serve per assicurare una temperatura operativa di 16°C anche nel giorno più freddo dell'anno. Nella figura 57 si ha l'andamento della temperatura dell'aria durante la stessa giornata esaminata nel caso precedente, e anche se simile, la fase di raffreddamento è più lenta. L'aggiunta dello strato di isolante sotto i tubi quindi, limita effettivamente le dispersioni verso il basso e, in fase di raffreddamento dell'acqua, questa cede molto di più alla zona 1 rispetto al caso 1.1. Il gradino di temperatura imposto rimane quindi ampiamente rispettato e non si hanno variazioni brusche di temperatura durante le giornate e in generale, la temperatura della chiesa rimane mediamente più alta durante tutto l'anno.

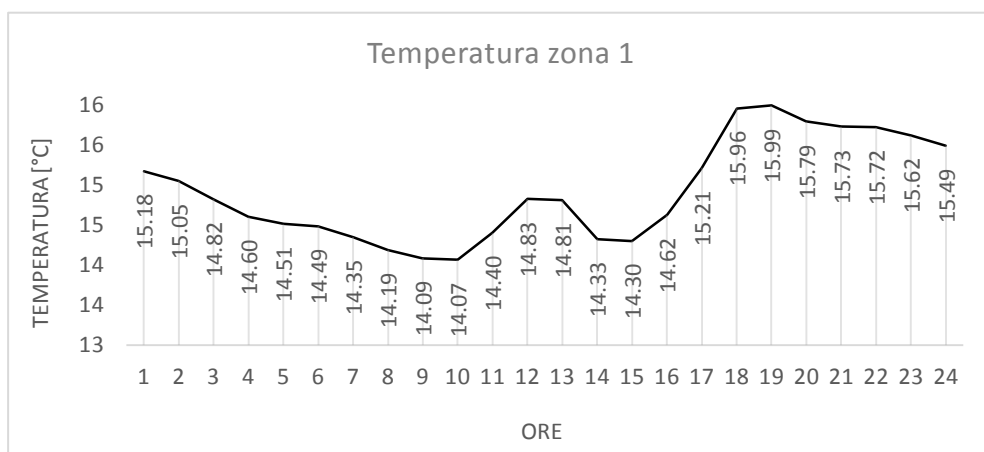


Figura 57 Andamento giornaliero della temperatura della zona 1.

Nelle figure 58 e 59 sono invece rappresentate le temperature operative rispettivamente nella prima parte della stagione di riscaldamento e nella seconda. Le temperature operative minime negli orari dell'uso della chiesa stanno sempre posizionate intorno ai 16 °C come voluto, ma spesso superano questo livello a causa della temperatura costante di alimentazione. È quindi utile introdurre un controllo di tipo climatico della temperatura dell'acqua in funzione alla temperatura esterna.

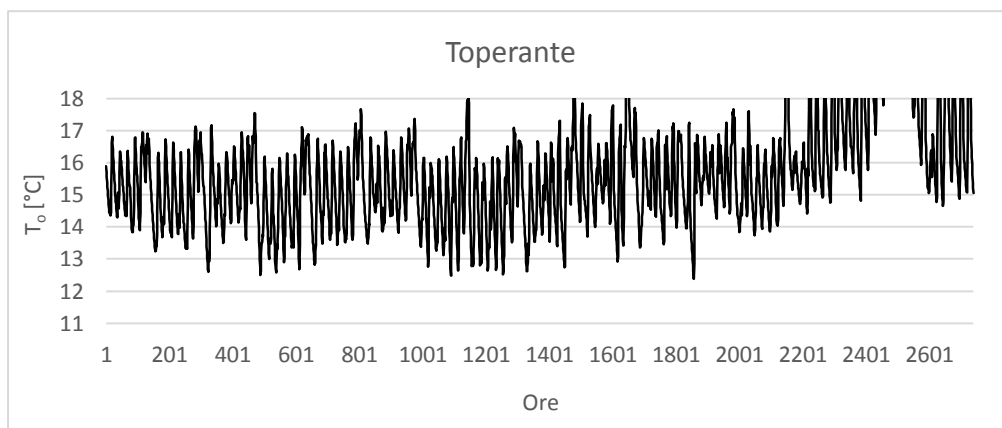


Figura 58 Andamento della temperatura operante nella prima parte della stagione di riscaldamento.

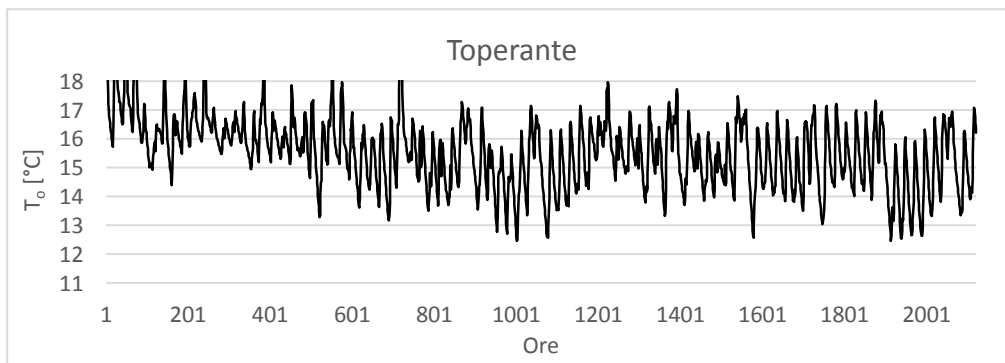


Figura 59 Andamento della temperatura operante nella seconda parte della stagione di riscaldamento.

Anche in questo caso, come nel caso precedente, si possono fare le stesse conclusioni per quanto riguarda le temperature della zona 1 anche se sono in parte superiori.

Nella tabella 35 vengono indicati il fabbisogno di energia termica da fornire all'acqua di riscaldamento e il numero delle ore di funzionamento dell'impianto. Per il fabbisogno di energia finale dell'acqua va applicato il rendimento di distribuzione dell'acqua tra il sistema di generazione e i pannelli radianti.

Q _{acqua}	29826	kWh/anno
Ore di funz.	553	Ore/anno

Tabella 35 Parametri prestazionali dell'impianto.

La tabella 36 rappresenta invece i fabbisogni di energia termica finale zona per zona considerando l'impianto convettivo e quello radiante.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	15347	0	15347	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	898	555	342	38%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	77774	72648	5126	7%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	56738	52702	4036	7%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	76738	74838	1900	2%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	76664	71071	5594	7%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	32071	-32071	0%
Totale	304160	303886	274	0%

Tabella 36 Fabbisogno di energia finale differenziato per zona.

L'installazione dell'impianto radiante a pavimento isolato non ha portato a particolari risparmi di energia termica finale nemmeno in questo caso. Questa tipologia di impianto porta addirittura ad un risparmio di energia finale totale inferiore rispetto a quello del caso 1.1. Rimangono però validi tutti i vantaggi già discussi in precedenza.

In totale il fabbisogno dell'acqua di riscaldamento è maggiore rispetto a quello della zona 1 e responsabile del 13% del fabbisogno totale e questo è dovuto alle motivazioni discusse precedentemente. A differenza del caso 1.1, limitando l'emissione verso il basso dell'impianto, si hanno meno risparmi nelle zone inferiori.

7.2.2.2 Simulazione del caso 1.2 con controllo climatico

Visto l'andamento della temperatura operante nel caso di alimentazione a temperatura costante, si è deciso di prevedere un controllo climatico per quanto riguarda la temperatura di mandata dell'acqua dei pannelli radianti.

Per il controllo si è scelto una relazione di tipo lineare che garantisca una temperatura di alimentazione di 35°C nel giorno più freddo e che abbia una pendenza di -0.15.

Dal punto di vista giornaliero, la dinamica della temperatura in generale è simile al caso 1.2 senza controllo climatico ma si riescono a controllare meglio le temperature operanti nei giorni più caldi. L'aggiunta del controllo climatico porta a temperature minori nella chiesa, ma a causa dell'inerzia di questa tipologia di impianto, il problema delle temperature alte durante le domeniche e basse durante i lunedì spiegato nel sotto capitolo relativo al caso 1.1 è più marcato. Anche in questo caso si prende per buono il risultato ottenuto.

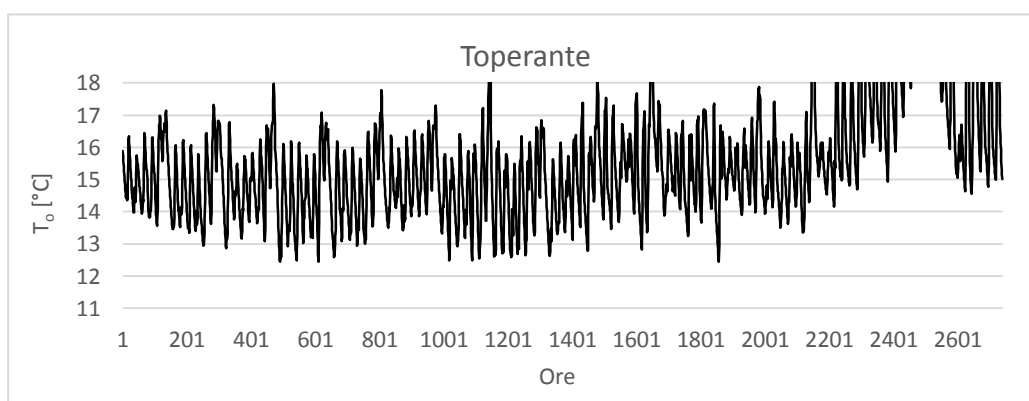


Figura 60 Andamento della temperatura operante nella prima parte della stagione di riscaldamento.

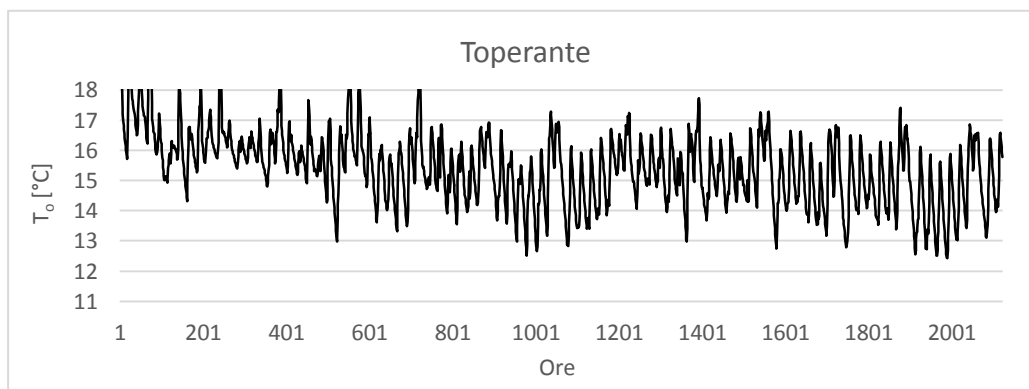


Figura 61 Andamento della temperatura operante nella seconda parte della stagione di riscaldamento.

Il fabbisogno di energia termica dell'acqua di alimentazione e il numero di ore di funzionamento dell'impianto sono indicati nella tabella 37.

Q _{acqua}	29114	kWh
Ore di funz.	605	ore

Tabella 37 Parametri prestazionali dell'impianto considerato.

Nella tabella 38 sono riportati i valori dei fabbisogni zona per zona considerando il caso di isolamento 1 con impianto convettivo e radiante con controllo climatico.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	15347	0	15347	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	898	585	313	35%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	77774	72708	5065	7%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	56738	52764	3974	7%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	76738	74874	1865	2%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	76664	71147	5517	7%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	31305	-31305	0%
Totale	304160	303384	776	0%

Tabella 38 Fabbisogni di energia finale divisi per zona.

L'aggiunta di questo tipo di controllo ha portato a un risparmio ulteriore di 502 kWh e il risparmio energetico delle singole zone è diminuito di poco.

In totale, l'impianto radiante a pavimento isolato e con controllo di tipo climatico porta maggiori risparmi di energia termica, ma deve funzionare per 52 ore in più.

7.2.3 Confronto delle soluzioni studiate nel caso di miglioramento dell'involucro 1

Nella tabella 39 sono riepilogati i risultati ottenuti dalle 4 simulazioni.

Caso di studio	Ore di funzionamento [h]	Q _{acqua} [kWh]	Q _{resto, edificio} [kWh]
1.1	567	35816	267689
1.1.c	619	34916	268191
1.2	553	32071	271815
1.2c	605	31305	272078

Tabella 39 Tabella riassuntiva con i fabbisogni dell'acqua di riscaldamento.

Tutte e 4 le soluzioni portano a risultati simili tra loro. Un'analisi più dettagliata verrà fatta nei capitoli finali. In questa sede si segnala che confrontati i due tipi di impianto radiante nella medesima condizione dell'involucro, l'impianto che prevede anche l'isolamento del solaio porta a un risparmio energetico totale dell'edificio di -381 kWh rispetto a quello senza isolamento. In particolare, si risparmia sul fabbisogno dell'acqua di 3745 kWh ma si aumenta il fabbisogno energetico del restante edificio di 4126 kWh. Considerando un prezzo dei pannelli superiore nel caso fossero isolati, la scelta più conveniente sarà la soluzione dei pannelli a tubi annegati nel massetto. Questo si confermerebbe ancor di più nel caso che l'energia termica per la parte restante dell'edificio avesse un costo maggiore rispetto a quello dell'energia termica per l'acqua dell'impianto.

Considerazioni simili si possono fare confrontando i due modelli che prevedono il controllo climatico, ma qui la differenza è di 278 kWh sempre in favore della soluzione senza isolamento del solaio.

7.3 Caso 2

Di seguito viene analizzato il caso di installazione dell'impianto radiante a pavimento dopo l'intervento di miglioramento dell'involucro 2. Le configurazioni di impianto studiate, sono uguali a quelle relative al caso 1. Con l'edificio molto più isolato, le temperature superficiali saranno superiori e quindi in seconda analisi si prevedrà anche un controllo di tipo climatico.

Passo tra tubi	0.2 m
Diametro esterno	22 mm
Spessore dei tubi	2 mm
Conduttività termica	0.22 W/mK

Tabella 40 Dati sull'impianto radiante a pavimento.

Il dimensionamento è stato fatto caso per caso ed esposto nei sotto-capitoli relativi ad ognuno di essi. Il controllo e la gestione sono uguali a quella del caso 1.

Per il dimensionamento dell'impianto radiante a pavimento si sono considerati 415 m² di superficie e per i modelli relativi a questo caso una potenza termica massima richiesta di 17 kW.

7.3.1 Caso 2.1

In questo caso studio si suppone un impianto radiante a pavimento con tubi annegati nel massetto non isolato dopo l'intervento di miglioramento dell'involucro 2.

Nella tabella sotto, si riportano il numero di circuiti considerati per ogni superficie chiamandola con il nome della zona verso cui la chiesa è adiacente, la portata totale, la lunghezza dei singoli circuiti, la velocità dell'acqua nei tubi e le perdite di carico.

	Superficie [m ²]	Numero di circuiti	Portata [l/h]	Lunghezza [m]	Velocità [m/s]	Perdite di carico [mca]
Zona 4	124	11	2335	56	0.23	0.38
Zona 5	101	10	1904	51	0.21	0.28
Zona 6	65	6	1227	54	0.22	0.34
Zona 7	125	12	2340	52	0.21	0.30

Tabella 41 Dimensionamento dell'impianto radiante.

Dalla tabella si ha un totale di 7806 l/h e delle perdite di carico massime di 0.38 mca. La temperatura di alimentazione dell'acqua nei tubi si considera costante e pari a 35°C.

7.3.1.1 Simulazione del caso 2.1 a temperatura costante

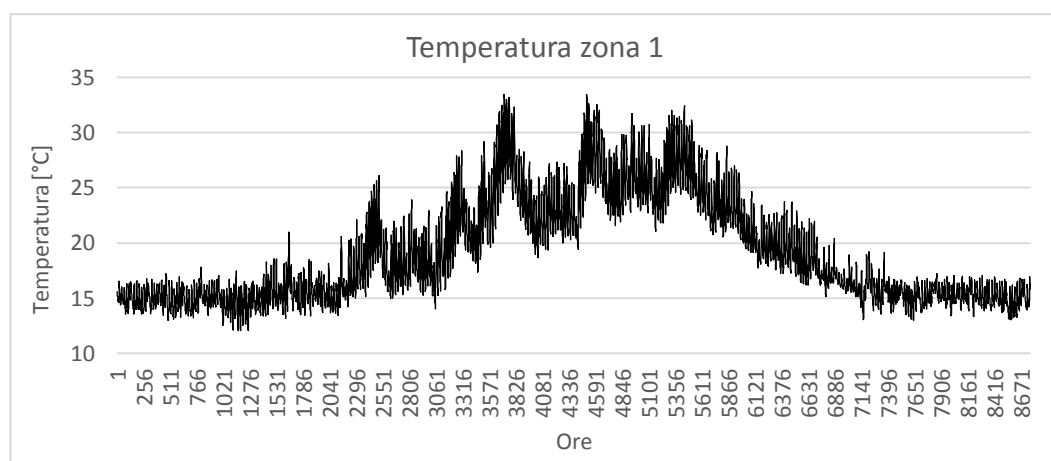


Figura 62 Andamento della temperatura dell'aria della sola chiesa.

La figura 62 mostra l'andamento della temperatura dell'aria della chiesa durante il secondo anno di simulazione. Si può vedere come la chiesa rimanga costantemente a una temperatura più alta rispetto allo stato di fatto e al caso di installazione dello stesso impianto ma dopo il miglioramento dell'involucro 1. La temperatura si vede oscillare sempre intorno ai 15 °C e raggiunge i 12° di set-back solamente in pochissime circostanze. La temperatura di alimentazione dell'impianto quindi è eccessiva ma è la minima che garantisce i 16°C di temperatura operante anche nel giorno più sfavorevole. Nella figura 63 è rappresentata la temperatura dell'aria durante una giornata invernale casuale e si può vedere come la sua fase di raffreddamento sia molto smorzata anche rispetto al caso 1.1. Il gradino di temperatura imposto rimane sempre rispettato.

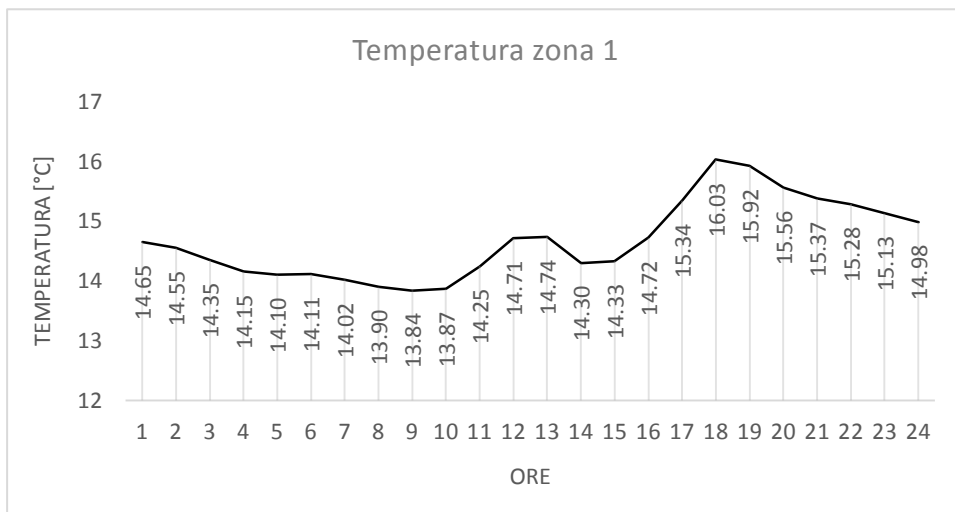


Figura 63 Andamento della temperatura dell'aria in una giornata tipo.

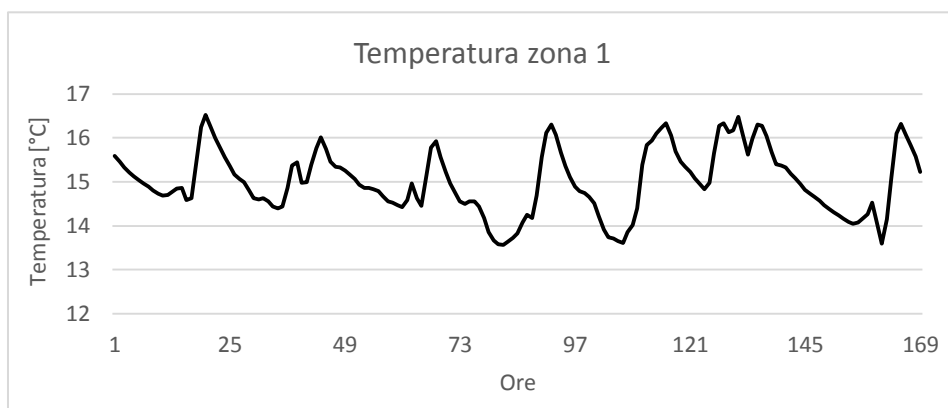


Figura 64 Andamento della temperatura dell'aria durante una settimana.

Nelle figure 65 e 66 sono invece rappresentate le temperature operative rispettivamente nella prima parte della stagione di riscaldamento e nella seconda. Le temperature operative minime negli orari dell'uso della chiesa stanno sempre posizionate intorno ai 16 °C come voluto, ma in generale la chiesa è sovra riscaldata. Persiste il fenomeno descritto sulle temperature troppo alte durante le domeniche e quelle relativamente basse per i lunedì.

L'installazione dell'impianto radiante a terra modifica quindi molto la dinamica termica dell'edificio. Questo si può notare ancora di più in questa analisi relativa all'edificio molto isolato. La chiesa rimane mediamente per tutto il tempo a una temperatura maggiore di quanto richiesto anche se non in uso.

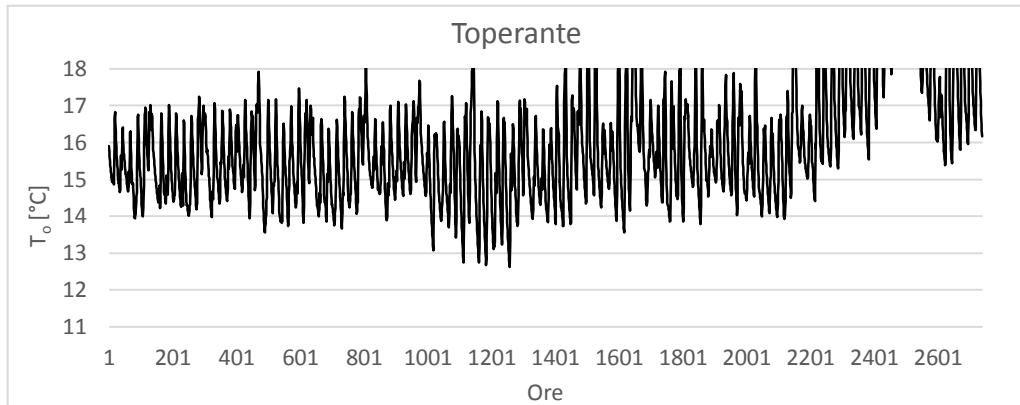


Figura 65 Temperatura operante nella prima parte della stagione di riscaldamento.

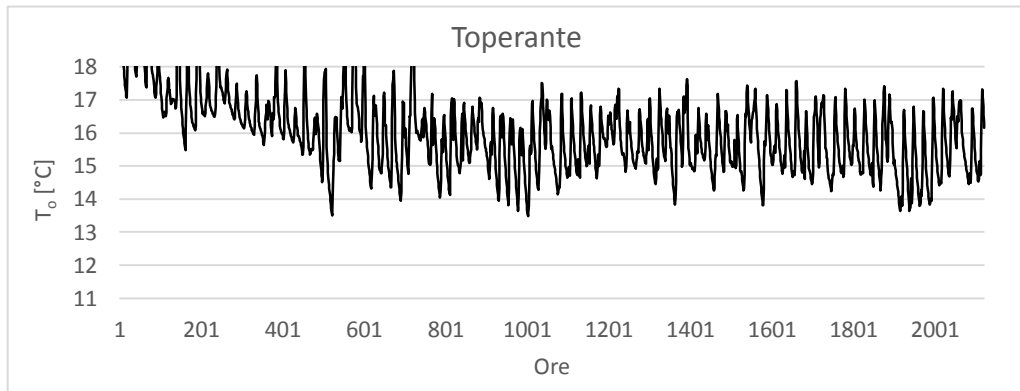


Figura 66 Temperatura operante nella seconda parte della stagione di riscaldamento.

Dal punto di vista energetico, i risultati della simulazione sono illustrati nella tabella 42 che indica il valore dell'energia termica da fornire all'acqua durante tutto l'anno di simulazione e il numero di ore di funzionamento all'anno. Se confrontati i funzionamenti dell'impianto tra questo caso studio e quello riferito allo stesso impianto ma con l'involucro mediamente isolato, si vedrebbe una differenza sia in termini di fabbisogno che in tempo di funzionamento. Migliorare quindi l'involucro diminuisce il fabbisogno ma le potenze richieste dell'acqua rimangono simili. In questo secondo caso, la chiesa rimane molto più calda.

Q _{acqua}	23301	kWh/anno
Ore di funz.	393	Ore/anno

Tabella 42 Parametri di funzionamento dell'impianto.

Nella tabella 43 sono rappresentati i fabbisogni di energia termica finale zona per zona considerando l'impianto convettivo e radiante.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	8577	0	8577	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	559	295	264	47%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	56759	52117	4642	8%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	43473	39373	4100	9%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	46549	44484	2064	4%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	58295	53230	5065	9%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	25055	-25055	0%
Totale	214212	214555	-343	0%

Tabella 43 Fabbisogno di energia termica con impianto radiante e convettivo.

L'installazione dell'impianto radiante a pavimento non ha portato a risparmi di energia termica finale se considerato l'intero edificio ma anzi, a differenza del caso 1.1 lo aumenta di 343 kWh all'anno. I vantaggi di questa tipologia di impianto rimangono gli stessi.

In totale, anche in questo caso il fabbisogno dell'acqua di riscaldamento è maggiore rispetto a quello della zona 1 (circa 3 volte) e responsabile del 14% del fabbisogno totale come nei casi precedenti. Nel caso studio si hanno gli stessi risparmi energetici in termini relativi delle zone al piano terra rispetto a quelli del caso 1.1.

7.3.1.2 Simulazione del caso 2.1 con controllo climatico

Visto lo stato di isolamento e le temperature troppo alte per la maggior parte del tempo dell'anno, si è deciso di optare per un controllo di tipo climatico per la temperatura dell'acqua di riscaldamento.

Per il controllo climatico si è scelto una relazione di tipo lineare che garantisca una temperatura di alimentazione di 35°C, come nel caso a temperatura costante, nel giorno più freddo e che abbia una pendenza di -0.4. In questo caso la pendenza della retta di regolazione è maggiore rispetto ai casi precedenti poiché la temperatura minima necessaria nel giorno più freddo rimane la stessa, ma in generale la chiesa è più calda e disperde meno.

In questo secondo caso le temperature operanti assicurano il comfort quando voluto, anche se in questo caso il controllo di tipo climatico non è sufficiente perché il problema del soprariscaldamento durante le domeniche è molto marcato. Per le stesse ragioni dei casi precedenti si assumono per buoni questi risultati.

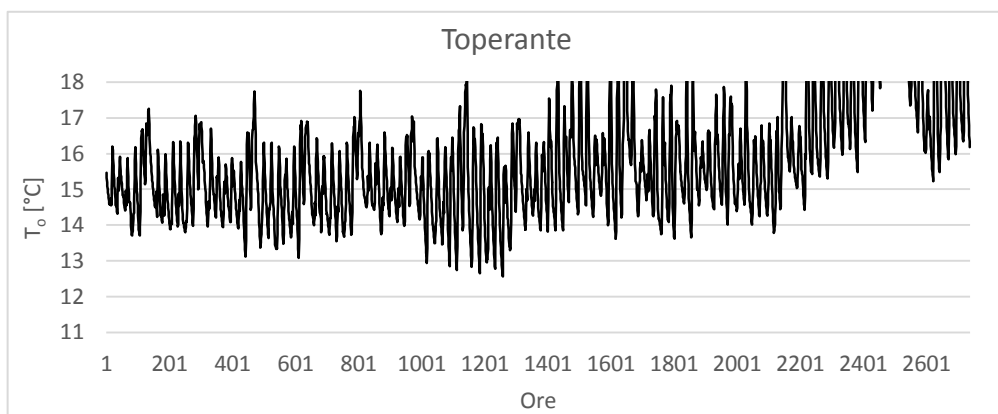


Figura 67 Temperatura operante nella prima metà dell'anno.

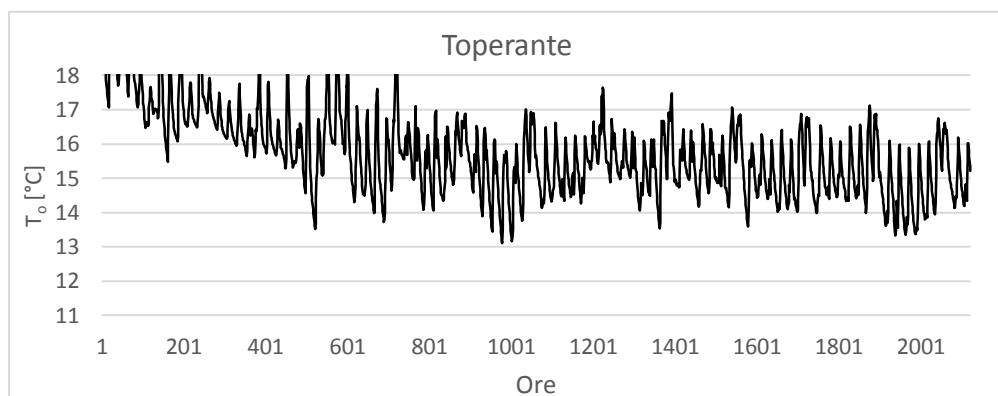


Figura 68 Temperatura operante nella seconda metà dell'anno.

Dalla tabella 44 si può notare come il fabbisogno effettivo dell'acqua sia diminuito ma è aumentato il numero di ore di funzionamento dell'impianto.

Q _{acqua}	21629	kWh
Ore di funz.	511	ore

Tabella 44 Dati funzionali dell'impianto.

Nella tabella 45 sono riportati i valori dei fabbisogni zona per zona considerando il caso di isolamento 1 con impianto convettivo e radiante con controllo climatico. L'aggiunta del controllo climatico ha diminuito il fabbisogno di energia finale totale dell'edificio. Con questa tipologia di configurazione quindi si hanno circa 800 kWh di energia termica in meno, ma circa 100 ore di funzionamento in più all'anno.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	8577	0	8577	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	559	336	223	40%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	56759	52408	4352	8%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	43473	39637	3836	9%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	46549	44664	1885	4%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	58295	53544	4751	8%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	23257	-23257	0%
Totale	214212	213846	365	0%

Tabella 45 Fabbisogni termini pre e post-intervento sull'impianto.

7.3.2 Caso 2.2

Si studia la dinamica energetica dell'edificio dopo l'intervento di miglioramento dell'involucro 2 prevedendo un impianto radiante a pavimento isolato. La configurazione dell'impianto è uguale a quella del caso 1.2.

Nella tabella sotto, si riportano il numero di circuiti considerati per ogni superficie chiamandola con il nome della zona verso cui è adiacente, la portata totale, la lunghezza dei singoli circuiti, la velocità dell'acqua nei tubi e le perdite di carico.

	Superficie [m ²]	Numero di circuiti	Portata [l/h]	Lunghezza [m]	Velocità [m/s]	Perdite di carico [mca]
Zona 4	124	8	1589	77	0.22	0.46
Zona 5	101	7	1295	72	0.20	0.38
Zona 6	65	4	835	81	0.23	0.53
Zona 7	125	7	1592	89	0.25	0.67

Tabella 46 Configurazione d'impianto.

Dalla tabella si ha un totale di 5311 l/h e delle perdite di carico massime di 0.67 mca. La temperatura di alimentazione dell'acqua nei tubi è costante e pari a 35°C.

7.3.2.1 Simulazione del caso 1.2 a temperatura costante

La dinamica termica della zona 1 è pressoché identica a quella del caso 2.1 con la temperatura dell'aria oscillante tra i 14.5 e i 16 °C per la maggior parte del tempo arrivando ai 12°C di set-back in un paio di

occasioni. Come per i casi precedenti, la temperatura di alimentazione è troppo alta e quindi si considererà in seconda analisi il controllo climatico.

Nella figura 69 si ha l'andamento della temperatura dell'aria durante la stessa giornata esaminata nel caso precedente, e anche se simile, la fase di raffreddamento è più lenta. L'aggiunta dello strato di isolante sotto i tubi quindi, limita effettivamente l'emissione verso il basso e, in fase di raffreddamento dell'acqua, questa cede molto di più alla zona 1 rispetto al caso 2.1. Il gradino di temperatura imposto rimane sempre ampiamente rispettato e non si hanno variazioni brusche di temperatura durante le giornate.

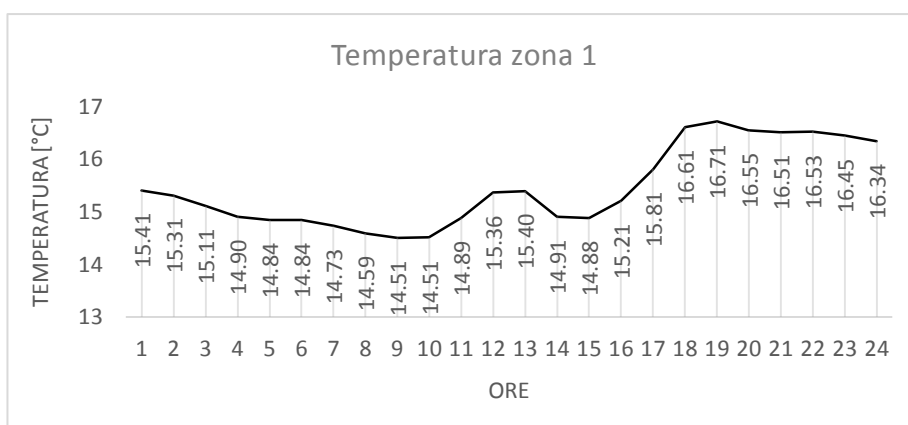


Figura 69 Andamento della temperatura giornaliera.

Nelle figure 70 e 71 sono invece rappresentate le temperature operative prima e nella seconda parte della stagione di riscaldamento. Le temperature operative minime negli orari dell'uso della chiesa stanno sempre posizionate intorno ai 16 °C ma spesso eccedono questo target.

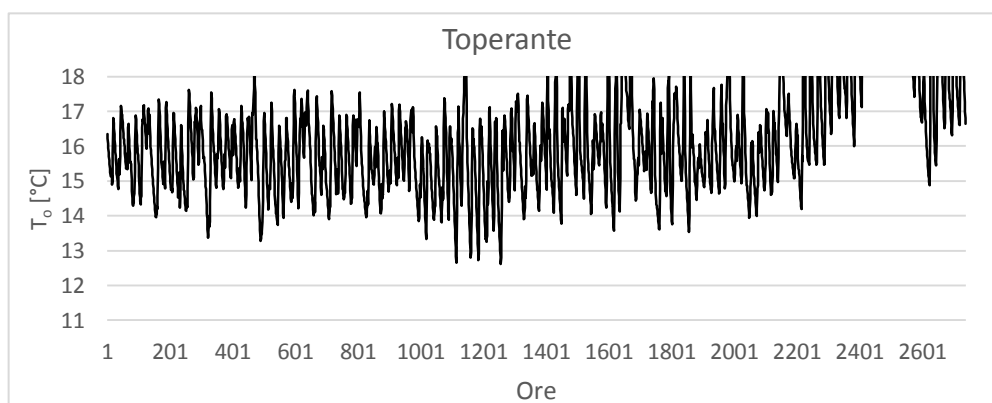


Figura 70 Temperatura operante da gennaio a maggio.

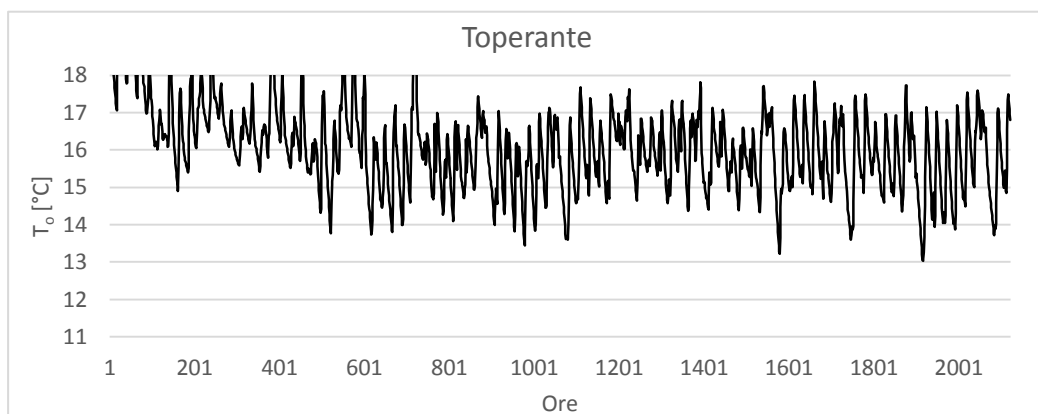


Figura 71 Temperatura operante da ottobre a gennaio.

Nella tabella 47 vengono indicati il fabbisogno di energia termica da fornire all'acqua di riscaldamento e il numero delle ore di funzionamento dell'impianto. Per il fabbisogno di energia finale dell'acqua va applicato il rendimento di distribuzione dell'acqua tra il sistema di generazione e i pannelli radianti.

Q _{acqua}	22198	kWh/anno
Ore di funz.	407	Ore/anno

Tabella 47 Parametri di funzionamento dell'impianto.

La tabella 48 rappresenta invece i fabbisogni di energia termica finale zona per zona considerando l'impianto convettivo e quello radiante.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	8577	0	8577	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	559	271	288	52%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	56759	52562	4197	7%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	43473	40460	3012	7%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	46549	44631	1918	4%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	58295	53634	4661	8%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	23869	-23869	0%
Totale	214212	215428	-1216	-1%

Tabella 48 Confronto tra impianto radiante e convettivo a parità di involucro.

L'installazione dell'impianto radiante a pavimento isolato non ha portato a risparmi di energia termica finale nemmeno in questo caso. Questa tipologia di impianto aumenta ulteriormente il fabbisogno dell'edificio rispetto al caso 2.1.

In totale il fabbisogno dell'acqua di riscaldamento è maggiore rispetto a quello della zona 1 (poco meno di 3 volte) e responsabile del 14% del fabbisogno totale e questo è dovuto alle motivazioni discusse precedentemente. A differenza del caso 2.1, limitando l'emissione verso il basso dell'impianto, si hanno meno risparmi nelle zone inferiori. Si hanno comunque dei risparmi energetici perché si limitano gli scambi tra gli ambienti adiacenti a temperature diverse.

7.3.2.2 Simulazione del caso 2.2 con controllo climatico

Dato l'eccessivo riscaldamento per la maggior parte del tempo, si è deciso di optare per un controllo climatico anche in questo caso.

Per il controllo si è scelto una relazione di tipo lineare che garantisca una temperatura di alimentazione di 35°C nel giorno più freddo e che abbia una pendenza di -0.4.

L'aggiunta di controllo climatico porta a temperature minori nella chiesa, ma a causa dell'inerzia di questa tipologia di impianto, il problema delle temperature alte durante le domeniche e basse durante i lunedì spiegato nel capitolo relativo al caso 1.1 è più marcato. Anche in questo caso si prende per buono il risultato ottenuto.

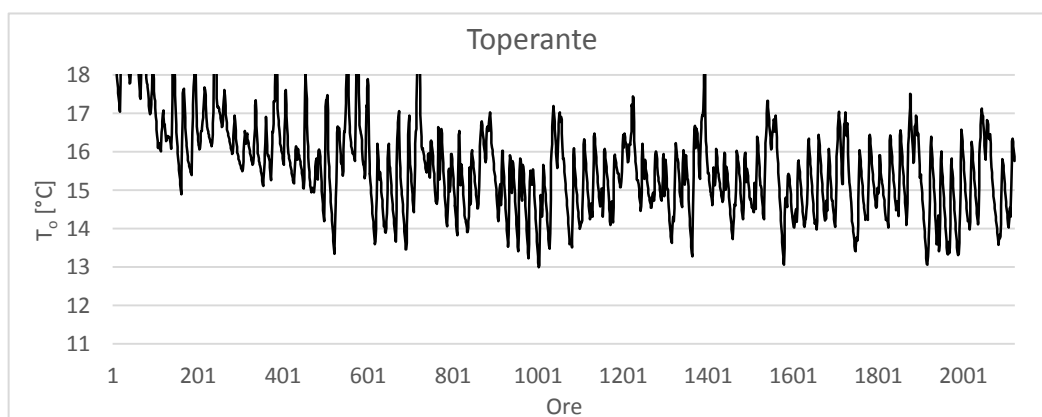


Figura 72 Temperatura operante da gennaio a maggio.

Il fabbisogno di energia termica dell'acqua di alimentazione e il numero di ore di funzionamento dell'impianto sono indicati nella tabella 49.

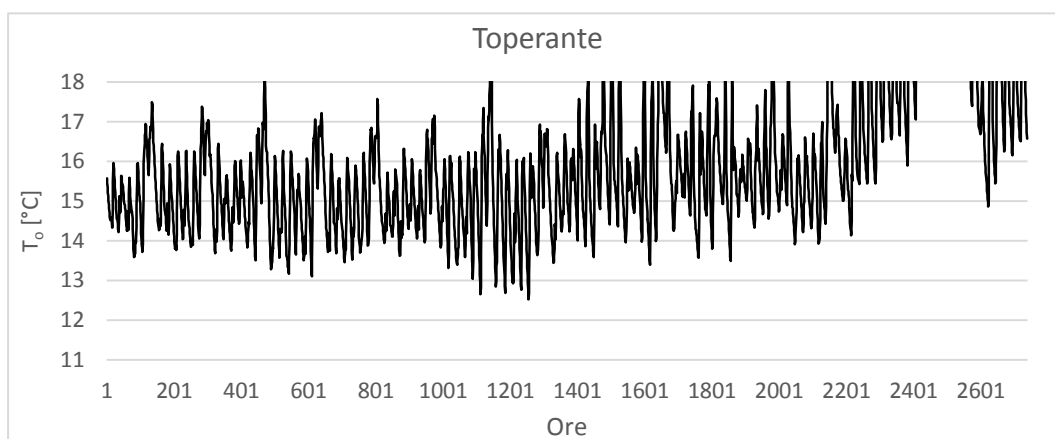


Figura 73 Temperatura operante da ottobre a gennaio.

Q _{acqua}	20462	kWh
Ore di funz.	520	ore

Tabella 49 Dati funzionali dell'impianto.

Nella tabella 50 sono riportati i valori dei fabbisogni zona per zona considerando il caso di isolamento 1 con impianto convettivo e radiante con controllo climatico.

	Convettivo [kWh]	Isolato [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	8577	0	8577	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	559	338	221	40%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	56759	52741	4018	7%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	43473	40650	2823	6%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	46549	44741	1808	4%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	58295	53863	4433	8%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	22002	-22002	0%
Totale	214212	214334	-122	0%

Tabella 50 Confronto tra impianto radiante e convettivo.

L'aggiunta di questo tipo di controllo ha portato a un risparmio ulteriore di circa 1100 kWh e il risparmio energetico delle singole zone è diminuito di poco.

In totale, l'impianto radiante a pavimento isolato e con controllo di tipo climatico porta a ulteriori risparmi di energia termica, ma deve funzionare per 120 ore in più.

7.3.3 Confronto delle soluzioni studiate dopo il caso di intervento 2

Nella tabella 51 sono riepilogati i risultati ottenuti dalle 4 simulazioni.

Caso	Ore di funzionamento [h]	Q _{acqua} [kWh]	Q _{resto,edificio} [kWh]
2.1	393	25055	189500
2.1.c	511	23257	190589
2.2	407	23869	191559
2.2c	520	22002	192332

Tabella 51 Riepilogo dei fabbisogni degli impianti nel caso 2.

Tutte e 4 le soluzioni portano a risultati simili tra loro. La convenienza di una configurazione piuttosto che un'altra può essere constatata solo da un'analisi più dettagliata che verrà fatta nei capitoli finali. In questa sede si segnala che confrontati i due tipi di impianto radiante nella medesima condizione dell'involucro, l'impianto che prevede anche l'isolamento del solaio porta a un risparmio energetico totale dell'edificio di -873 kWh rispetto a quello senza isolamento. In particolare, si risparmia sul fabbisogno dell'acqua di 1186 kWh ma si aumenta il fabbisogno energetico del restante edificio di 2059 kWh. Considerando un prezzo dei pannelli superiore nel caso fossero isolati, la scelta più conveniente sarà la soluzione dei pannelli a tubi annegati nel massetto. Questo si confermerebbe ancor di più nel caso che l'energia termica per la parte restante dell'edificio costasse di più rispetto a quella dell'acqua.

Considerazioni simili si possono fare confrontando i due modelli che prevedono il controllo climatico, ma qui la differenza è di 488 kWh sempre in favore della soluzione senza isolamento del solaio.

8 Impianto radiante a soffitto

Questo capitolo contiene i risultati delle simulazioni dei modelli dell'edificio con l'installazione dell'impianto radiante a bassa temperatura a soffitto. I risultati ottenuti in questi modelli verranno confrontati con quelli relativi all'impianto radiante a pavimento nel capitolo successivo.

Si è considerata l'installazione dell'impianto radiante a soffitto dopo gli interventi di miglioramento dell'involucro 1 e 2. In totale, si sono studiati 4 tipologie di configurazione diverse per ognuno dei due casi. In particolare, si è considerato:

1. Impianto radiante a soffitto totale.
2. Impianto radiante a soffitto parziale (60%).
3. Impianto radiante a soffitto parziale (60%) e controllo climatico.
4. Impianto radiante a soffitto parziale (50%) e controllo climatico.

Le diverse tipologie di impianto sono state confrontate tra loro a parità di comfort interno e quindi a parità di temperatura operante. La metodologia di calcolo dei fattori di vista, necessari per la determinazione della temperatura media radiante, e del calcolo delle temperature operanti, sono stati esposti nel capitolo precedente.

La logica usata per l'introduzione dell'impianto radiante a soffitto nei modelli di Trnsys è simile a quella usata per l'impianto a pavimento ma in questo caso, si sono dovute usare delle stratigrafie fittizie ma equivalenti a quelli che si avrebbero nella realtà a causa dei vincoli del software sull'uso degli active layers.

Gli active layers infatti, sono caratterizzati principalmente da 2 vincoli. Il primo vincolo è dato dallo spessore dello strato superiore e inferiore all'active layer che è di 0.3 volte il passo tra i tubi inserito (il materiale superiore e inferiore deve essere lo stesso). Il secondo vincolo invece è dato dalla portata minima circolante nell'impianto. Il software calcola una portata minima accettabile sotto la quale, la simulazione del modello non può partire.

Data quindi la reale geometria dei pannelli radianti a parete/soffitto e le reali portate circolanti, si sono dovute usare delle strutture equivalenti ma che non fossero in contrasto con i vincoli del software.

8.1 Il pannello radiante

Il pannello radiante scelto per la soluzione impiantistica è illustrato nella figura 74. È composto da uno strato di 15 mm di cartongesso, 30 mm di isolante EPS250, i tubi all'interno sono di diametro di 6mm con spessore di 1mm e il passo tra i tubi è di 6cm. Un pannello ha una geometria di 2 x 0.6 m.

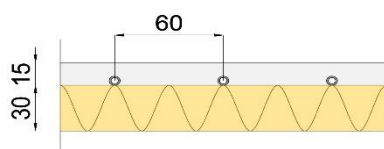


Figura 74 Sezione del pannello radiante a soffitto.

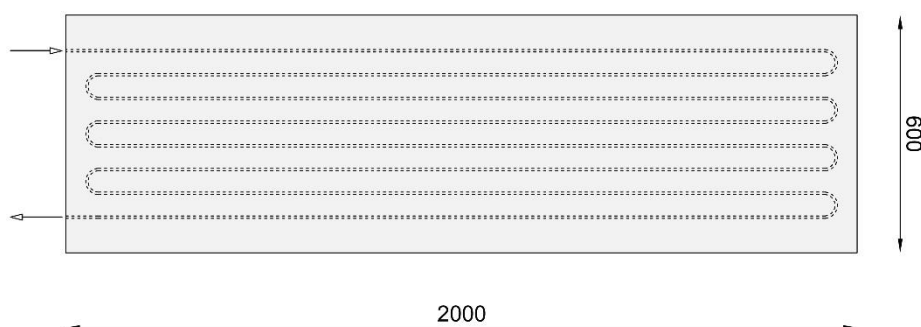


Figura 75 Vista frontale del pannello radiante.

Visto l'alto numero di pannelli necessari per ricoprire il tetto inclinato, per limitare le portate in gioco, si è deciso di collegare in serie due pannelli. In questo modo si avranno perdite di carico maggiori ma portate minori. Dalla scheda tecnica dei tubi usati, si hanno le relazioni per quantificare le perdite di carico in funzione della portata. Si è quindi calcolata la lunghezza dei tubi in un pannello e si è cercato di trovare una portata tale che, considerando i pannelli collegati in serie, porti a una perdita di carico totale di massimo 2,1 mca. Questa portata è pari a 10 l/h per circuito.

Inserendo questi dati in TrnBuild, non si riescono a soddisfare i vincoli del software.

Per Trnsys quindi si è usato un pannello composto da spessori diversi e quindi materiali fittizi, che permettessero la stessa resa verso l'interno e verso l'esterno. Si è considerato un active layer definito da tubi di 6 mm di diametro e spessore di 1 mm con passo di 10 cm. Questa definizione dell'active layer impone uno strato di cartongesso sopra e sotto di 3 cm per un totale di 6 cm rispetto ai 1.5 cm reali. Per correttezza si è inserito anche uno strato di isolante di 3 cm. Considerando quindi questa geometria, si

sono variati i valori delle conducibilità termiche del cartongesso e dell'isolante in Trnsys in modo che il pannello radiante inserito avesse la stessa emissione verso interno e verso l'esterno del pannello radiante reale. Questo lavoro è stato fatto con Mirage.

Definita la geometria del pannello in Trnsys, la portata minima da soddisfare è di circa 15 l/h.

8.2 Calcoli in Mirage

In Mirage sono state fatti i confronti del modello del pannello radiante inserito in Trnsys e quello reale. Si è disegnato il pannello in entrambi i casi applicati sulla stratigrafia del tetto inclinato. Le caratteristiche dei materiali del tetto inclinato sono state considerate uguali a quello reale. I coefficienti di scambio convettivo e radiativo della superficie interna ed esterna sono stati calcolati secondo UNI EN ISO 6946.

Date le diverse portate utilizzate per il modello reale e quello inserito in Trnsys, anche le resistenze convettive lato acqua sono diverse. Queste sono state calcolate con l'espressione di Sieder e Tate che vale in convezione forzata e regime laminare.

Secondo questa relazione, dati il numero di Reynolds e di Prandtl si può ricavare il numero di Nusselt dal quale si può calcolare il coefficiente convettivo.

Dati quindi:

$$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu}$$

$$Pr = \frac{c \cdot \mu}{\lambda}$$

Dove:

- w è la velocità del fluido
- d è il diametro del tubo
- ρ è la densità del fluido
- μ è la viscosità dinamica del fluido
- c è il calore specifico del fluido
- λ è la conduttività termica

Il numero di Nusselt è calcolabile con:

$$Nu = 1.86 \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{d}{l} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_p} \right)^{0.14}$$

Dove:

- l è la lunghezza del condotto
- μ_p è la viscosità del fluido sulla parete

Dalla definizione di Nusselt, il coefficiente convettivo è calcolabile con:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}$$

I campi di validità dell'espressione di Sieder-Tate sono:

$$\frac{l}{d} > 2$$

$$100 < Re < 2100$$

$$0.48 < Pr < 16700$$

$$\mu \geq 1 \text{ cP}$$

Da queste relazioni, si è ottenuto:

	Modello in Trnsys	Modello reale
$\alpha_c \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	330	289

Tabella 52 Coefficiente di scambio convettivo del modello reale e del modello usato in Trnsys.

Si è considerata una temperatura dell'acqua di 35°C, una temperatura interna di 16°C e una temperatura esterna di -5 °C.

La simulazione del modello in Mirage è mostrata nella figura 76. Sulla sinistra è rappresentato il modello di riferimento e sulla destra quello relativo a Trnsys.

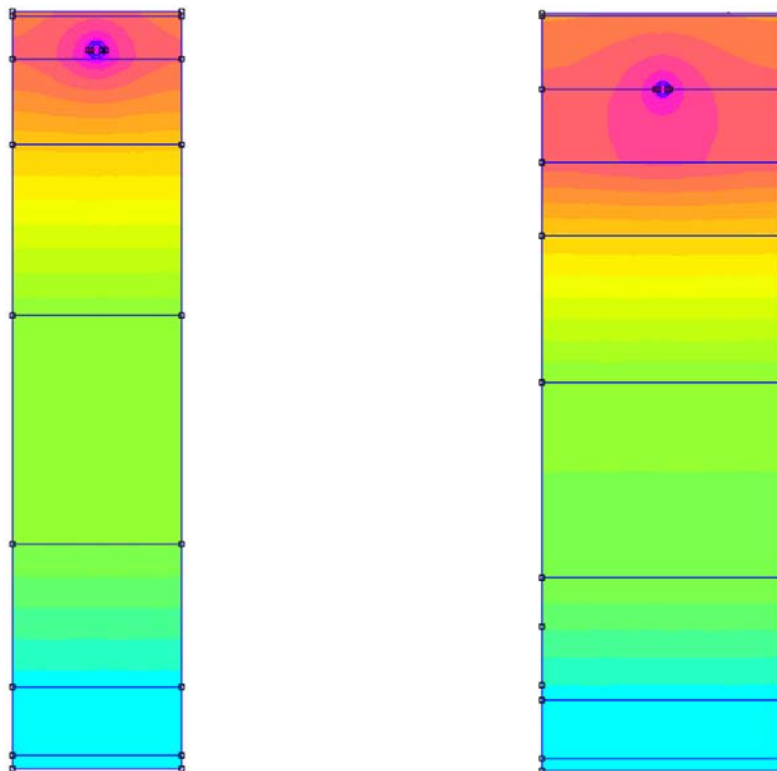


Figura 76 Simulazione dei due modelli studiati in Mirage.

Dalla figura si vede come anche la distribuzione delle temperature possa essere considerata simile tra i due modelli. La superficie del modello relativo a Trnsys avrà però una temperatura inferiore rispetto al caso reale. Questo vuol dire che in fase di calcolo, le temperature operanti saranno sottostimate.

Una volta identificati i valori delle conducibilità termiche dei materiali fittizi, si sono variati diversi parametri come ad esempio la temperatura dell'acqua nei tubi, e si è visto che le rese verso l'alto e verso il basso rimanevano simili tra i due modelli con differenze massime di 0.4%.

I valori della resa verso l'interno e verso l'esterno sono indicati nella tabella 53.

	Modello in Trnsys	Modello reale
Flusso verso l'interno $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	69.63	69.73
Flusso verso l'esterno $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	10.62	10.70

Tabella 53 Flussi verso l'interno e verso l'esterno dei due modelli considerati.

I valori delle conducibilità termiche dei materiali considerati sono indicati nella tabella 54.

	Modello in Trnsys	Modello reale
Conducibilità cartongesso $\left[\frac{W}{mK}\right]$	0.475	0.210
Conducibilità isolante $\left[\frac{W}{mK}\right]$	0.030	0.031

Tabella 54 Valori delle conducibilità termiche considerate per i due modelli.

Lo stesso procedimento è stato fatto anche quando si è studiato l'installazione dei pannelli radianti a soffitto dopo il caso di miglioramento dell'involucro 2 e il valore delle conducibilità varia di poco.

8.3 Caso 1

In questa parte del capitolo viene analizzato il caso di installazione dell'impianto radiante a soffitto dopo l'intervento di miglioramento dell'involucro 1. In particolare, si studierà la dinamica dell'edificio dal punto di vista energetico prevedendo le 4 configurazioni dell'impianto radiante a soffitto.

La geometria del pannello è stata descritta nella parte introduttiva del capitolo ed è da scheda tecnica. L'unica scelta effettuata sul funzionamento del pannello è stata quella relativa alla portata di acqua circolante come visto nel sotto capitolo relativo ai calcoli in Mirage.

L'active layer è stato definito con la geometria della tabella 55.

Passo tra tubi	100 mm
Diametro esterno	6 mm
Spessore	1 mm
Conducibilità termica	0.35 W/mK

Tabella 55 Geometria del pannello radiante a soffitto in Trnsys.

Su Trnsys si sono inseriti il numero di circuiti, la temperatura di alimentazione dell'acqua nei tubi e la portata. Per quanto riguarda la portata, si considera un funzionamento a portata costante e controllata in funzione della temperatura dell'ambiente. Questo tipo di regolazione è uguale a quello dell'impianto radiante a pavimento. Anche in questo caso, così come negli altri si considera un gradino di temperatura massimo di 1°C/h.

8.3.1 Modello dell'impianto radiante a soffitto installato su tutta la superficie

In questo caso studio si suppone un impianto radiante a soffitto applicato su tutta la superficie del tetto inclinato esposto a nord e sud.

In TrnsysBuild si è dovuto modificare la stratigrafia del tetto inclinato considerando i materiali del pannello con la conducibilità fittizia calcolata in Mirage, correggendo anche il coefficiente di scambio convettivo della superficie in $2.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ verso l'interno.

La superficie totale su cui si applicano i pannelli radianti è di 605 m^2 . Nella tabella sotto, si riportano il numero di circuiti considerati in totale, il numero di pannelli, la portata per circuito e le perdite di carico per circuito.

Numero circuiti	Numero pannelli	Portata per circuito [l/h]	Perdite di carico per circuito [mca]
252	504	10	2.04

Tabella 56 Riepilogo della configurazione considerata.

In totale, si ha una portata circolante di circa 2520 l/h e le perdite di carico per ogni circuito sono di 2.04 mca . La temperatura dell'acqua all'ingresso dei tubi inizialmente considerata era di $35 \text{ }^\circ\text{C}$, come nel caso dell'impianto radiante a pavimento, ma visto che non si riusciva a rispettare il gradino di temperatura, si è abbassata la temperatura dell'acqua. Per questo modello la temperatura dell'acqua all'ingresso dei circuiti è costante e pari a $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

8.3.1.1 Simulazione del caso a impianto radiante sull'intera superficie del tetto inclinato

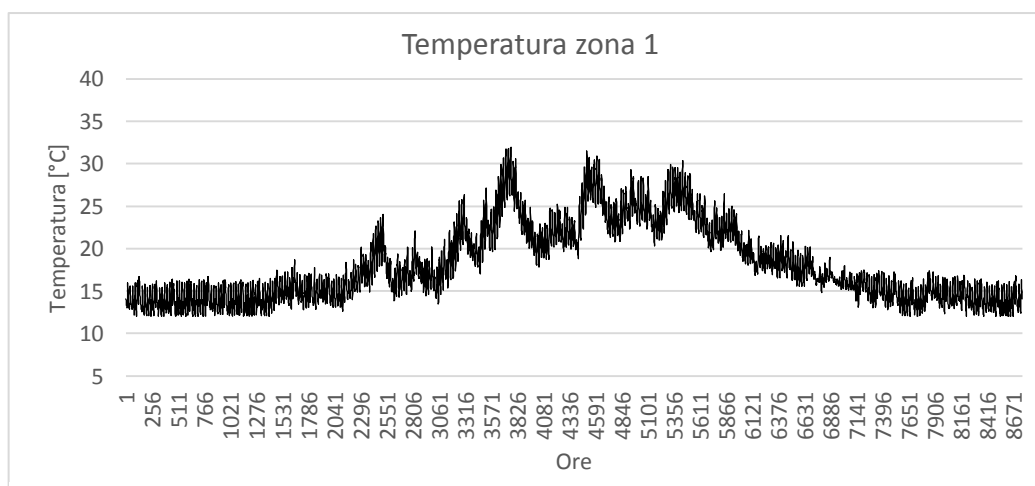


Figura 77 Temperatura della zona 1 durante l'anno considerato.

La figura 77 mostra l'andamento della temperatura dell'aria della chiesa durante il secondo anno di simulazione. La temperatura dell'aria della chiesa, durante l'inverno, rimane tra le due temperature imposte. A differenza dell'impianto radiante a pavimento, la temperatura raggiunge il set-back molto più frequentemente.

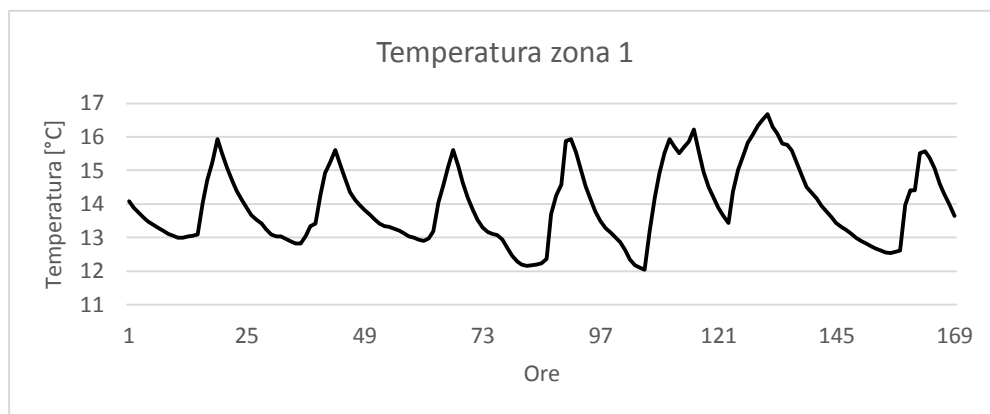


Figura 78 Temperatura della zona 1 durante una settimana.

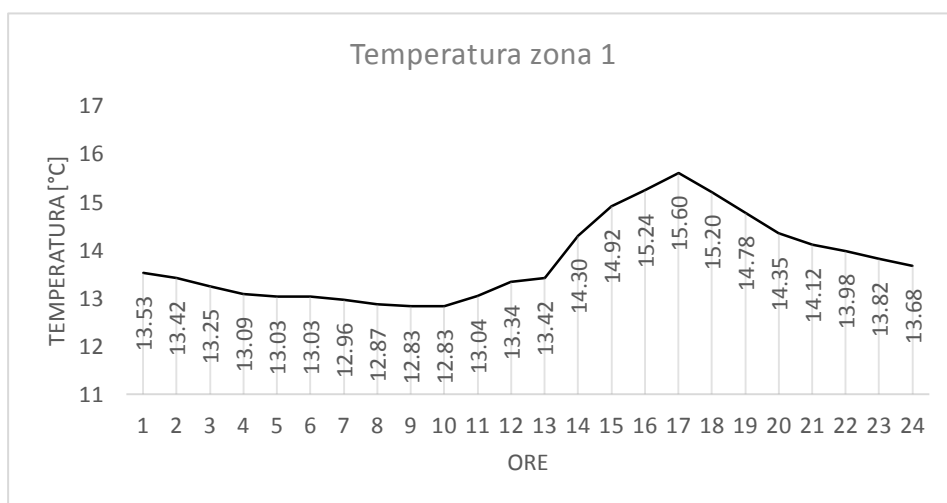


Figura 79 Dettaglio dell'andamento della temperatura durante una giornata.

Nella figura 79 è rappresentata la temperatura dell'aria durante una giornata invernale casuale e si può vedere la sua dinamica di riscaldamento e raffreddamento. Il gradino di temperatura imposto viene rispettato. Rispetto al modello con impianto convettivo la dinamica della temperatura è più smorzata, ma rispetto all'impianto a pavimento lo è meno. Nella figura 78 invece si vede l'andamento della temperatura durante un'intera settimana. In questa figura si vede come la temperatura dell'aria raggiunga quasi sempre la soglia dei 16 °C e la domenica presenta una temperatura maggiore, mentre i lunedì una temperatura minore. Una spiegazione a questo andamento è stata spiegata nel capitolo relativo all'impianto radiante a pavimento.

Nelle figure 80 e 81 sono invece rappresentate le temperature operative rispettivamente nella prima parte della stagione di riscaldamento e nella seconda. Le temperature operative minime negli orari dell'uso della chiesa stanno sempre posizionate intorno ai 16 °C come voluto. Vista la figura, non è stato considerato necessario un controllo di tipo climatico.

L'impianto radiante a soffitto totale permette di raggiungere le condizioni di comfort imposte con una temperatura e portata più bassa rispetto a quella dell'impianto a pavimento. L'abbassamento della temperatura dell'acqua e la grande superficie permettono il raggiungimento delle temperature senza la previsione di controllo climatico, l'abbassamento della portata invece abbassa l'inerzia termica dell'edificio infatti, la fase di raffreddamento dell'acqua è più lenta rispetto all'impianto a pavimento.

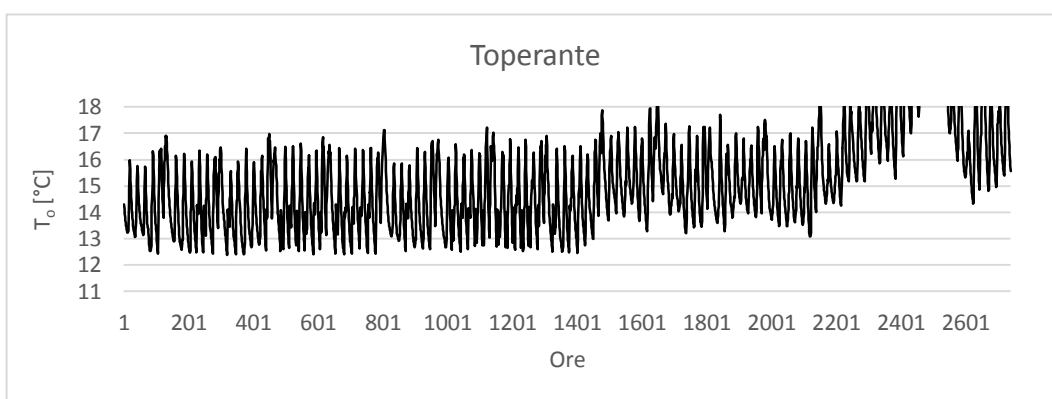


Figura 80 Temperatura operante da gennaio a maggio.

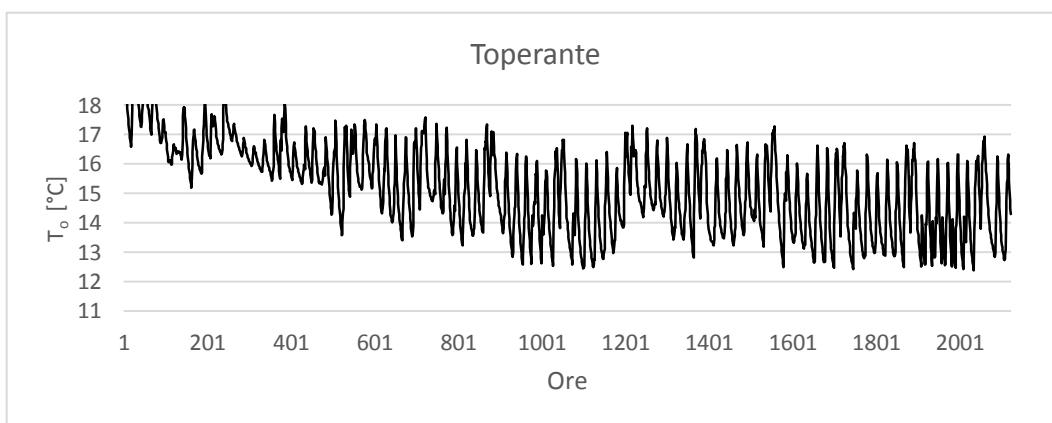


Figura 81 Temperatura operante da ottobre a gennaio.

Dal punto di vista funzionale, i risultati della simulazione sono illustrati nella tabella 57 che indica il valore dell'energia termica da fornire all'acqua durante tutto l'anno di simulazione e il numero di ore di funzionamento all'anno. Il valore dell'energia da fornire all'acqua fornita da Trnsys è da considerarsi comprendente del rendimento di regolazione e del rendimento di emissione. Applicando il rendimento di distribuzione fino ai collettori finali dei pannelli radianti, si otterrà il fabbisogno dell'energia finale da fornire all'acqua di riscaldamento.

Q _{acqua}	19434	kWh/anno
Ore di funz.	499	Ore/anno

Tabella 57 Dati di funzionamento dell'impianto.

Nella tabella 58 sono invece rappresentati i fabbisogni di energia termica finale zona per zona considerando un ipotetico impianto convettivo e radiante a parità di involucro.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	15347	0	15347	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	898	585	312	35%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	77774	76733	1041	1%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	56738	55512	1226	2%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	76738	76374	365	0%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	76664	75466	1198	2%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	20897	-20897	0%
Totale	304160	305567	-1407	0%

Tabella 58 Fabbisogni di energia termica finale pre e post-intervento sull'impianto.

L'installazione dell'impianto radiante a soffitto non ha portato a risparmi di energia termica finale se considerato l'intero edificio ma anzi, aumenta il fabbisogno di energia finale di 1407 kWh/anno corrispondente a meno del 0.5% rispetto al fabbisogno totale dell'edificio.

In totale, il fabbisogno dell'acqua di riscaldamento è maggiore del 35% rispetto a quello della zona 1 e responsabile dell'8% del fabbisogno totale. I risparmi energetici delle altre zone sono bassi e si piazzano tra l'1 e il 2%. Questa scelta di impianto risulta quindi essere più mirata alla chiesa che all'intero edificio. Le dispersioni delle zone al piano terra si riescono a limitare perché mediamente la temperatura dell'aria della zona è in parte maggiore rispetto al caso di impianto convettivo. Se si confrontassero questi risultati con quelli relativi all'impianto radiante a pavimento si noterebbe che il fabbisogno di energia termica per l'acqua di riscaldamento è di circa la metà ma si hanno molti meno benefici nelle altre zone. Un confronto più dettagliato verrà comunque fatto nel capitolo successivo.

Per un confronto più equo, si è modellizzato lo stesso impianto di emissione ma non è stato considerato lo strato di isolante del pannello. In questo modo si potranno confrontare le due tipologie di impianto (a pavimento e a soffitto) a parità di trasmittanza.

Dal punto di vista delle temperature, quelle operanti e dell'aria durante l'anno rimangono simili. Dal punto di vista energetico ci sono delle differenze.

La tabella 59 contiene i dati relativi al fabbisogno di energia termica per l'acqua di riscaldamento e delle ore di funzionamento dell'impianto radiante a soffitto totale ma senza lo strato di isolante aggiuntivo.

Q _{acqua}	22416	kWh/anno
Ore di funz.	558	Ore/anno

Tabella 59 Parametri funzionale dell'impianto.

Per quanto riguarda invece i fabbisogni di energia finale, si può consultare la tabella 60.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	15347	0	15347	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	898	602	296	33%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	77774	76878	895	1%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	56738	55736	1002	2%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	76738	76454	284	0%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	76664	75630	1034	1%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	24103	-24103	0%
Totale	304160	309403	-5243	-2%

Tabella 60 Fabbisogni di energia finale differenziati per zona.

In questo caso, considerando lo stesso impianto ma una trasmittanza del tetto inclinato uguale a quella considerata nei modelli con l'impianto radiante a pavimento, si aumenta ancora di più il fabbisogno di energia termica dell'intero edificio. L'impianto inoltre lavora per più ore durante l'anno.

Il fabbisogno dell'acqua aumenta di circa 3000 kWh, considerando i risparmi minori sulle zone inferiori, il fabbisogno di energia termica aumenta in totale di circa 3800 kWh rispetto al caso con i pannelli isolati.

8.3.2 Impianto radiante a soffitto installato su soffitto parziale

Dopo l'analisi dell'impianto radiante installato su tutta la superficie del tetto inclinato si è studiata l'installazione dello stesso impianto ma solo su una parte del tetto. Si è considerata una superficie effettivamente attiva di 60% della superficie del tetto (considerando il 70% del pannello attivo). Questa scelta è stata fatta considerando che la parte alta del tetto inclinato nella realtà non è influente, poiché ha un basso fattore di vista rispetto al punto dove si vuole raggiungere il comfort, e comunque le due

falde scambiano tra loro. Poiché Trnsys non è un software geometrico, questo fattore non è incluso nei calcoli.

La superficie totale su cui si applicano i pannelli radianti è di 520 m² (considerando sia parte attiva che non attiva del pannello). Nella tabella sotto, si riportano il numero di circuiti considerati in totale, il numero di pannelli, la portata per circuito e le perdite di carico per circuito.

Numero circuiti	Numero pannelli	Portata per circuito [l/h]	Perdite di carico per circuito [mca]
216	432	10	2.04

Tabella 61 Informazioni sull'impianto considerato.

In totale, si ha una portata circolante di circa 2160 l/h e le perdite di carico per ogni circuito sono di 2.04 mca. La temperatura dell'acqua all'ingresso dei tubi inizialmente considerata era di 30 °C, come nel caso precedente, ma non si riuscivano a raggiungere quasi mai le temperature operanti volute e si è aumentato la temperatura dell'acqua a 35°C. In questo modo il gradino della temperatura non si riesce a rispettare sempre e del tutto in quanto la temperatura dell'aria in fase di riscaldamento supera in qualche occasione il gradino imposto di 1 °C/h. Per ovviare a questo problema verrà considerato anche un controllo climatico che dovrebbe annullare questo effetto nei giorni più caldi.

8.3.2.1 Simulazione del modello con impianto radiante a soffitto parziale

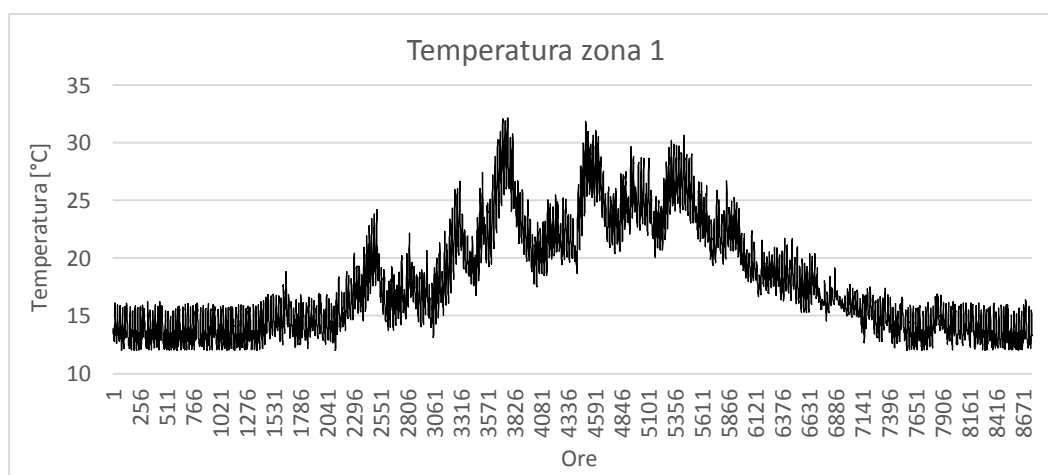


Figura 82 Temperatura della zona 1 durante l'anno considerato.

Nella figura 82 si hanno le temperature della zona 1 durante il secondo anno di simulazione. In questo caso si vede come la temperatura raggiunga i 12 °C quasi sempre in fase di raffreddamento della zona.

Nelle figure 83 e 84 si hanno gli andamenti più dettagliati prendendo in considerazione lo stesso giorno e la stessa settimana dei casi precedenti.

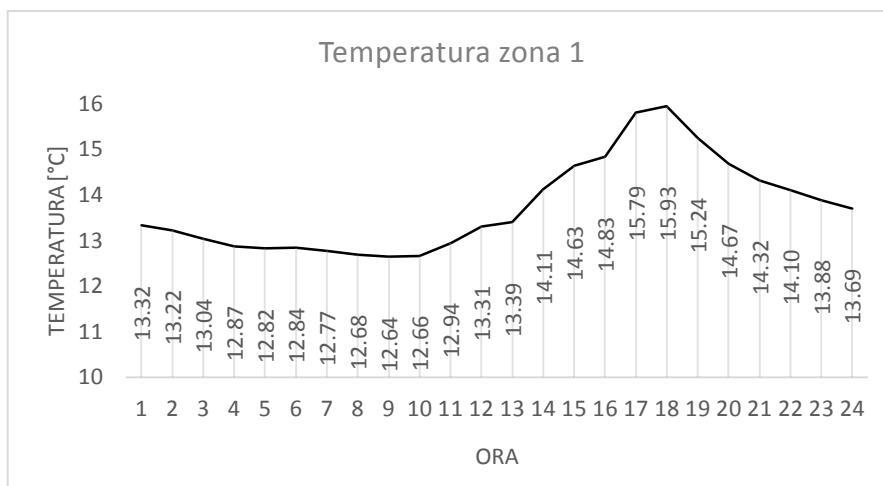


Figura 83 Andamento di temperatura della zona 1 durante una giornata.

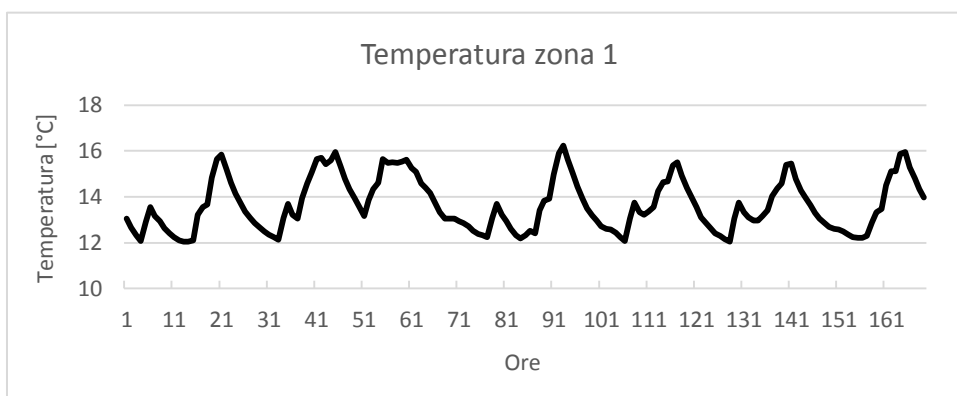


Figura 84 Andamento di temperatura della zona 1 durante una settimana.

La dinamica termica della zona 1 è diversa rispetto al caso di installazione su tutto il soffitto. La diminuzione di superficie porta a più accensioni dell'impianto di riscaldamento, e durante una giornata, generalmente si hanno più variazioni di temperatura. La temperatura di set-back viene raggiunta quasi sempre quando la chiesa si raffredda e qualche volta l'impianto funziona anche se la chiesa non è usata in quanto si devono mantenere le temperature minime.

Nelle figure 85 e 86 ci sono rappresentate le temperature operanti.

Le temperature operanti raggiungono quasi sempre i target voluti a parte qualche giorno, probabilmente più freddo rispetto alla media. Anche se il numero delle volte che la temperatura non raggiunge i 16°C è di poche volte, si può provare a introdurre un controllo di tipo climatico. Questo controllo climatico potrebbe però accentuare i problemi del gradino termico.

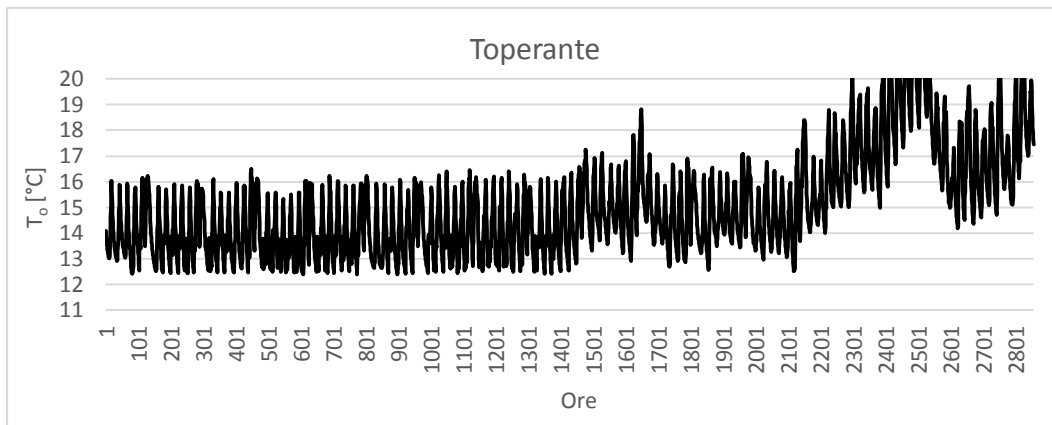


Figura 85 Temperatura operante nella prima metà della stagione di riscaldamento.

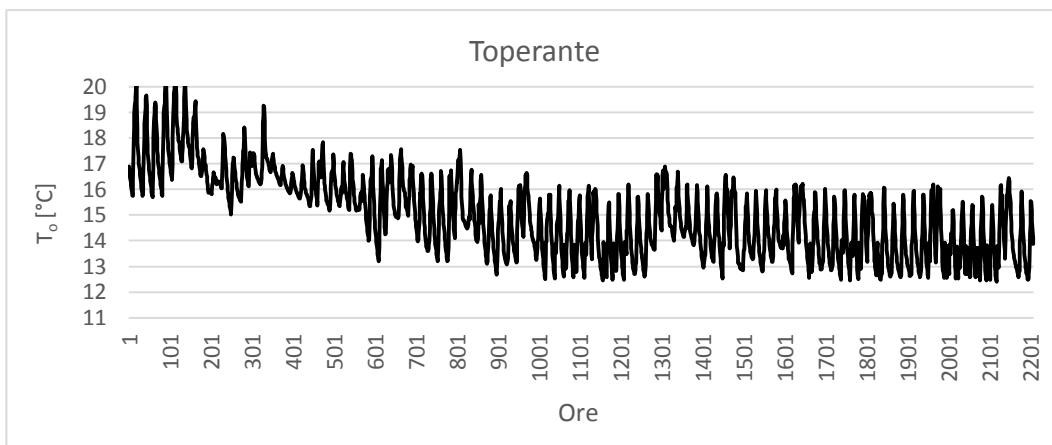


Figura 86 Temperatura operante nella seconda metà della stagione di riscaldamento.

Dal punto di vista dell'impianto, nella tabella 62 sono indicati il fabbisogno di energia dell'acqua di riscaldamento compreso il rendimento di emissione e controllo e il numero di ore di funzionamento dell'impianto.

Q _{acqua}	19876	kWh/anno
Ore di funz.	591	Ore/anno

Tabella 62 Dati di funzionamento della configurazione in esame.

Nella tabella 63 sono invece rappresentati, come negli altri casi, i fabbisogni di energia termica considerando l'impianto radiante e un ipotetico impianto convettivo nelle stesse condizioni di involucro.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmi o
Zona 1 (Sala)	15347	0	15347	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	898	615	282	31%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	77774	76913	861	1%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	56738	55729	1010	2%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	76738	76474	265	0%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	76664	75670	995	1%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	21372	-21372	0%
Totale	304160	306773	-2184	-1%

Tabella 63 Fabbisogni termici finali differenziati per zona.

Il fabbisogno di energia finale della sola acqua di riscaldamento è di 21372 kWh/anno, corrispondente a circa l'8% del fabbisogno dell'intero edificio. Questa tipologia di impianto porta a pochi risparmi energetici sulle zone del piano inferiore ma aumenta quello totale di circa l'1%. I risultati della simulazione sono inoltre confrontabili con quelli dell'impianto radiante a soffitto totale anche se si considera attivo il 60% del soffitto.

Come fatto per il modello con impianto radiante a soffitto totale, si è studiato anche il modello senza considerare lo strato aggiuntivo di isolamento del pannello radiante. Dal punto di vista delle temperature, non si hanno particolari variazioni rispetto al considerare il pannello reale. Dal punto di vista del funzionamento si hanno però alcune differenze.

Nelle tabelle 64 e 65 si indicano i dati relativi all'impianto e ai fabbisogni dell'edificio.

Q _{acqua}	21677	kWh/anno
Ore di funz.	629	Ore/anno

Tabella 64 Dati di funzionamento dell'impianto.

Il fabbisogno di energia termica dell'acqua è aumentato di poco mentre il numero delle ore di funzionamento è aumentato di 38 ore/anno.

Come nel caso dell'impianto a soffitto totale, il fabbisogno energetico è maggiore. L'aumento del fabbisogno è dato quasi totalmente da quello dell'acqua.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	15347	0	15347	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	898	629	268	30%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	77774	77009	764	1%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	56738	55873	865	2%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	76738	76527	211	0%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	76664	75778	886	1%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	23309	-23309	0%
Totale	304160	309126	-4966	-2%

Tabella 65 Fabbisogni di energia finale suddivisi per zona.

8.3.3 Impianto radiante a soffitto installato su parete parziale con controllo climatico

Per cercare di raggiungere le condizioni di comfort e limitare il dispendio energetico quando non necessario, si è aggiunto un controllo di tipo climatico sulla temperatura di ingresso nei pannelli dell'acqua. Il controllo climatico collega la temperatura dell'acqua di riscaldamento alla temperatura esterna per via di una equazione lineare. Nel caso in esame la retta di regolazione ha una pendenza di -0.32 e assicura una temperatura dell'acqua di circa 40°C a una temperatura esterna di -10.

Si è quindi alzato la temperatura di ingresso dell'acqua nei giorni più freddi rispetto al caso senza controllo climatico perché si è visto come per alcuni giorni durante l'anno non si riuscivano a raggiungere i target imposti. Alzare la temperatura dell'acqua vuol dire anche alzare il gradino di temperatura dell'aria in fase di riscaldamento. Questo problema però si ha solo in giorni molto freddi e comunque la limitata superficie attiva in realtà aiuta a contenere questo gradino visto il grande volume da riscaldare. Anche le temperature degli elementi architettonici variano molto di più durante la giornata.

La superficie totale su cui si applicano i pannelli radianti è di 520 m². Nella tabella sotto, si riportano il numero di circuiti considerati in totale, il numero di pannelli, la portata per circuito e le perdite di carico per circuito.

Numero circuiti	Numero pannelli	Portata per circuito [l/h]	Perdite di carico per circuito [m.c.a]
216	432	10	2.04

Tabella 66 Dati sulla configurazione impiantistica.

In totale, si ha una portata circolante di circa 2160 l/h e le perdite di carico per ogni circuito sono di 2.04 mca. La temperatura dell'acqua all'ingresso dei tubi varia tra i 32 e i 40 °C.

8.3.3.1 Simulazione del modello con impianto radiante a soffitto parziale e controllo climatico

L'andamento della temperatura dell'aria della zona 1 è simile a quelle già mostrate in precedenza. Si noterebbero differenze solamente se guardati nel dettaglio i valori delle temperature.

Più interessante è invece l'andamento della temperatura operante che si può vedere nelle figure 87 e 88.

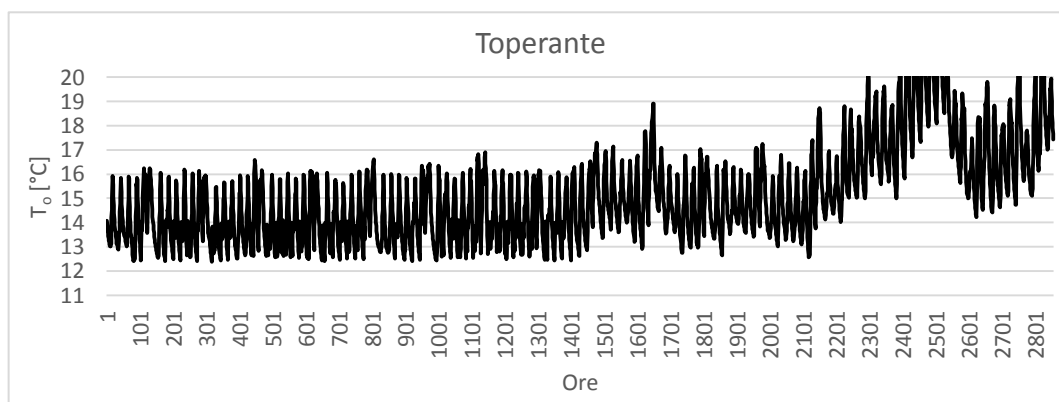


Figura 87 Temperatura operante da gennaio a maggio.

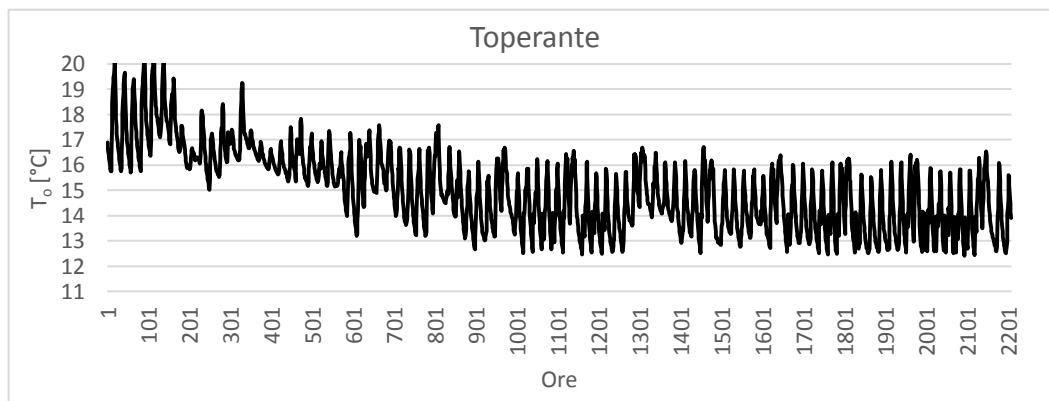


Figura 88 Temperatura operante da ottobre a gennaio.

Dalle figure si vede come il controllo sia migliore. Si riescono a raggiungere i 16°C quando voluti e in solo casi molto rari si supera questo valore.

Questi valori di temperatura operante sono però sottostimati. Nel caso a soffitto parzialmente radiante, il soffitto avrà due temperature medie diverse. In basso quella dovuta all'impianto e in alto quella dovuta agli scambi convettivi con l'aria. Poiché dalla semplificazione assunta per il calcolo dei fattori di vista la parte in alto del soffitto pesa di più rispetto a quanto succede realmente, la temperatura media radiante sarà inferiore rispetto a quella reale, e quindi anche la temperatura operante. Inoltre, il modello del

pannello usato in trnsys dà la stessa resa verso l'interno e verso l'esterno, ma le temperature superficiali sono in parte più basse rispetto a quelle che si avrebbero nella realtà.

Nella tabella 67 è indicato il fabbisogno termico dell'acqua e nella 68 i fabbisogni di tutte le zone confrontati tra il modello convettivo e radiante.

Q _{acqua}	20239	kWh/anno
Ore di funz.	559	Ore/anno

Tabella 67 Dati sul funzionamento dell'impianto.

	Isolato [kWh]	Post [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	15347	0	15347	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	898	604	294	33%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	77774	76861	913	1%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	56738	55681	1057	2%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	76738	76444	294	0%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	76664	75611	1053	1%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	21763	-21763	0%
Totale	304160	306964	-2804	-1%

Tabella 68 Fabbisogni di energia termica finale divisa per zone.

Così come per gli altri 2 modelli, il fabbisogno dell'acqua è superiore rispetto al fabbisogno della zona 1 se avesse un impianto di tipo convettivo ma si hanno altri tipi di vantaggi. In generale, si hanno comunque dei risparmi energetici nelle altre zone ma sono molto limitati e quasi trascurabili. Rispetto al caso del modello che considera la stessa configurazione di impianto ma a temperatura costante, il fabbisogno dell'acqua è aumentato di circa 700 kWh perché l'impianto deve funzionare a temperature più alte durante certi periodi dell'anno.

Se si considerasse il pannello radiante senza lo strato di isolamento portante, l'impianto funzionerebbe di più e si avrebbero i fabbisogni della tabella 69.

Q _{acqua}	21988	kWh/anno
Ore di funz.	593	Ore/anno

Tabella 69 Dati funzionali dell'impianto considerato.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	15347	0	15347	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	898	619	279	31%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	77774	76970	804	1%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	56738	55837	901	2%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	76738	76505	234	0%

Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	76664	75734	931	1%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	23643	-23643	0%
Totale	304160	309307	-5147	-2%

Tabella 70 Fabbisogni delle zone pre e post-instalzione dell'impianto considerato.

Anche in questo caso aumenta il numero di ore di funzionamento dell'impianto e il fabbisogno dell'acqua. Quasi tutto l'aumento del fabbisogno totale di energia termica è dovuto all'acqua calda di riscaldamento.

8.3.4 Impianto radiante a soffitto installato su parete parziale (50%) con controllo climatico

L'ultima configurazione dell'impianto radiante a soffitto consiste nel considerare solo 50% della superficie del soffitto attiva. In particolare, la parete è coperta per il 70% ma considerando che la parte attiva del pannello è del 70%, in totale solo il 50% della superficie del tetto inclinato è effettivamente attivo. Si cerca quindi di diminuire ancora il numero dei pannelli e verificare se si riescono a raggiungere le condizioni interne volute. Poiché già il caso considerante il 60% della superficie attiva necessitava di un controllo di tipo climatico, questo viene previsto a maggior ragione anche per questa configurazione.

La retta di regolazione ha una pendenza di -0.15 e assicura una temperatura dell'acqua di circa 40°C a una temperatura esterna di -10. In questo caso, come in quello precedente durante i giorni più freddi dell'anno si va ad alimentare i pannelli a una temperatura di massimo 40°C. Anche con questa configurazione, si hanno gradini termici di poco superiori a quelli voluti in fase di riscaldamento come si può vedere per esempio nella figura 89.

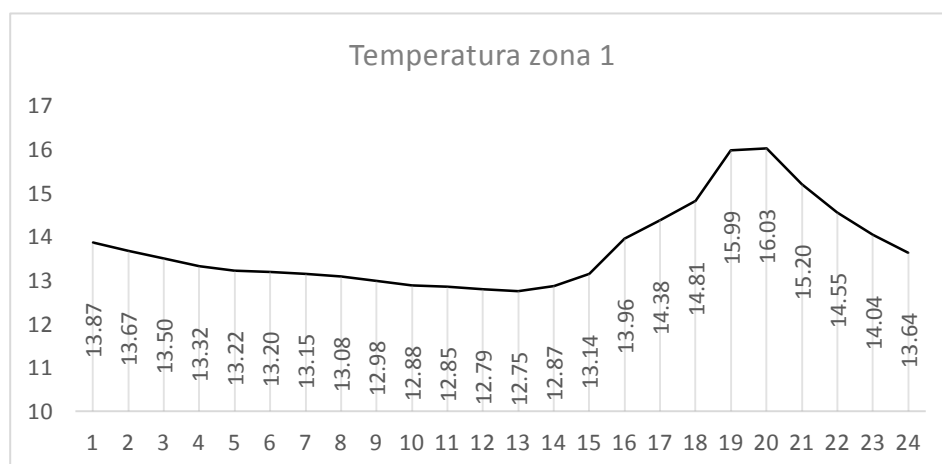


Figura 89 Dinamica termica della zona 1 durante una giornata.

La superficie totale su cui si applicano i pannelli radianti è di 432 m² di cui sono effettivamente attivi 302 m². Nella tabella sotto, si riportano il numero di circuiti considerati in totale, il numero di pannelli, la portata per circuito e le perdite di carico per circuito.

Numero circuiti	Numero pannelli	Portata per circuito [l/h]	Perdite di carico per circuito [mca]
180	360	10	2.04

Tabella 71 Configurazione d'impianto considerato.

In totale, si ha una portata circolante di circa 1800 l/h e le perdite di carico per ogni circuito sono di 2.04 mca. La temperatura dell'acqua all'ingresso dei tubi varia tra i 32 e i 40 °C.

8.3.4.1 Simulazione del modello con impianto radiante a soffitto parziale (50% attivo)

La figura con l'andamento della temperatura dell'aria della zona 1 è simile a quella del caso considerante il 60% della superficie attiva. Guardando l'intero anno in considerazione, non si notano differenze.

L'andamento della temperatura operante è invece mostrato nelle figure 90 e 91.

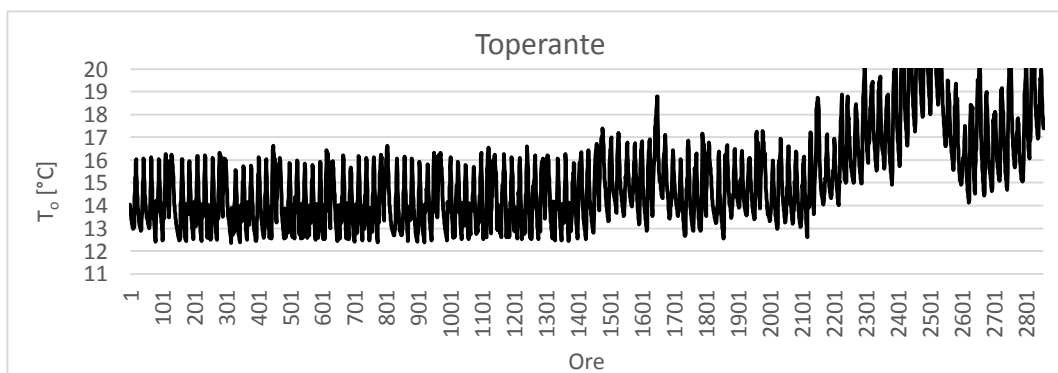


Figura 90 Temperatura operante da gennaio a maggio.

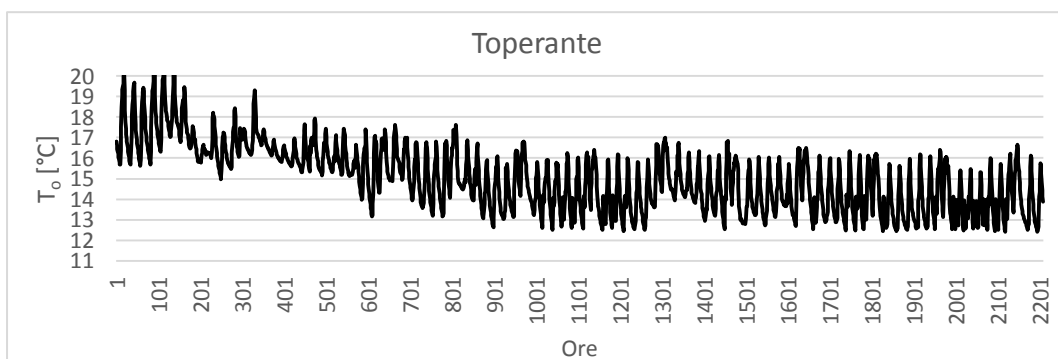


Figura 91 Temperatura operante da ottobre a gennaio.

Dalle figure si vede come il controllo sia accettabile. Si riescono a raggiungere i 16°C voluti in quasi tutto l'anno. Come per il caso a parete parziale con 60% della superficie effettivamente attiva, i valori delle temperature medie radianti e quindi di quelle operative, sono sottostimati.

Nella tabella 72 è indicato il fabbisogno termico dell'acqua e nella 73 i fabbisogni di tutte le zone confrontati tra il modello convettivo e radiante.

Q _{acqua}	19706	kWh/anno
Ore di funz.	611	Ore/anno

Tabella 72 Dati di funzionamento dell'impianto studiato.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio %
Zona 1 (Sala)	15347	0	15347	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	898	627	271	30%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	77774	76976	797	1%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	56738	55800	938	2%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	76738	76509	230	0%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	76664	75741	923	1%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	21190	-21190	0%
Totale	304160	306843	-2684	-1%

Tabella 73 Fabbisogni di energia termica finale pre e post-installazione dell'impianto.

Il fabbisogno dell'acqua rimane maggiore rispetto a quello della zona 1 con un impianto convettivo. I fabbisogni dell'acqua e totale dell'edificio rimangono circa gli stessi degli altri casi studiati. Questa configurazione avrebbe quindi un costo di installazione minore e porterebbe agli stessi fabbisogni dell'edificio. La differenza dalle altre configurazioni studiate però sta nel fatto che per una parte dell'anno questa configurazione di impianto deve funzionare a temperature maggiori e quindi si hanno qualità dell'energia termica diverse.

Se si considerasse il pannello radiante senza lo strato di isolante portante l'impianto funzionerebbe di più e si avrebbero i fabbisogni della tabella 74.

Q _{acqua}	21367	kWh/anno
Ore di funz.	646	Ore/anno

Tabella 74 Dati sul funzionamento della configurazione in esame.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	15347	0	15347	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	898	636	261	29%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	77774	77050	724	1%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	56738	55914	825	1%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	76738	76550	189	0%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	76664	75824	840	1%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	22976	-22976	0%
Totale	304160	308949	-4789	-2%

Tabella 75 Fabbisogni di energia finale suddivisa per zona e relativi risparmi.

Confrontando la stessa configurazione di impianto ma considerando o meno lo stato di isolante del pannello radiante, si hanno differenze soltanto sul fabbisogno termico dell'acqua che rimane però in linea con le differenze degli altri casi.

8.4 Caso 2

In questa parte del capitolo viene analizzato il caso di installazione dell'impianto radiante a soffitto dopo l'intervento di miglioramento dell'involucro 2. Si studieranno le stesse configurazione d'impianto del caso 1.

La geometria, e le portate in gioco sono uguali a quelle relative al caso 1.

La configurazione del circuito del pannello a soffitto considerato in Trnsys è esposta nella tabella 76.

Passo tra tubi	100 mm
Diametro esterno	6 mm
Spessore	1 mm
Conduttività termica	0.35 W/mK

Tabella 76 Configurazione idronica del pannello radiante considerato in Trnsys.

8.4.1 Modello dell'impianto radiante a soffitto installato su tutta la superficie

Si suppone l'installazione dell'impianto radiante a soffitto su tutto il tetto inclinato nord e sud. Si installano i pannelli su tutta la superficie, ma la superficie realmente attiva è di circa 70%.

La stratigrafia del tetto inclinato attivo è stata corretta con i valori delle conducibilità termiche fittizie calcolate con Mirage appositamente per il caso di intervento sull'involucro 2.

La superficie totale su cui si applicano i pannelli radianti è di 605 m². Nella tabella sotto, si riportano il numero di circuiti considerati in totale, il numero di pannelli, la portata per circuito e le perdite di carico per circuito.

Numero circuiti	Numero pannelli	Portata per circuito [l/h]	Perdite di carico per circuito [mca]
252	504	10	2.04

Tabella 77 Numero di pannelli e circuiti della configurazione studiata.

In totale, si ha una portata circolante di circa 2520 l/h e le perdite di carico per ogni circuito sono di 2.04 mca. La temperatura di ingresso dell'acqua nei pannelli radianti è di 30°C che permettono di rispettare il limite sul gradino termico massimo imposto per il riscaldamento dell'aria.

8.4.1.1 Simulazione del caso a impianto radiante sull'intera superficie del tetto inclinato

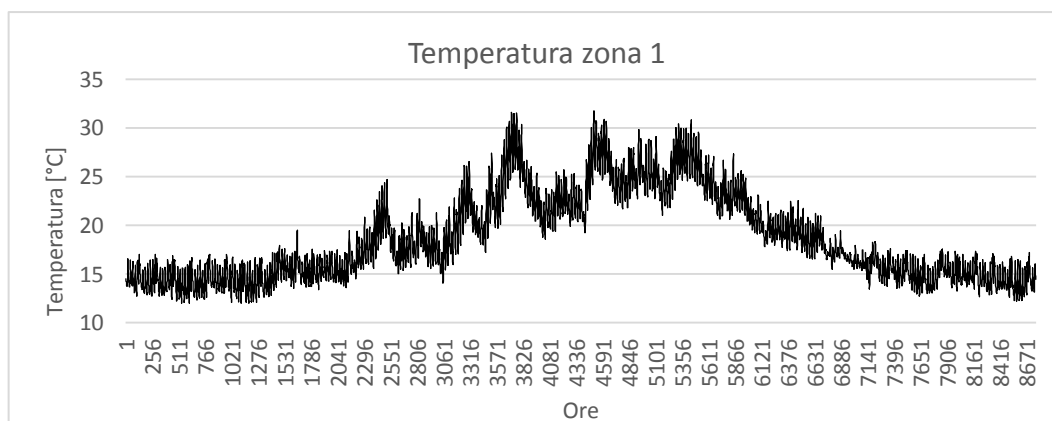


Figura 92 Temperatura della zona 1.

La figura 92 mostra l'andamento della temperatura dell'aria della chiesa durante tutto l'anno. La temperatura dell'aria della chiesa, durante l'inverno, rimane tra le due temperature imposte. A differenza dell'impianto radiante a pavimento, la temperatura raggiunge il set-back molto più frequentemente. Rispetto alla stessa configurazione d'impianto ma applicata nel caso 1, si ha una temperatura mediamente più alta, infatti si vede come la temperatura dell'aria scenda sotto i 13 °C in soli 3 periodi.

Nella figura 83 è rappresentata la temperatura dell'aria in dettaglio durante una giornata invernale

casuale. Il gradino di temperatura imposto viene rispettato, ma questo non è sempre vero per tutte le giornate. In genere comunque il gradino massimo registrato è di 1.1 °C/h. Rispetto al modello con impianto convettivo la dinamica della temperatura è più smorzata, ma rispetto all'impianto a pavimento lo è meno. Nella figura 94 invece si rappresenta l'andamento della temperatura durante un'intera settimana. Si può vedere come persista il problema del soprariscaldamento durante le domeniche.

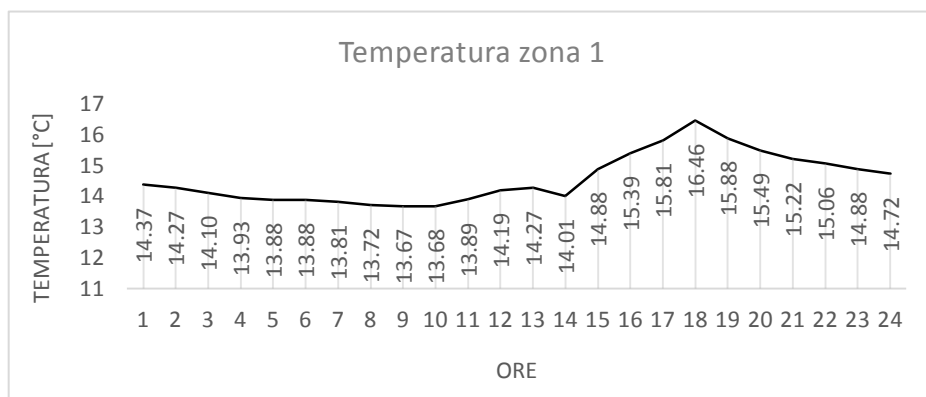


Figura 93 Temperatura della zona 1 durante una giornata.

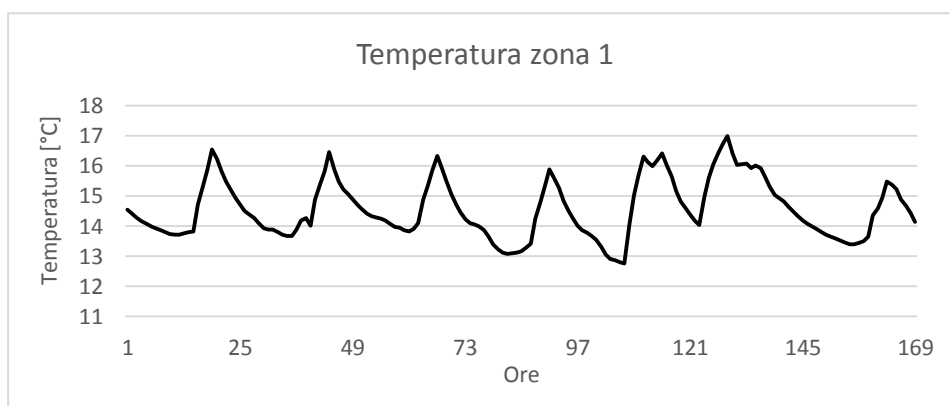


Figura 94 Andamento della temperatura durante una settimana invernale.

Nelle figure 95 e 96 sono invece rappresentate le temperature operative rispettivamente nella prima parte della stagione di riscaldamento e nella seconda. Le temperature operative minime negli orari dell'uso della chiesa stanno sempre posizionate intorno ai 16 °C come voluto. Per la maggior parte del tempo però la chiesa è soprariscaldata. Come visto per le diverse configurazioni di impianto installate dopo caso di miglioramento dell'involucro 1, l'installazione dell'impianto a soffitto su tutta la superficie porta a dispendi energetici simili a quelli a soffitto parziale. Per questo motivo non si prevede un controllo di tipo climatico in quanto questa tipologia di configurazione può costare fino al 30% in più rispetto agli altri casi e l'aggiunta del controllo climatico può far ridurre i consumi energetici di massimo 5%.

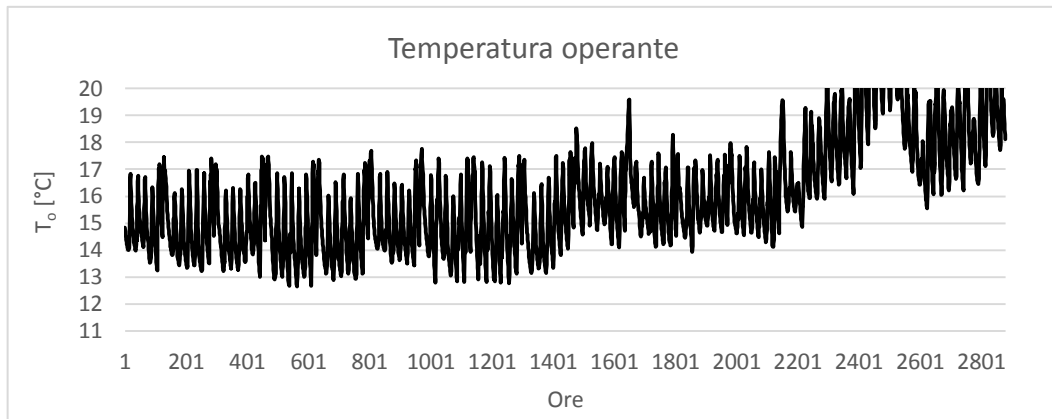


Figura 95 Temperatura operante da gennaio a maggio.

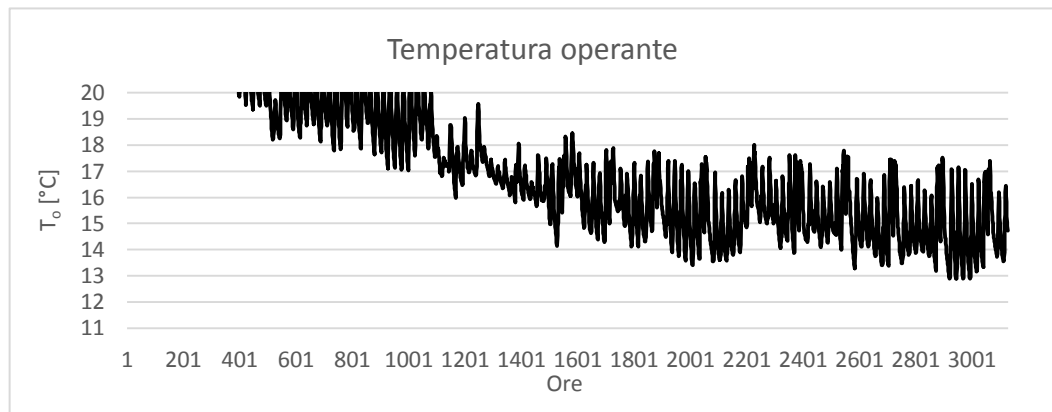


Figura 96 Temperatura operante da ottobre a gennaio.

Dal punto di vista energetico, i risultati della simulazione sono illustrati nella tabella 78 che indica il valore dell'energia termica da fornire all'acqua e il numero di ore di funzionamento dell'impianto.

Q _{acqua}	13775	kWh/anno
Ore di funz.	364	Ore/anno

Tabella 78 Dati funzionali della configurazione studiata.

Nella tabella 79 si vedono invece i fabbisogni di energia termica finale zona per zona considerando un ipotetico impianto convettivo e quello radiante con la configurazione studiata.

L'installazione dell'impianto radiante a soffitto non ha portato a risparmi di energia termica finale se considerato l'intero edificio ma anzi, aumenta il fabbisogno di energia finale di 1091 kWh/anno che in termini assoluti è meno rispetto allo stesso caso ma applicato dopo il miglioramento dell'involucro 1. In termini relativi, questo caso ha un peso maggiore ma comunque sta sotto l'1 %.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	8577	0	8577	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	559	317	242	43%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	56759	55429	1330	2%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	43473	42172	1300	3%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	46549	45777	772	2%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	58295	56794	1501	3%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	14812	-14812	0%
Totale	214212	215302	-1091	-1%

Tabella 79 Fabbisogni di energia termica finale e relativi risparmi.

In totale, il fabbisogno dell'acqua di riscaldamento è maggiore del 73% rispetto a quello della zona 1 e responsabile dell'8% del fabbisogno totale. I risparmi energetici delle altre zone sono bassi si aggirano tra il 2 e il 3%. Si possono fare le stesse conclusioni fatte quando si è studiata questa configurazione dopo il miglioramento dell'involucro 1.

Per confrontare il modello dell'impianto radiante a soffitto e a pavimento si è creato anche il modello di questa configurazione ma che non prevede lo strato di EPS250 del pannello. In questo modo si possono confrontare le due scelte impiantistiche a parità di trasmittanza.

Dal punto di vista delle temperature, quelle operanti e dell'aria durante l'anno rimangono simili. Dal punto di vista energetico ci sono delle differenze sul fabbisogno termico dell'acqua dell'impianto.

Nella tabella 80 ci sono i dati relativi al fabbisogno di energia termica per l'acqua di riscaldamento e delle ore di funzionamento.

Q _{acqua}	14538	kWh/anno
Ore di funz.	377	Ore/anno

Tabella 80 Dati funzionali dell'impianto considerato.

Per i fabbisogni termici e i relativi risparmi rispetto a un ipotetico impianto convettivo, si può consultare la tabella 81.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	8577	0	8577	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	559	326	233	42%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	56759	55519	1240	2%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	43473	42294	1178	3%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	46549	45828	721	2%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	58295	56896	1399	2%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	15633	-15633	0%
Totale	214212	216497	-2286	-1%

Tabella 81 Fabbisogni di energia termica finale differenziati per zona.

Poiché in questo caso l'involucro è già molto isolato, c'è poca differenza sul funzionamento dell'impianto. L'impianto infatti lavora per 13 ore in più e ha un fabbisogno energetico di circa 800 kWh maggiore.

8.4.2 Impianto radiante a soffitto installato su soffitto parziale

Si è considerata una superficie effettivamente attiva del 60% di quella reale (considerando già che il pannello è effettivamente attivo per il 70% della sua superficie).

La superficie totale su cui si applicano i pannelli radianti è di 520 m². Nella tabella sotto, si riportano il numero di circuiti considerati in totale, il numero di pannelli, la portata per circuito e le perdite di carico per circuito.

Numero circuiti	Numero pannelli	Portata per circuito [l/h]	Perdite di carico per circuito [mca]
216	432	10	2.04

Tabella 82 Dati sulla configurazione dell'impianto.

In totale, si ha una portata circolante di circa 2160 l/h e le perdite di carico per ogni circuito sono di 2.04 mca. La temperatura di ingresso dell'acqua nei pannelli è stata considerata di 35°C. Questa temperatura dovrebbe assicurare la temperatura minima operativa con la temperatura minima esterna. Poiché la temperatura dell'acqua è maggiore rispetto al caso precedente, ci si aspetta un gradino termico eccessivo.

8.4.2.1 Simulazione del modello con impianto radiante a soffitto parziale

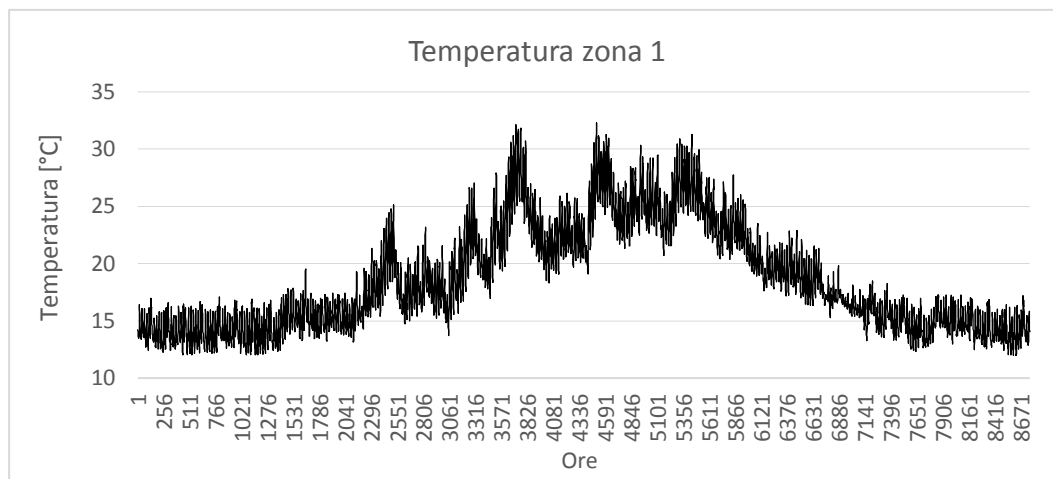


Figura 97 Andamento della temperatura dell'aria nella zona 1.

Nella figura 97 si possono vedere le temperature della zona 1 durante tutto l'anno di simulazione. In questo caso si vede come diminuendo la superficie radiante, la chiesa sia effettivamente più fredda. L'andamento della temperatura dell'aria interna giornaliera è simile a quella del caso precedente. La dinamica termica della settimana di riferimento è mostrata nella figura 98. Si può vedere come la fase di raffreddamento sia più veloce.

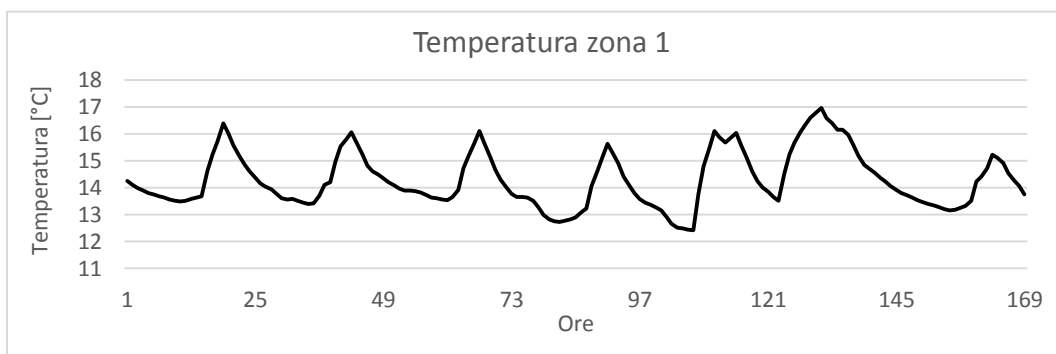


Figura 98 Temperatura della zona 1 durante una settimana.

Nelle figure 99 e 100 ci sono rappresentate le temperature operanti. Le temperature operanti raggiungono i target voluti a parte in qualche rara occasione. Verrà previsto un controllo climatico per ridurre le temperature eccessive e cercare di raggiungere i 16°C voluti sempre. In generale la chiesa è più fredda rispetto al caso precedente.

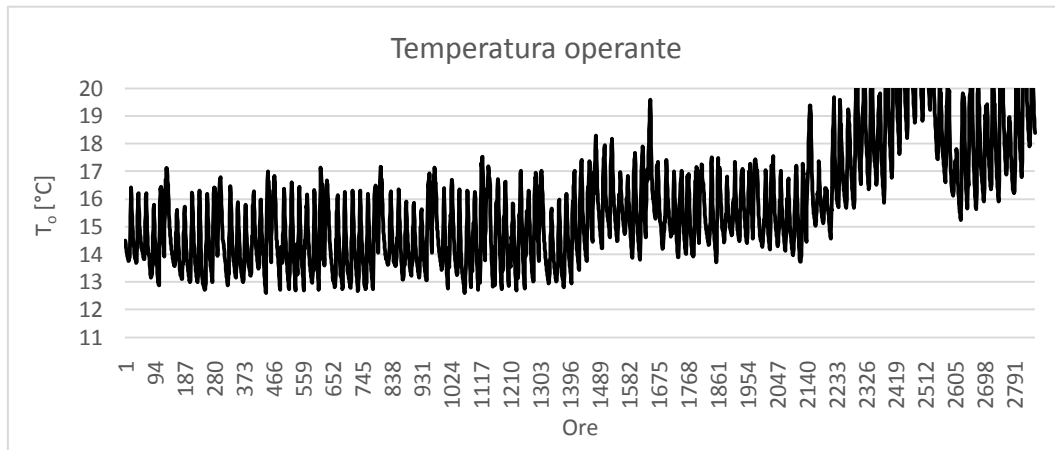


Figura 99 Temperatura operante da gennaio a maggio.

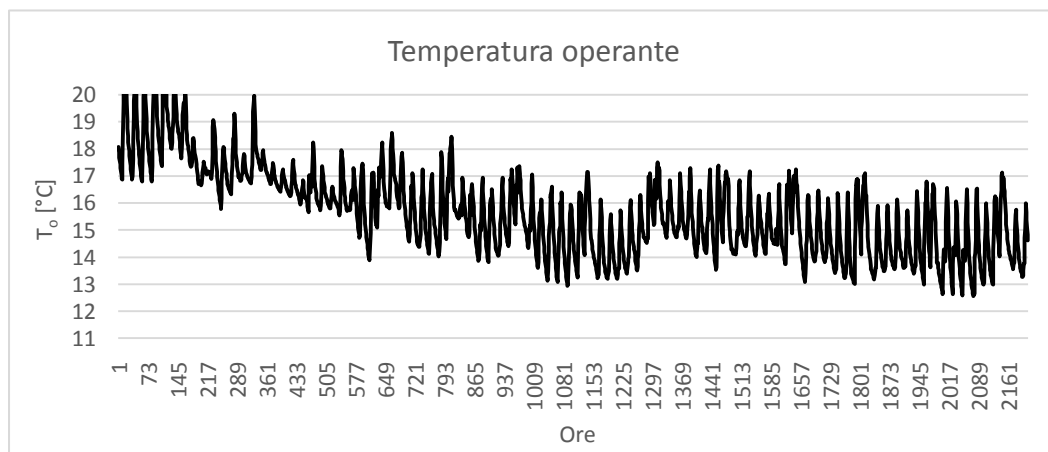


Figura 100 Temperatura operante da ottobre a gennaio.

Dal punto di vista dell'impianto, nella tabella 83 sono indicati il fabbisogno di energia dell'acqua di riscaldamento compreso il rendimento di emissione e controllo, e il numero di ore di funzionamento dell'impianto. La tabella 84 indica invece i fabbisogni di energia finale zona per zona.

Q _{acqua}	13218	kWh/anno
Ore di funz.	398	Ore/anno

Tabella 83 Funzionamento dell'impianto radiante.

Dalla tabella dei fabbisogni zona per zona si può effettivamente vedere come il fabbisogno dell'acqua varia poco rispetto al considerare la configurazione con tutto il tetto ricoperto da pannelli radianti.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	8577	0	8577	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	559	348	211	38%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	56759	55616	1143	2%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	43473	42371	1101	3%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	46549	45885	664	1%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	58295	57005	1290	2%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	14213	-14213	0%
Totale	214212	215438	-1227	-1%

Tabella 84 Fabbisogni di energia finale suddivisi per zona.

Il fabbisogno di energia finale della sola acqua di riscaldamento è di 14213 kWh/anno, corrispondente a circa l'8% del fabbisogno totale dell'edificio

Come fatto per il modello con impianto radiante a soffitto totale, si è studiato anche il modello che non considera lo strato aggiuntivo di isolamento del pannello radiante.

Nelle tabelle 85 e 86 si indicano i dati relativi all'impianto e ai fabbisogni dell'edificio.

Q _{acqua}	13815	kWh/anno
Ore di funz.	410	Ore/anno

Tabella 85 Parametri funzionali dell'impianto.

L'impianto in questo caso lavora per 12 ore in più e ha un fabbisogno di energia termica maggiore di 600 kWh.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	8577	0	8577	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	559	352	207	37%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	56759	55654	1105	2%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	43473	42429	1043	2%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	46549	45906	643	1%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	58295	57048	1247	2%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	14855	-14855	0%
Totale	214212	216244	-2032	-1%

Tabella 86 Fabbisogni energetici delle zone e relativi risparmi.

Come nel caso dell'impianto a soffitto totale, il fabbisogno energetico è di poco maggiore. L'aumento del fabbisogno è dato quasi totalmente da quello dell'acqua.

8.4.3 Impianto radiante a soffitto installato su parete parziale con controllo climatico

Per cercare di limitare gli eccessi di riscaldamento e di migliorare il controllo del comfort si è previsto il controllo climatico per quanto riguarda l'impianto a soffitto parziale con 60% della superficie del tetto attivo. Nel caso in esame la retta di regolazione ha una pendenza di -0.15 e assicura una temperatura dell'acqua di circa 36.5°C a una temperatura esterna di -10 °C.

La superficie totale su cui si applicano i pannelli radianti è di 520 m². Nella tabella sotto, si riportano il numero di circuiti considerati in totale, il numero di pannelli, la portata per circuito e le perdite di carico per circuito.

Numero circuiti	Numero pannelli	Portata per circuito [l/h]	Perdite di carico per circuito [mca]
216	432	10	2.04

Tabella 87 Dati della configurazione d'impianto.

In totale, si ha una portata circolante di circa 2160 l/h e le perdite di carico per ogni circuito sono di 2.04 mca. La temperatura dell'acqua all'ingresso dei tubi varia tra i 32.5 e i 36.5 °C.

8.4.3.1 Simulazione del modello con impianto radiante a soffitto parziale con controllo climatico

Macroscopicamente l'andamento della temperatura dell'aria della zona 1 è simile a quello già mostrato nel caso a temperatura costante.

Più interessante è invece l'andamento della temperatura operante che si può vedere nelle figure 101 e 102.

L'aggiunta del controllo climatico porta a una gestione dell'impianto migliore e da come si vede nelle figure, le temperature operanti raggiunte sono effettivamente quelle imposte. Si consideri però le temperature operanti sono sottostimate rispetto alla realtà per i motivi già esposti in precedenza.

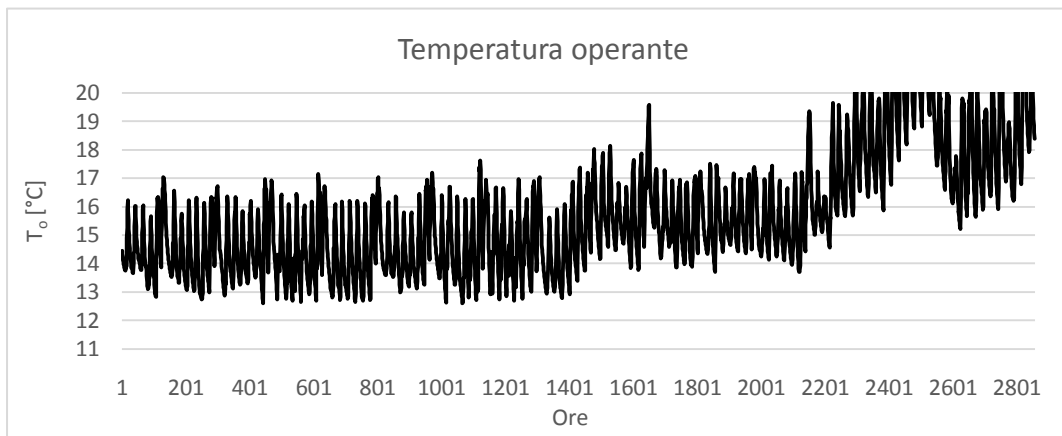


Figura 101 Temperatura operante da gennaio a maggio.

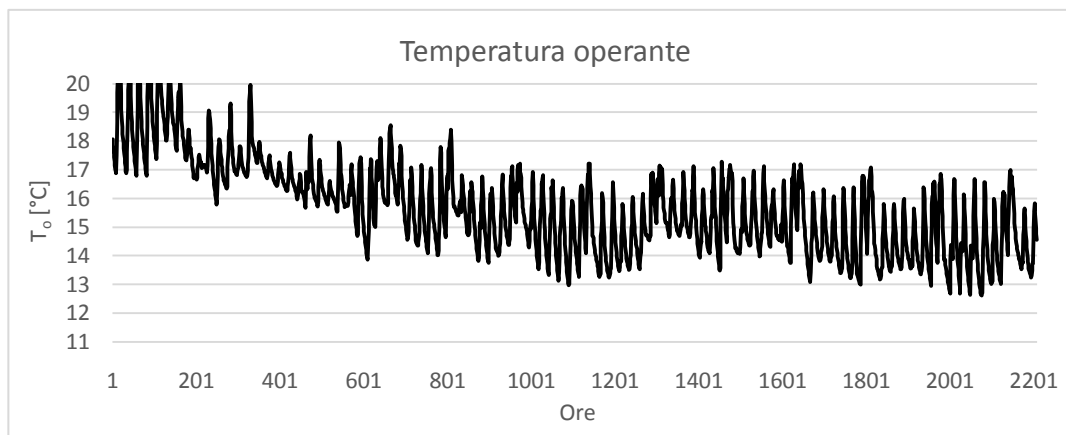


Figura 102 Temperatura operante da ottobre a gennaio.

Nelle tabelle 88 e 89 sono indicati il fabbisogno termico dell'acqua e le ore di funzionamento dell'impianto considerando la stessa configurazione ma i pannelli diversi. In particolare, la prima tabella è riferita all'impianto composto dai veri pannelli radianti e la seconda con i pannelli senza lo strato di isolante aggiuntivo.

Q _{acqua}	13117	kWh/anno
Ore di funz.	402	Ore/anno

Tabella 88 Dati sul funzionamento dell'impianto considerando il pannello vero.

Q _{acqua}	13624	kWh/anno
Ore di funz.	411	Ore/anno

Tabella 89 Dati sul funzionamento dell'impianto considerando il pannello senza isolante.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	8577	0	8577	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	559	349	210	37%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	56759	55630	1129	2%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	43473	42384	1089	3%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	46549	45893	656	1%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	58295	57022	1273	2%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	14104	-14104	0%
Totale	214212	215383	-1171	-1%

Tabella 90 Fabbisogni energetici con impianto radiante e convettivo.

L'introduzione del controllo climatico, porta a un risparmio energetico lato acqua di circa 100 kWh e aumenta il tempo di funzionamento di 4 ore.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	8577	0	8577	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	559	356	203	36%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	56759	55682	1078	2%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	43473	42454	1019	2%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	46549	45922	627	1%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	58295	57080	1216	2%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	14649	-14649	0%
Totale	214212	216142	-1930	-1%

Tabella 91 Fabbisogni energetici e risparmi con impianto radiante senza l'isolamento aggiuntivo.

Anche in questo caso ci sono poche differenze nel considerare il vero pannello o quello senza lo strato di EPS250. Questo è dovuto al fatto che l'involucro in questo caso studio è altamente isolato.

8.4.4 Impianto radiante a soffitto installato su parete parziale (50%)

L'ultima configurazione dell'impianto radiante a soffitto consiste nel considerare solo 50% della superficie attiva. Come nel caso 1, si cerca di diminuire ancora il numero dei pannelli e verificare se si riescono a raggiungere le condizioni interne volute.

La retta di regolazione ha una pendenza di -0.15 e assicura una temperatura dell'acqua di circa 37.5°C a una temperatura esterna di -10 °C. Anche con questa configurazione, si avranno gradini termici leggermente superiori a quelli voluti in fase di riscaldamento.

La superficie totale su cui si applicano i pannelli radianti è di 432 m² di cui sono effettivamente attivi 302 m². Nella tabella sotto, si riportano il numero di circuiti considerati in totale, il numero di pannelli, la portata per circuito e le perdite di carico per circuito.

Numero circuiti	Numero pannelli	Portata per circuito [l/h]	Perdite di carico per circuito [mca]
180	360	10	2.04

Tabella 92 Configurazione d'impianto.

In totale, l'impianto ha una portata circolante di circa 1800 l/h e le perdite di carico per ogni circuito sono di 2.04 mca. La temperatura dell'acqua all'ingresso dei tubi varia tra i 33.5 e i 37.5 °C.

8.4.4.1 Simulazione del modello con impianto radiante a soffitto parziale (50% attivo)

La temperatura dell'aria interna della chiesa oscilla tra i 12 e i 16°C durante la giornata. Il grafico che mostra l'andamento macroscopico quindi è molto simile a quello dell'impianto su 60% della superficie.

Le temperature operanti invece sono mostrate nelle figure 103 e 104.

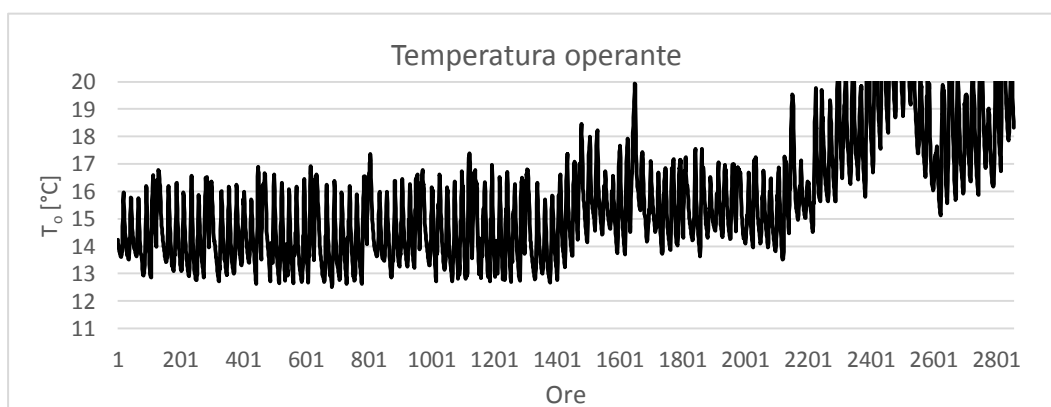


Figura 103 Temperatura operante da gennaio a maggio.

Dalle figure si vede come il controllo sia accettabile. Si riescono a raggiungere i 16°C quando voluto ma in qualche occasione la chiesa continua a risultare soprariscaldata.

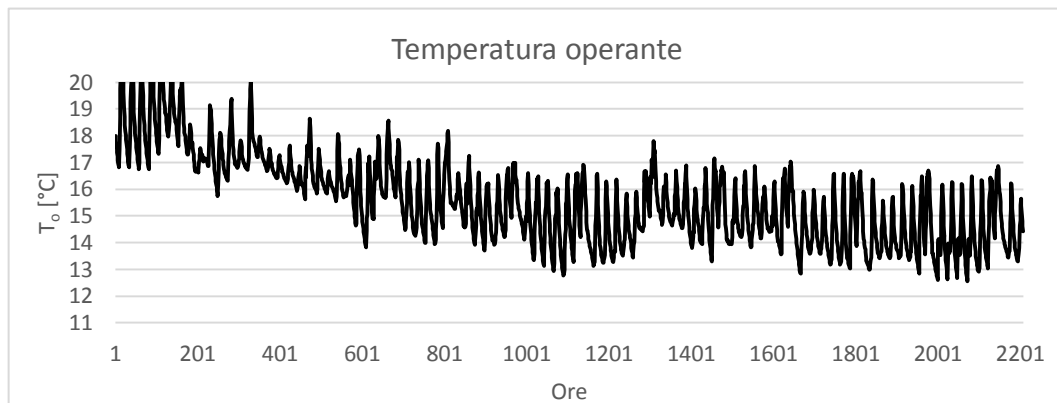


Figura 104 Temperatura operante da ottobre a gennaio.

Nella tabella 93 sono indicati il fabbisogno termico dell'acqua e nella 94 i fabbisogni di tutte le zone confrontati tra il modello convettivo e radiante.

Q _{acqua}	12622	kWh/anno
Ore di funz.	449	Ore/anno

Tabella 93 Fabbisogno dell'impianto radiante.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	8577	0	8577	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	559	367	192	34%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	56759	55727	1032	2%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	43473	42479	994	2%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	46549	45949	600	1%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	58295	57131	1164	2%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	13572	-13572	0%
Totale	214212	215226	-1014	0%

Tabella 94 Fabbisogni termici finali delle zone prima e dopo l'installazione dell'impianto radiante.

Se si considerasse il pannello radiante senza lo strato di isolante portante l'impianto funzionerebbe quasi nelle stesse condizioni. Il numero di ore di funzionamento e il fabbisogno dell'acqua sono mostrati nella tabella 95.

Q _{acqua}	13048	kWh/anno
Ore di funz.	456	Ore/anno

Tabella 95 Fabbisogno dell'impianto radiante.

	Convettivo [kWh]	Radiante [kWh]	Risparmio [kWh]	Risparmio
Zona 1 (Sala)	8577	0	8577	100%
Zona 2 (Stanza piano superiore)	559	372	187	33%
Zona 3 (Ingresso)	0	0	0	0%
Zona 4 (Bagni e stanze piano terra)	56759	55771	988	2%
Zona 5 (Asilo e sala conferenze)	43473	42538	934	2%
Zona 6 (Zona coro e stanze)	46549	45974	575	1%
Zona 7 (Dormitorio e spazio comune)	58295	57181	1115	2%
Zona 8 (Scale)	0	0	0	0%
Q da fornire all'acqua calda	0	14030	-14030	0%
Totale	214212	215866	-1654	-1%

Tabella 96 Fabbisogni termici finali per zona prima e dopo l'installazione dell'impianto.

8.5 Riepilogo

Nella tabella 97 sono mostrati i risultati dei casi esaminati e, per ogni caso, rappresentano il numero di ore di funzionamento, il fabbisogno dell'acqua di riscaldamento e il fabbisogno del resto dell'edificio.

	Ore di funz. [h]	Q _{acqua} [kWh]	Q _{resto,edificio} [kWh]	Q _{tot} [kWh]
Caso 1				
Soffitto 70%	499	20897	284670	305567
Soffitto 60%	591	21372	285400	306773
Soffitto 60% e controllo	559	21763	285201	306964
Soffitto 50% e controllo	646	22976	285974	308949
Soffitto 70% non isolato	558	24103	285300	309403
Soffitto 60% non isolato	629	23309	285817	309126
Soffitto 60% contr. non isolato	593	23643	285664	309307
Soffitto 50% e contr. non isolato	646	22976	285974	308949
Caso 2				
Soffitto 70%	364	14812	200490	215302
Soffitto 60%	398	14213	201225	215438
Soffitto 60% e controllo	402	14104	201279	215383
Soffitto 50% e controllo	449	13572	201654	215226
Soffitto 70% non isolato	377	15633	200864	216497
Soffitto 60% non isolato	410	14855	201389	216244
Soffitto 60% contr. non isolato	411	14649	201493	216142
Soffitto 50% e contr. non isolato	456	14030	201836	215866

Tabella 97 Riepilogo delle diverse configurazioni di impianto adottate per il caso 1 e 2

Dall'analisi della tabella si può vedere come il fabbisogno dell'acqua di riscaldamento è simile per le 4 configurazioni di impianto studiate ma la qualità dell'energia termica è diversa tra un caso e l'altro a causa della diversa temperatura di alimentazione.

Nel caso di edificio mediamente isolato, il fabbisogno dell'acqua risente di più (anche se poco) dalle diverse configurazioni impiantistiche rispetto all'edificio molto isolato.

Si può quindi dire che a parità di comfort si può attivare sempre meno superficie del soffitto e si avrà un fabbisogno dell'acqua di riscaldamento simile ma si dovranno alzare le temperature di alimentazione e il numero di ore di funzionamento.

Per il caso 1, andare a supporre una superficie attiva minore del 50% comporta temperature eccessivamente alte e problemi di gestione del gradino termico imposto. Il limite minimo della superficie attiva per il caso 1 è quindi di 50%

Nel caso 2 rimane comunque il problema del gradino termico, ma si potrebbe diminuire ancora la superficie effettivamente attiva perché si hanno meno dispersioni e si può sfruttare meglio l'energia termica.

9 Confronti

In questo capitolo vengono fatti i confronti in termini energetici ed economici dei risultati delle varie configurazioni di impianto studiate. La prima analisi fatta sarà di tipo puramente energetico, confrontando le diverse configurazioni impiantistiche solo dal punto di vista del fabbisogno di energia termica, considerando quindi il sistema di generazione già esistente. In una seconda analisi, verrà prevista una pompa di calore acqua/acqua e si studierà la fattibilità economica di questi sistemi. In questa seconda analisi verranno considerate anche le spese elettriche per i pompaggi dell'acqua e i costi di investimento relativi alle sonde geotermiche e alle pompe di calore.

9.1 La pompa di calore

Poiché l'impianto radiante (sia a pavimento che a soffitto) richiede delle temperature di funzionamento relativamente basse, si è deciso di prevedere un sistema di generazione basato su pompe di calore acqua/acqua. La valutazione dei consumi energetici dell'intero sistema di riscaldamento è stata fatta con un approccio semplificato che è esposto di seguito.

Dai dati delle simulazioni, si è estrapolato il valore massimo di potenza termica richiesta dall'acqua di riscaldamento. Sia per il caso di installazione degli impianti radianti dopo il miglioramento dell'involucro 1 che nel caso del miglioramento dell'involucro 2, la potenza massima richiesta è di circa $70 \text{ kW}_{\text{th}}$ per gli impianti radianti a pavimento e di $50 \text{ kW}_{\text{th}}$ per gli impianti radianti a soffitto.

Da questi dati si sono cercate delle pompe di calore acqua/acqua commercializzate e si è scelto una macchina specifica per ognuno dei 2 casi. Per queste macchine si è in possesso dei valori del COP e delle rese nelle condizioni fissate dal produttore.

In particolare, la tabella 98 espone i parametri di funzionamento delle macchine considerando la sorgente ad acqua con temperatura di ingresso di 10°C e uscita di 7°C ; per l'acqua lato impianto i riferimenti sono dati dalla temperatura di ingresso di 30°C e quella di uscita di 35°C .

	Macchina 1	Macchina 2
Potenza termica [kW]	69.10	48.10
Potenza assorbita [kW]	12.70	8.86
COP	5.44	5.43

Tabella 98 COP delle pompe di calore scelte in condizioni nominali.

Condizioni nominali		
	Evaporatore	Condensatore
Temperatura di ingresso [°C]	10	30
Temperatura di uscita [°C]	7	35

Tabella 99 Condizioni di riferimento per i dati di targa delle pompe di calore.

Questi valori, riferiti al funzionamento in condizioni nominali, devono essere corretti considerando la reale temperatura della sorgente e le reali temperature che si usano negli impianti studiati.

Per la stima dei consumi energetici si è considerata una temperatura di sorgente costante e pari a 9°C e una differenza di temperatura all'evaporatore di 3°C. Per le temperature lato condensatore, si sono usate le temperature delle simulazioni ora per ora.

Per la valutazione del COP medio stagionale si è seguito il seguente procedimento. In primo luogo, si è calcolato il coefficiente di performance di un ciclo di Carnot (COP ideale). I valori delle temperature delle relazioni sottostanti sono da esprimere in K.

$$COP_{id} = \frac{T_{cond}}{T_{cond} - T_{evap}}$$

$$T_{cond} = \frac{T_{w,in,cond} + T_{w,out,cond}}{2} + 5$$

$$T_{evap} = \frac{T_{w,in,evap} + T_{w,out,evap}}{2} - 5$$

In secondo luogo, si sono calcolati i valori del COP orari e del consumo elettrico della pompa di calore con le relazioni:

$$COP = COP_{id} \frac{COP_{nom}}{COP_{id,nom}}$$

$$E_{hp} = \frac{Q_w}{COP}$$

Dove:

- COP_{id} è il COP ideale del ciclo di Carnot in quell'ora di riferimento
- COP_{nom} è il COP nominale della macchina
- $COP_{id,nom}$ è il COP ideale nelle condizioni di riferimento

Il COPS è dato dal rapporto tra il fabbisogno termico totale e il consumo elettrico totale nella stagione di riscaldamento.

$$COPS = \frac{\sum Q_w}{\sum E_{hp}}$$

9.2 Dimensionamento delle sonde geotermiche

Il dimensionamento delle sonde geotermiche verticali è stato fatto secondo la procedura ASHRAE. Questo metodo permette di identificare la lunghezza totale delle sonde geotermiche e dipende da diversi fattori. La struttura della relazione che si può vedere sotto, è simile a quella che può descrivere un ipotetico caso stazionario e cioè presenta un rapporto tra una differenza di temperatura e la resistenza termica, ma in questo caso la resistenza totale è espressa con dei fattori aggiuntivi. Questi fattori aggiuntivi consentono di considerare il processo di scambio termico con il terreno non di tipo stazionario. Le resistenze aggiuntive dipendono dal fatto che il terreno ha un suo fenomeno di scambio e questo è dato dalle resistenze sonda-terreno medie annuali, mensili e giornalieri.

$$L_h = \frac{q_a \cdot R_{ga} + (q_{th} - \bar{W}_h) \cdot (R_b + PLF_m \cdot R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sc})}{t_g - \left(\frac{t_{wi} + t_{wo}}{2} \right)_h - t_p}$$

Informazioni aggiuntive sul metodo ASHRAE si possono trovare nelle normative di riferimento.

Per il caso in esame, si è considerato solo il fabbisogno di riscaldamento e si è dimensionato la lunghezza delle sonde per 4 casi differenti considerando delle sonde a doppia U. Le caratteristiche del terreno sono state ipotizzate in quanto non si hanno informazioni dettagliate. La lunghezza delle sonde però è fortemente dipendente dalle caratteristiche termiche del terreno, ed essendo le sonde la voce preponderante del costo di investimento, la fattibilità stessa dell'impianto dipende dalle caratteristiche del terreno.

	L_h	Numero sonde
Impianto a pavimento 1	1800	18
Impianto a soffitto 1	1249	12
Impianto a pavimento 2	1650	15
Impianto a soffitto 2	1150	11

Tabella 100 Lunghezza delle sonde considerate per le diverse configurazioni.

9.3 Calcolo delle perdite di carico

Per il calcolo delle perdite di carico si sono usati 2 approcci.

Dal lato impianto, si hanno già le perdite di carico dei pannelli. A queste perdite di carico però vanno aggiunte le perdite dovute ai collettori, agli scambiatori e alla distribuzione. Poiché non si è progettato l'intero impianto idronico, si è assunto una perdita di carico aggiuntiva di 7 mca per gli impianti a pavimento e di 10 mca per gli impianti a soffitto.

Dal lato sonde si è semplificato il problema e si sono calcolate le perdite di carico considerando una portata media di funzionamento.

La portata media circolante è stata calcolata a partire dal fabbisogno termico dell'edificio. Da questo fabbisogno si è calcolata l'energia scambiata con il terreno e da questa si è calcolata la portata media circolante imponendo una differenza di temperatura di 3°C e un tempo di funzionamento pari a quello della tipologia di impianto presa in esame.

$$E_{terreno} = E_w \cdot \left(\frac{1 - SCOP}{SCOP} \right)$$

$$\dot{m}_w = \frac{E_{terreno}}{\Delta T \cdot 4.18 \cdot h}$$

Il valore della portata ottenuto è da considerarsi totale. Per il calcolo delle perdite di carico nelle sonde, si è diviso quindi questa portata per il numero di tubi a U perché si è scelto di alimentare il tutto in parallelo. Successivamente è stata calcolata la velocità dell'acqua nei tubi e il numero di Reynolds. Una volta verificato il regime si sono applicate le correlazioni per la determinazione delle perdite di carico. Le perdite di carico espresse in mm c.a./m sono state calcolate con:

$$r = 1,154 \cdot 10^6 \cdot v \cdot \rho \cdot \frac{G}{D^4}$$

Dove:

- r è la perdita di carico continua unitaria in mm c.a./m per tubi a media rugosità
- ρ è la densità del fluido in kg/m³
- v è la viscosità cinematica del fluido in m²/s
- G è la portata in l/h
- D è il diametro interno in mm

Anche in questo caso, le perdite di carico sono solamente date dalle sonde. Si è scelto di aggiungere altri 6.5 mca perché ci sono da considerare anche i collettori, la distribuzione, gli scambiatori e le valvole.

Per il calcolo della potenza elettrica necessaria per le pompe di circolazione si è usato:

$$P_{el} = \frac{Q \cdot H}{102 \cdot \eta}$$

Dove:

- Q è la portata espressa in l/s
- H sono le perdite di carico in mca
- 102 è un coefficiente per esprimere la P_{el} in kW
- η è il rendimento della pompa.

9.4 Confronti energetici dei diversi sistemi

Poiché sono stati analizzati diversi casi, fare un confronto generale è molto difficile e si rischiano di trascurare certi dettagli. Per questo motivo, i confronti verranno fatti separatamente per gli impianti installati dopo il miglioramento dell'involucro 1 e 2, e in prima analisi separatamente per gli impianti radianti a pavimento e a parete.

Per ragioni di spazio e organizzazione, i vari casi studiati verranno chiamati come elencato in seguito. Il primo numero nel nome del caso studiato significa la considerazione del caso di miglioramento

dell'involucro 1 o 2. Per esempio, 1.2 significa che si sta considerato l'impianto radiante con solaio isolato (2) dopo il miglioramento dell'edificio 1 (1.).

- Impianto radiante a pavimento semplice: 1
- Impianto radiante a pavimento semplice con controllo climatico: 1.c
- Impianto radiante a pavimento con solaio isolato: 2
- Impianto radiante a pavimento con solaio isolato e controllo climatico: 2.c
- Impianto radiante a soffitto totale: ST
- Impianto radiante a soffitto parziale con 60% di superficie attiva: SP60
- Impianto radiante a soffitto parziale con 60% di superficie attiva e controllo climatico: SP60.c
- Impianto radiante a soffitto parziale con 50% di superficie attiva e controllo climatico: SP50.c

Per i casi in cui si confronteranno i fabbisogni a parità di trasmittanza, verranno considerati i modelli degli impianti radianti a soffitto senza considerare lo strato di 3 cm di EPS250. Il nome del caso studiato sarà segnato con un asterisco (*).

9.4.1 Impianti radianti dopo il miglioramento dell'involucro 1

9.4.1.1 Confronto tra gli impianti radianti a pavimento

Nella tabella 101 sono rappresentati i principali risultati delle simulazioni.

	Ore [h]	Q _{acqua} [kWh]	Q _{resto,edificio} [kWh]	E _{el} circolatori [kWh]	Fabbisogno termico totale [kWh]
1.1	567	35816	267689	89	303505
1.1.c	619	34916	268191	97	303106
1.2	553	32071	271815	61	303886
1.2.c	605	31305	272078	67	303384

Tabella 101 Principali dati del funzionamento degli impianti a pavimento.

L'impianto radiante a pavimento senza controllo climatico e senza isolamento del solaio interpiano porta al maggior fabbisogno lato acqua rispetto agli altri casi, ma porta anche il minor fabbisogno di energia termica per il resto dell'edificio. L'aggiunta del controllo climatico riferita all'impianto con solaio non isolato, aumenta le ore di funzionamento dell'impianto perché in questo secondo caso, le temperature operative minime raggiunte sono di 16°C e quindi si riscalda l'ambiente per più tempo ma a temperature più basse. Energeticamente, l'acqua ha un fabbisogno di energia minore di 900 kWh ma il resto dell'edificio, aumenta il suo fabbisogno di 501 kWh. In totale, se consideriamo l'energia della stessa qualità, il risparmio dovuto al controllo climatico è di circa 400 kWh termici/anno.

Un discorso analogo può essere fatto anche confrontato l'impianto radiante a pavimento con solaio isolato.

Dalla tabella si può vedere che l'aggiunta dell'isolante sul solaio non porta a nessun beneficio ma anzi, aumenta il fabbisogno dell'edificio. I motivi di questo fatto sono già spiegati nel capitolo relativo agli impianti radianti a pavimento.

La scelta impiantistica migliore, in termini di fabbisogni totali è quella dell'impianto radiante a pavimento con solaio non isolato ma con controllo di tipo climatico. Questa scelta, presenta un fabbisogno totale dell'edificio minore rispetto a tutti gli altri casi.

9.4.1.2 Confronto tra gli impianti radianti a soffitto

La tabella 102 contiene i principali risultati delle simulazioni con gli impianti radianti a soffitto

	Ore [h]	Q _{acqua} [kWh]	Q _{resto,edificio} [kWh]	E _{el} circolatori [kWh]	Fabbisogno termico totale [kWh]
1.ST	499	20897	284670	41	305567
1.SP60	591	21372	285400	42	306773
1.SP60.c	559	21763	285201	40	306964
1.SP50.c	611	21190	285650	36	306843
1.ST*	558	24103	285300	46	309403
1.SP60*	629	23309	285817	45	309126
1.SP60.c*	593	23643	285664	42	309307
1.SP50.c*	646	22976	285974	38	308949

Tabella 102 Principali dati del funzionamento degli impianti a soffitto.

Si ricorda che l'impianto a soffitto installato su tutto il tetto inclinato funziona a temperatura costante e permette il raggiungimento delle temperature di comfort durante tutto l'anno. Per il raggiungimento delle temperature operanti minime, le altre configurazioni hanno bisogno di un controllo di tipo climatico.

Dalla tabella si può vedere come al diminuire della superficie radiante, aumenta il numero di ore di funzionamento degli impianti, il fabbisogno dell'acqua e in generale, il fabbisogno termico totale dell'edificio. Per quanto riguarda il fabbisogno di energia termica dell'acqua, al massimo si registra un incremento del 1.5% (tra parete totale e parete con superficie attiva di 50%), mentre il fabbisogno di energia termica dell'edificio totale rimane pressoché costante con una variazione massima tra i sistemi di 0.5%. Anche l'energia elettrica per il pompaggio dell'acqua dell'impianto di riscaldamento rimane pressoché costante.

Detto ciò, visto che sull'edificio totale non ci sono grosse differenze dei fabbisogni energetici, ma ci sono differenze in termini di costi di investimento (30%), si considera come soluzione migliore quella dell'impianto radiante a soffitto con 50% della superficie attiva. Questa soluzione è quella che funziona per più tempo ma i fabbisogni energetici rimangono simili agli altri casi.

Studiando il caso dei pannelli radianti a soffitto ma non considerando lo strato di isolamento del pannello, i risultati cambiano comportamento. In questo caso infatti, si può vedere come al diminuire della superficie radiante, diminuisca anche il fabbisogno energetico dell'acqua e dell'edificio totale fermo restando che i fabbisogni sono maggiori rispetto agli impianti con i 3 cm di isolante. In particolare, se confrontati gli stessi interventi si ha un aumento di fabbisogno energetico dell'acqua di circa 10% e del fabbisogno energetico dell'intero edificio di circa 1%. Al diminuire della superficie radiante, diminuisce anche questa differenza.

Considerando quindi l'omissione dell'isolante dell'impianto radiante, la scelta dell'impianto con 50% della superficie attiva porta a vantaggi in tutti i termini rispetto alle altre configurazioni.

9.4.1.3 Confronto tra impianti radianti a pavimento e a soffitto

Dalle simulazioni dinamiche è emerso che tra le due tipologie di impianto non ci sono grosse differenze. Anzi, l'impianto radiante a pavimento ha un maggior fabbisogno di energia termica e di potenza a causa delle portate più alte, ma in termini di energia totale dell'intero edificio i risultati sono simili. Questo è dovuto al fatto che una parte dell'energia dell'acqua dell'impianto di riscaldamento viene, per forza di cose, trasferita anche alle zone del piano inferiore. Inoltre, questa tipologia di impianto limita la differenza di temperatura tra i due piani e quindi c'è un risparmio energetico delle zone inferiori, nel senso che si eliminano gli scambi con gli ambienti adiacenti.

Poiché generalmente, non ci sono particolari differenze tra le diverse configurazioni, per semplicità, nella tabella 103 sono mostrati i risultati delle sole scelte impiantistiche considerate migliori che sono state discusse precedentemente.

	Ore [h]	Q_{acqua} [kWh]	$Q_{\text{resto,edificio}}$ [kWh]	E_{el} circolatori [kWh]	Fabbisogno termico totale [kWh]
1.1.c	619	34916	268191	97	303106
1.SP50.c	611	21190	285654	36	306843

Tabella 103 Confronto tra le configurazioni che portano al minor fabbisogno totale dell'edificio.

Dalla tabella si vede che le due tipologie di impianto lavorano per circa lo stesso numero di ore. Il fabbisogno termico dell'acqua di riscaldamento, e il fabbisogno elettrico per i circolatori dell'impianto

radiante a pavimento sono maggiori. In particolare, il fabbisogno dell'acqua è maggiore del 65% rispetto all'acqua dell'impianto radiante a soffitto e il fabbisogno di energia elettrica per i circolatori lo è del 169%. Il fabbisogno termico totale però, è minore del 1.3%.

Con un impianto radiante a pavimento quindi si spende di più per l'acqua ma in generale, considerando tutto l'edificio il fabbisogno totale è minore rispetto a quello che si avrebbe con un impianto radiante a soffitto.

Si può in generale dire che il fabbisogno termico dell'edificio rimanga circa lo stesso tra le due tipologie di impianto ma, con l'impianto radiante a pavimento, la chiesa rimane a una temperatura media maggiore e si hanno meno stress dovuti ai cicli di temperatura e umidità. La temperatura di alimentazione dell'impianto radiante a pavimento è inoltre minore.

Nella tabella 104 sono mostrati i risultati delle simulazioni considerando un confronto a parità di trasmittanza.

	Ore [h]	Q _{acqua} [kWh]	Q _{resto,edificio} [kWh]	E _{el} circolatori [kWh]	Fabbisogno termico totale [kWh]
1.1.c	619	34916	268191	97	303106
1.SP50.c*	646	22976	285974	38	308949

Tabella 104 Confronto tra l'impianto radiante a pavimento e a parete a parità di trasmittanza.

In questo caso, valgono le stesse considerazioni espresse prima, ma le differenze tra le due tipologie di impianto sono in parte maggiori. Il fabbisogno dell'acqua è maggiore del 52% rispetto all'acqua dell'impianto radiante a soffitto e il fabbisogno di energia elettrica per i circolatori lo è del 154%. Il fabbisogno termico totale però, è minore del 2%.

9.4.2 Impianti radianti dopo il miglioramento dell'involucro 2

9.4.2.1 Confronto tra gli impianti radianti a pavimento

Nel caso dell'installazione dell'impianto radiante a pavimento dopo il miglioramento dell'involucro 2 il comportamento delle diverse configurazioni d'impianto è simile a quelli del caso 1. Anche in questo caso, il fabbisogno totale dell'energia termica dell'intero edificio rimane circa lo stesso. Tra i 4 casi studiati c'è una differenza massima di circa 3000 kWh sul fabbisogno dell'acqua di riscaldamento e di circa 1500 kWh sul fabbisogno termico totale. Prendendo a confronto un impianto radiante a pavimento con solaio non isolato e uno con solaio non isolato, ci sono meno differenze rispetto agli impianti installati dopo il miglioramento dell'involucro 1.

Anche questa volta, l'aggiunta dello strato di isolante sul solaio aumenta il fabbisogno e quindi i casi 2.2 e 2.2.c sono di poco interesse.

Se si dovesse scegliere una configurazione solo vedendo i fabbisogni energetici, la miglior scelta sarebbe quella del caso 2.1.c.

	Ore [h]	Q _{acqua} [kWh]	Q _{resto,edificio} [kWh]	E _{el} circolatori [kWh]	Fabbisogno termico totale [kWh]
2.1	393	25055	189500	62	214555
2.1.c	511	23257	190589	80	213846
2.2	407	23869	191559	45	215428
2.2.c	520	22002	192332	58	214334

Tabella 105 Confronto tra le varie configurazioni di impianto radiante a pavimento.

9.4.2.2 Confronto tra gli impianti radianti a soffitto

	Ore [h]	Q _{acqua} [kWh]	Q _{resto,edificio} [kWh]	E _{el} circolatori [kWh]	Fabbisogno termico totale [kWh]
2.ST	364	14812	200490	30	215302
2.SP60	398	14213	201225	28	215438
2.SP60.c	402	14104	201279	28	215383
2.SP50.c	449	13572	201654	26	215226
2.ST*	377	15633	200864	31	216497
2.SP60*	410	14855	201389	29	216244
2.SP60.c*	411	14649	201493	29	216142
2.SP50.c*	456	14030	201836	27	215866

Tabella 106 Principali risultati dell'impianto radiante a soffitto dopo il miglioramento dell'involucro 2.

Le diverse configurazioni di impianto radiante a soffitto portano a risultati simili tra loro in termini di fabbisogno dell'acqua, energia elettrica per i circolatori e fabbisogno totale dell'edificio. La differenza tra le varie configurazioni è data però dalla temperatura dell'acqua di alimentazione. Anche in questo caso, come per la previsione degli stessi impianti ma dopo il miglioramento dell'involucro 1, si preferisce la configurazione con 50 % della superficie del soffitto effettivamente attiva. In questo secondo caso, con l'involucro molto isolato infatti, il fabbisogno dell'acqua diminuisce con la superficie attivata mentre il fabbisogno totale dell'edificio rimane circa lo stesso.

Se si guardassero i risultati delle configurazioni dell'impianto radiante a soffitto ma senza lo strato aggiuntivo di isolamento, si noterebbero le stesse cose. In particolare, nel caso di edificio molto isolato, la differenza tra i risultati delle configurazioni con e senza isolante è minore rispetto a quella

dell'edificio mediamente isolato. Anche in questo caso, la scelta più indicata è quella del soffitto radiante a 50% di superficie del tetto attiva anche se deve funzionare per più ore all'anno.

9.4.2.3 Confronto tra impianti radianti a pavimento e a soffitto

	Ore [h]	Q _{acqua} [kWh]	Q _{resto,edificio} [kWh]	E _{el} circolatori [kWh]	Fabbisogno termico totale [kWh]
2.1.c	511	23257	190589	80	213846
2.SP50.c	449	13572	201654	26	215226

Tabella 107 Confronto tra impianto radiante a pavimento e soffitto nel caso 2.

Dalla tabella 107 si possono vedere i confronti tra le 2 soluzioni considerate migliori nelle analisi precedenti.

Nel caso di edificio molto isolato, l'impianto radiante a pavimento rispetto a quello a soffitto ha una richiesta di energia termica maggiore del 71%, dell'energia elettrica per i circolatori del 200% ma in termini di fabbisogno totale dell'edificio dello 0.61%.

Nel caso si confrontassero le stesse configurazioni ma a parità di trasmittanza, i risultati non varierebbero di molto.

	Ore [h]	Q _{acqua} [kWh]	Q _{resto,edificio} [kWh]	E _{el} circolatori [kWh]	Fabbisogno termico totale [kWh]
2.1.c	511	23257	190589	80	213846
2.SP50.c*	456	14030	201836	27	215866

Tabella 108 Confronto tra impianto radiante a pavimento e a soffitto nel caso 2 e a parità di trasmittanza.

In questo secondo caso di confronto, le differenze sono ancora minori. Il fabbisogno energetico dell'acqua di riscaldamento è maggiore del 65%, dell'energia elettrica per i circolatori del 197% ma il fabbisogno totale dell'edificio rimane quasi lo stesso, la differenza è di 0.9%.

Anche in questo secondo caso quindi non ci sono grosse differenze prestazionali delle diverse configurazioni ma ci sono sicuramente delle differenze in termini economici.

9.5 Confronti prestazionali ed economici dei sistemi studiati

In questa parte del capitolo verranno analizzati i vari interventi dal punto di vista economico e prestazionale. In questa analisi si considererà: il miglioramento dell'involucro, l'installazione dell'impianto radiante, l'installazione della pompa di calore acqua/acqua e la posa in opera delle sonde geotermiche.

Come visto nei capitoli relativi ai miglioramenti dell'involucro, la sostituzione delle finestre non porta a benefici energetici ma comportano buona parte della spesa degli interventi. In questa analisi quindi non si considererà la sostituzione delle finestre.

Per l'analisi di intervento si considera:

- Costo della pompa di calore: 20 k€ sia per quella da 50 che da 70 kW.
- Costo delle sonde geotermiche: 40 €/m.
- Costo impianto radiante a pavimento non isolato: 40 €/m².
- Costo impianto radiante a pavimento isolato: 50 €/m².
- Costo impianto radiante a parete: 70 €/m².
- Costo impianto radiante a parete senza isolamento: 60 €/m².

I metodi di calcolo semplificati per lo SCOP, per la determinazione della lunghezza delle sonde e delle perdite di carico sono stati esposti a inizio capitolo. Il calcolo del COP medio stagionale è stato fatto su cadenza oraria, mentre il calcolo delle perdite di carico è stato fatto considerando una portata media.

Per il calcolo degli indici economici si sono considerati 20 anni di vita utile della pompa di calore e un tasso di interesse del 3.5%. Poiché i 20 anni considerati, sono la vita utile della sola pompa di calore, e non degli altri interventi, si è considerato un valore residuo degli interventi sull'involucro del 50%, del 80% delle sonde geotermiche e del 60% dell'impianto radiante.

Si è assunto un costo per l'energia termica di 0.1 €/kWh_t e per l'energia elettrica di 0.23 €/kWh_{el}

9.5.1 Confronti prestazionali degli impianti radianti con edificio mediamente isolato

Nella tabella 109 si mostrano i parametri prestazionali delle diverse configurazioni di impianto considerando l'installazione delle pompe di calore. La tabella mostra il fabbisogno termico dell'acqua, il COP medio stagionale della macchina, l'energia elettrica richiesta dalla pompa di calore, l'energia

elettrica richiesta dai circolatori e dal gruppo dei pompaggi dell'acqua delle sonde geotermiche, e il costo di intervento relativo all'impianto di riscaldamento.

Come si può vedere, in termini di costi di investimento, le diverse configurazioni sono simili, l'impianto a pavimento richiede un investimento minore per i pannelli radianti, ma maggiore per le sonde geotermiche, il contrario avviene per l'impianto radiante a soffitto.

	Q _{acqua} [kWh]	E _{el} PDC [kWh]	SCOP	E _{el} circolatori [kWh]	E _{el} pompaggi [kWh]	Costo intervento [€]
1.1	35816	6777	5.28	89	202	108600
1.1.c	34916	6288	5.55	97	196	108600
1.2	32071	6069	5.28	61	178	112750
1.2.c	31305	5631	5.56	67	174	112750
1.ST	20897	3451	6.05	41	122	112296
1.SP60	21372	4052	5.27	42	118	106248
1.SP60.c	21763	4278	5.09	40	120	106248
1.SP50.c	21190	4338	4.88	36	114	100200
1.ST*	24103	3981	6.05	46	142	106248
1.SP60*	23309	4419	5.27	45	129	101064
1.SP60.c*	23643	4647	5.09	42	131	101064
1.SP50.c*	22976	4703	4.89	38	124	95880

Tabella 109 Consumi e costi di intervento delle diverse configurazioni d'impianto nel caso 1.

Le principali differenze tra le due configurazioni di impianto sono dovute al fabbisogno elettrico per il pompaggio sia lato impianto che lato sonde. L'impianto radiante a pavimento, anche se ha delle minori perdite di carico, ha bisogno di più energia elettrica per i circolatori e per le pompe. Questo è dovuto alla portata che può essere dalle 3 alle 5 volte quella della portata dell'impianto a soffitto a seconda del caso studiato.

Lo SCOP è prossimo al valore nominale della macchina per la maggior parte delle configurazioni. La soluzione impiantistica che funziona a SCOP maggiore è quella con pannelli radianti a soffitto su tutta la superficie. Questo perché avendo una grande superficie radiante, si può alimentare l'impianto con acqua a 30°C. I restanti casi alimentano l'impianto con una temperatura maggiore di 30°C. Nel caso di impianto radiante a soffitto parziale con 50% della superficie effettivamente attiva lo SCOP è più basso di tutti perché per il raggiungimento delle condizioni minime di comfort deve funzionare a temperature prossime ai 40°C. Nonostante questo fatto, questa tipologia di impianto richiede il minor fabbisogno energetico e un minore investimento.

L'introduzione dell'impianto radiante e delle pompe di calore ha portato all'installazione delle pompe e dei circolatori con i loro rispettivi fabbisogno elettrici. Nella tabella 110 sono mostrati i fabbisogni

delle pompe e dei circolatori in termini di energia elettrica e la loro rispettiva incidenza rispetto ai totali consumi elettrici.

	E _{el} PdC [kWh]	E _{el} circolatori [kWh]	E _{el} pompe [kWh]	Incidenza delle pompe geotermiche	Incidenza pompaggi
1.1	6777	89	202	2.85%	4.11%
1.1.c	6288	97	196	2.98%	4.45%
1.2	6069	61	178	2.83%	3.80%
1.2.c	5631	67	174	2.96%	4.11%
1.ST	3451	41	122	3.38%	4.52%
1.SP60	4052	42	118	2.81%	3.80%
1.SP60.c	4278	40	120	2.71%	3.60%
1.SP50.c	4338	36	114	2.54%	3.35%
1.ST*	3981	46	142	3.40%	4.50%
1.SP60*	4419	45	129	2.82%	3.79%
1.SP60.c*	4647	42	131	2.72%	3.59%
1.SP50.c*	4703	38	124	2.55%	3.34%

Tabella 110 Consumi elettrici delle configurazioni studiate.

Come si può vedere dalla tabella, l'incidenza dei pompaggi in generale non è del tutto trascurabile e si aggira tra il 3.3 e il 4.5%.

Nella tabella 111 sono mostrati gli effettivi risparmi economici che portano queste configurazioni di impianto. La colonna relativa alla spesa indica appunto la spesa in bolletta che si ha nelle differenti configurazioni di impianto. Questa spesa è poi confrontata con quella relativa all'impianto convettivo nelle stesse condizioni di involucro e quindi si sono calcolati i risparmi. Il pay-back time è riferito al solo costo di investimento degli impianti.

Dalla tabella si può vedere che anche se le diverse configurazioni portano a circa lo stesso fabbisogno totale di energia, in termini economici c'è grande differenza. In un confronto di tipo economico, l'impianto radiante a pavimento risulta essere più vantaggioso rispetto a quello a soffitto.

Dal punto di vista energetico, con un impianto radiante a pavimento si riesce a portare un risparmio anche alle zone inferiori, con conseguenti abbassamenti dei costi di riscaldamento. Questo fatto lo si può vedere nella colonna dei risparmi, dove un impianto radiante a pavimento con controllo climatico porta a un risparmio in bolletta di circa 2000 €/anno mentre un impianto radiante a soffitto parziale (50% del soffitto attivo) porta a un risparmio di soli 818€/anno. Se si confrontassero gli impianti a parità di trasmittanza, la differenza è ancora maggiore poiché l'impianto a soffitto porta a un risparmio di solo 700€/anno.

	Spesa [€/anno]	Risparmio [€/anno]	PB [anni]
Impianto convettivo	30416		
1.1	28395	2021	54
1.1.c	28333	2083	52
1.2	28632	1784	63
1.2.c	28558	1858	61
1.ST	29298	1118	100
1.SP60	29509	907	117
1.SP60.c	29541	875	121
1.SP50.c	29598	818	122
1.ST*	29489	927	115
1.SP60*	29638	778	130
1.SP60.c*	29675	741	136
1.SP50.c*	29716	700	137

Tabella 111 Risparmi economici delle diverse configurazioni nel caso 1.

In termini economici, i pannelli radianti a soffitto costano quasi il doppio rispetto a un pannello radiante a pavimento e considerando il minor risparmio in bolletta, i pay-back sono molto alti.

Dall'analisi energetica, la miglior configurazione di impianto a soffitto era considerata quella a 50% della parete attiva, ma in termini economici la miglior soluzione è quella di impianto radiante a tutto soffitto. Questo perché l'impianto a tutto soffitto porta a risparmi maggiori in quanto la chiesa rimane mediamente a una temperatura maggiore, e quindi si hanno meno dispersioni delle zone inferiori che pagano l'energia termica a un prezzo maggiore rispetto a quella che si paga con la pompa di calore.

In generale, tutti i pay-back sono alti poiché il costo di intervento è notevole e la maggior parte del costo è dovuta alle sonde geotermiche.

Nella tabella 112 sono mostrate le spese in bolletta, i risparmi, il payback e il VAN considerando l'intero intervento (involucro + impianto). In questa analisi non sono stati considerati costi evitati e nessuna tipologia di incentivo.

I tempi di ritorno sono molto alti e il valore attuale netto rispetto ai 20 anni è ampiamente negativo. Nel caso di impianto a pavimento, metà risparmio economico è dato dall'impianto e metà dal miglioramento dell'involucro. Nel caso di impianto a parete, la maggior parte del risparmio economico è dato dal miglioramento dell'involucro, infatti il payback scende dai 137 anni ai 70 considerando tutto l'intervento.

Se confrontati i funzionamenti delle due tipologie d'impianto a parità di trasmittanza, i payback sono maggiori di circa 15/16 anni in favore dell'impianto radiante a pavimento.

	Spesa [€/anno]	Risparmio [€/anno]	PB [anni]	VAN [€]
Stato di fatto	33480	0	0	0
1.1	28395	5086	55	-128839
1.1.c	28333	5148	54	-126708
1.2	28632	4848	58	-128925
1.2.c	28558	4922	57	-127872
1.ST	29298	4182	67	-145481
1.SP60	29509	3972	69	-145247
1.SP60.c	29541	3940	70	-145702
1.SP50.c	29598	3883	69	-142287
1.ST*	29689	3992	69	-155905
1.SP60*	29638	3842	70	-152842
1.SP60.c*	29675	3805	71	-135117
1.SP50.c*	29716	3764	70	-135918

Tabella 112 Risparmi e indici economici considerando tutto l'intervento di riqualificazione 1.

Da questa analisi quindi si può dire che un impianto radiante a pavimento è più vantaggioso rispetto a quello a parete. Queste tipologie di impianto nel complesso sono molto costose ed è molto difficile farli tornare economicamente specialmente se si parte da un edificio già isolato.

9.5.2 Confronti prestazionali degli impianti radianti con edificio molto isolato

La tabella 113 mostra i parametri prestazionali studiati nel caso precedente ma per l'impianto radiante installato dopo il miglioramento dell'involucro 2.

In questa seconda analisi, i costi di investimento sono circa gli stessi ma tra la configurazione più economica e quella meno economica c'è più differenza rispetto al caso precedente. Se si confrontano le configurazioni di impianto a parità di trasmittanza, la differenza di costi di investimento è di circa 10,000€.

L'impianto radiante a pavimento e a soffitto lavorano a portate diverse e si hanno fabbisogno elettrici per i pompaggi diversi. L'incidenza di queste spese elettriche verrà analizzata più in dettaglio di seguito.

Lo SCOP è prossimo al valore nominale della macchina ed è maggiore rispetto a quello che si ha nella previsione degli stessi impianti ma considerando l'involucro mediamente isolato. Questo è dovuto al fatto che essendoci meno perdite, sono sufficienti temperature di alimentazione dell'impianto di emissione inferiori.

	Q _{acqua} [kWh]	E _{el} PDC [kWh]	SCOP	E _{el} circolatori [kWh]	E _{el} pompaggi [kWh]	Costo intervento [€]
2.1	25055	4741	5.28	62	148	102600
2.1.c	23257	3842	6.05	80	134	102600
2.2	23869	4517	5.28	45	138	106750
2.2.c	22002	3625	6.07	58	125	106750
2.ST	14812	2446	6.05	30	87	108336
2.SP60	14213	2694	5.27	28	79	102288
2.SP60.c	14104	2652	5.32	28	79	102288
2.SP50.c	13572	2618	5.18	26	74	96240
2.ST*	15633	2582	6.05	31	93	102288
2.SP60*	14855	2816	5.27	29	83	97104
2.SP60.c*	14649	2755	5.32	29	82	97104
2.SP50.c*	14030	2706	5.18	27	77	91920

Tabella 113 Consumi e costi di investimento delle diverse configurazioni di impianto nel caso 2.

Nella tabella 114 sono mostrati i fabbisogni elettrici dell'impianto di riscaldamento e la relativa incidenza delle sole pompe di geotermiche e in generale dei pompaggi totali.

	E _{el} PdC [kWh]	E _{el} circolatori [kWh]	E _{el} pompe [kWh]	Incidenza delle pompe geotermiche	Incidenza pompaggi
1.1	6777	89	202	2.85%	4.11%
1.1.c	6288	97	196	2.98%	4.45%
1.2	6069	61	178	2.83%	3.80%
1.2.c	5631	67	174	2.96%	4.11%
1.ST	3451	41	122	3.38%	4.52%
1.SP60	4052	42	118	2.81%	3.80%
1.SP60.c	4278	40	120	2.71%	3.60%
1.SP50.c	4338	36	114	2.54%	3.35%
1.ST*	3981	46	142	3.40%	4.50%
1.SP60*	4419	45	129	2.82%	3.79%
1.SP60.c*	4647	42	131	2.72%	3.59%
1.SP50.c*	4703	38	124	2.55%	3.34%

Tabella 114 Consumi elettrici delle diverse configurazioni.

Anche in questo caso i pompaggi coprono circa il 3.3/4.5 % del fabbisogno elettrico dell'impianto totale. Questi valori non sono del tutto trascurabili ma sono comunque una minima parte.

Nella tabella 115 sono mostrati gli effettivi risparmi economici che portano queste configurazioni di impianto. Si sono confrontate le spese in bolletta considerando i costi energetici esposti nella parte introduttiva dei confronti.

	Spesa [€/anno]	Risparmio [€/anno]	PB [anni]
Impianto convettivo	21421	0	0
2.1	20089	1333	77
2.1.c	19992	1430	72
2.2	20237	1184	90
2.2.c	20109	1312	81
2.ST	20639	782	138
2.SP60	20767	654	156
2.SP60.c	20763	659	155
2.SP50.c	20791	631	153
2.ST*	20709	712	144
2.SP60*	20812	609	160
2.SP60.c*	20808	613	158
2.SP50.c*	20830	591	155

Tabella 115 Risparmi e PB delle diverse configurazioni nel caso 2.

Anche in questo caso, nonostante il fatto che le diverse configurazioni di impianto portino a fabbisogni energetici simili, in termini economici si hanno risultati molto diversi. Nel caso in esame, i risparmi in bolletta sono ancora minori rispetto agli stessi impianti riferiti all'edificio mediamente isolato e anche se il costo di intervento considerando tutto l'impianto di riscaldamento è in parte minore rispetto a quelli del caso 1, si hanno dei tempi di ritorno molto alti.

	Spesa [€/anno]	Risparmio [€/anno]	PB [anni]	VAN [€]
Stato di fatto	33480	0	0	0
2.1	20089	13392	29	-99678
2.1.c	19992	13489	29	-97049
2.2	20237	13244	30	-98491
2.2.c	20109	13372	30	-96672
2.ST	20639	12842	31	-113513
2.SP60	20767	12713	31	-111112
2.SP60.c	20763	12718	31	-111049
2.SP50.c	20791	12690	31	-107222
2.ST*	20709	12772	31	-121226
2.SP60*	20812	12668	31	-117516
2.SP60.c*	20808	12672	31	-99210
2.SP50.c*	20830	12651	30	-99726

Tabella 116 Risparmi e indici economici dell'intero intervento.

Nella tabella 116 si possono vedere le spese per l'energia considerando le differenti configurazioni. I risparmi in questo caso sono riferiti all'intervento complessivo e gran parte del risparmio è dato dal

miglioramento dell'involucro. I pay-back si aggirano tra i 29 e i 31 anni, come normale per interventi di riqualificazione di questo genere per gli edifici di vecchia data ma il VAN riferito ai 20 anni rimane ancora negativo. Il miglioramento dell'involucro copre i costi dell'impianto, infatti i tempi di ritorno dell'impianto radiante a parete a 50% della superficie effettivamente attiva passa da un PB di 155 anni a uno di 30 anni.

9.5.3 Confronti tra i 2 sistemi studiati

Le diverse configurazioni di impianto applicate dopo il miglioramento dell'involucro 1 e 2 sono stati studiati e in questa sede si vuole fare un confronto indicativo tra i due sistemi. Come già visto, queste tipologie di impianto richiedono un costo di investimento molto alto e portano a risparmi energetici ed economici molto bassi. Questo è dovuto al fatto che gli impianti di riscaldamento devono funzionare in modo fortemente intermittente, infatti mediamente gli impianti radianti lavorano per 1 / 2 ore al giorno. La conferma del fatto che l'intermittenza porta a guadagni limitati la si può vedere confrontando le configurazioni a parete con quelle a pavimento. L'impianto a pavimento, in fase di raffreddamento dell'acqua cede parte del suo calore alle zone sottostanti portando a un risparmio economico maggiore perché l'energia termica data dalla pompa di calore viene a costare meno rispetto a quello che si pagherebbe estraendo acqua alla rete di teleriscaldamento.

Confrontando invece i risparmi dei diversi sistemi considerando l'impianto radiante e un ipotetico impianto convettivo nelle stesse condizioni di involucro, si può vedere che con l'aumentare dell'isolamento dell'involucro, i risparmi economici dell'impianto sono sempre minori.

Da tutti i casi studiati, emerge che economicamente gli impianti radianti a pavimento sono più vantaggiosi rispetto a quelli a soffitto poiché questi riscaldano in parte anche le zone sottostanti e limitano gli scambi per trasmissione tra gli ambienti adiacenti a diversa temperatura.

9.6 Confronto dei benefici rispetto ad un involucro scadente

In questa sede si vogliono confrontare i benefici degli interventi proposti considerando un involucro scadente. Per involucro scadente si intende un involucro senza nessun tipo di isolamento delle superfici opache ed elementi trasparenti composti da vetro singolo.

Questo confronto si vuole effettuare in quanto la condizione di partenza della chiesa in esame presenta già delle componenti isolate e delle buone superfici vetrate.

Si è quindi costruito il modello della chiesa non prevedendo nessuna tipologia di isolamento e finestre composte da vetro singolo e telaio ad alta trasmittanza termica.

Il fabbisogno di energia termica finale di questo edificio fittizio è di 504739 kWh/anno corrispondente a una spesa in bolletta di 50474 €/anno.

Partendo da questa condizione di involucro si prevede un intervento tale da portare l'involucro nelle condizioni che si hanno nel caso di miglioramento dell'involucro 1 e 2 del capitolo 6.

Per il raggiungimento di queste condizioni si è quindi considerato un costo di intervento diverso poiché si devono aggiungere gli spessori di isolamento già presenti allo stato di fatto.

L'analisi economica è stata fatta considerando le stesse assunzioni fatte precedentemente.

I risparmi e i parametri economici nel caso di edificio mediamente isolato sono mostrati nella tabella 117. In questo caso i tempi di ritorno sono tutti simili tra loro in quanto la maggior parte del risparmio è data dal miglioramento dell'involucro e si aggirano tra i 21 e i 22 anni. I VAN riferiti a 20 anni rimangono comunque negativi anche se di poco.

	Spesa [€/anno]	Risparmio [€/anno]	PB [anni]	VAN [€]
Stato di fatto	50474	0	0	0
1.1	28348	22126	21	-23971
1.1.c	28288	22186	21	-21858
1.2	28591	21883	21	-24133
1.2.c	28518	21956	21	-23094
1.ST	29270	21204	22	-41873
1.SP60	29482	20992	22	-40651
1.SP60.c	29513	20961	22	-41100
1.SP50.c	29571	20902	22	-37705
1.ST*	29456	21018	22	-51233
1.SP60*	29608	20866	22	-48211
1.SP60.c*	29645	20829	22	-30479
1.SP50.c*	29688	20786	22	-31303

Tabella 117 Risparmi e indici economici del caso 1 rispetto ad un involucro scadente.

Calcolando il valore attuale netto dell'intervento sui 30 anni, si avranno valori positivi come mostrato in tabella 118. In questa seconda analisi, l'intervento con il VAN maggiore è quello relativo all'impianto radiante a pavimento con controllo climatico confermando il suo miglior rendimento energetico.

	Spesa [€/anno]	Risparmio [€/anno]	PB [anni]	VAN [€]
Stato di fatto	50474	0	0	0
1.1	28348	22126	21	32854
1.1.c	28288	22186	21	34856
1.2	28591	21883	21	33132
1.2.c	28518	21956	21	34476
1.ST	29270	21204	22	11419
1.SP60	29482	20992	22	12288
1.SP60.c	29513	20961	22	11707
1.SP50.c	29571	20902	22	15389
1.ST*	29456	21018	22	4997
1.SP60*	29608	20866	22	7384
1.SP60.c*	29645	20829	22	24963
1.SP50.c*	29688	20786	22	23959

Tabella 118 Risparmi e indici economici considerano 30 anni.

I risparmi e i parametri economici nel caso di edificio mediamente isolato sono mostrati nella tabella 119. In questo caso i tempi di ritorno sono tutti simili tra loro in quanto la maggior parte del risparmio è data dal miglioramento dell'involucro e si aggirano tra i 19 e i 20 anni. I VAN riferiti ai 20 anni degli impianti radianti a pavimento iniziano ad assumere un valore positivo, mentre quelli a soffitto continuano ad avere un valore negativo a parte i casi a superficie parziale non isolati.

	Spesa €/anno	Risparmio	PB	VAN
Stato di fatto	50474	0	0	0
2.1	20089	30385	19	4531
2.1.c	19992	30482	19	7160
2.2	20237	30237	19	5718
2.2.c	20109	30365	19	7536
2.ST	20639	29835	20	-9304
2.SP60	20767	29707	19	-6903
2.SP60.c	20763	29711	19	-6840
2.SP50.c	20791	29683	19	-3013
2.ST*	20709	29765	19	-17017
2.SP60*	20812	29662	19	-13307
2.SP60.c*	20808	29666	19	4999
2.SP50.c*	20830	29644	19	4483

Tabella 119 Risparmi e indici economici del caso 2 rispetto all'involucro scadente.

Se si calcolassero i valori attuali netti rispetto a 30 anni, come fatto per i confronti del miglioramento dell'involucro 1, i risultati sarebbero più interessanti e tutti gli interventi avrebbero il loro valore attuale netto positivo.

	Spesa €/anno	Risparmio	PB	VAN
Stato di fatto	50474	0	0	0
2.1	20089	30385	19	87546
2.1.c	19992	30482	19	90216
2.2	20237	30237	19	89570
2.2.c	20109	30365	19	91924
2.ST	20639	29835	20	71494
2.SP60	20767	29707	19	73889
2.SP60.c	20763	29711	19	73971
2.SP50.c	20791	29683	19	78211
2.ST*	20709	29765	19	67204
2.SP60*	20812	29662	19	70481
2.SP60.c*	20808	29666	19	88803
2.SP50.c*	20830	29644	19	88198

Tabella 120 Risparmi e indici economici considerando i VAN sui 30 anni.

Anche in questo caso, l'impianto radiante a pavimento presenta il valore attuale netto maggiore rispetto agli altri casi, ma è molto simile a quello degli impianti radianti a soffitto senza lo strato aggiuntivo dell'isolante.

10 Conclusioni

L'obiettivo del lavoro di tesi è stato quello di studiare l'installazione di un ipotetico impianto radiante in una chiesa riscaldata a basse temperature e in modo fortemente intermittente.

Lo studio è stato fatto in condizioni dinamiche e prevedendo diverse configurazioni di impianto radiante a pavimento e a soffitto applicati ad un involucro mediamente e ampiamente isolato.

Da un confronto prettamente energetico delle differenti configurazioni di impianto considerate, si hanno fabbisogni termici dell'intero edificio simili e confrontabili tra loro a parità di stato di isolamento dell'involucro. Se analizzati i soli fabbisogni dell'acqua di riscaldamento, gli impianti radianti a pavimento richiedono più energia termica rispetto a quelli a parete ma a causa della loro alta inerzia, la chiesa rimane a una temperatura media maggiore per tutta la durata dell'anno.

Le differenti configurazioni di impianto radiante a soffitto portano a fabbisogni simili e, al diminuire della superficie radiante aumenta il numero di ore di funzionamento dell'impianto ma anche la temperatura di alimentazione dell'acqua. Nel caso di edificio mediamente isolato il limite di superficie radiante è circa a 50% della superficie attiva totale. Sotto questo livello di superficie, l'impianto deve funzionare a temperature troppo alte, non permettendo il rispetto dei gradini termici imposti ed eliminando uno dei vantaggi principali di questa tipologia di impianti. Nel caso di edificio molto isolato, la superficie attiva può essere ulteriormente abbassata in quanto le temperature dell'acqua di alimentazione sono minori di 40°C.

Anche se gli impianti radianti portano a un comfort migliore, a delle variabilità minori e a fabbisogni energetici dell'intero edificio simili a quelli che si avrebbero con un ipotetico impianto convettivo, dal punto di vista economico, è difficile far tornare l'investimento. Per la chiesa in esame, i tempi di ritorno degli interventi considerati sono molto alti e i valori attuali netti degli interventi sono negativi. Uno dei motivi è il fatto che l'involucro edilizio di partenza è già in parte isolato e i benefici raggiungibili sono molto limitati, specialmente passando ad un involucro mediamente isolato.

Se si considerassero le stesse condizioni finali dell'involucro che si hanno dopo il miglioramento 1 e 2 ma partendo dall'edificio non isolato e con finestre a vetro singolo, l'intervento è molto interessante. In questo caso, come si è visto, anche senza nessun tipo di incentivazione o altri aiuti economici, i tempi di ritorno scendono molto e, anche se il valore del VAN è ancora negativo considerando i 20 anni, diventa positivo considerando i calcoli riferiti ai 30 anni.

Considerando l'analisi economica del solo impianto radiante dopo il miglioramento dell'involucro 1 o 2, a causa dei minimi risparmi energetici, il risparmio economico in bolletta è basso e quindi i tempi di ritorno dell'investimento sull'impianto molto lunghi. I tempi di ritorno di questa tipologia di impianto sono molto alti, anche oltre i 50 anni, a causa di un riscaldamento fortemente intermittente della chiesa.

L'impianto radiante infatti, funziona mediamente 1/2 ore al giorno e per il resto del tempo non si hanno benefici.

In conclusione, viste le differenti configurazioni studiate, la scelta migliore dalle analisi dei dati è quella dell'impianto radiante a pavimento non isolato con controllo climatico. Come già esposto, questa tipologia d'impianto riesce a riscaldare in parte anche le zone adiacenti e permette di farlo ad un costo relativamente basso. L'impianto radiante a soffitto è puramente mirato al riscaldamento della chiesa e il suo funzionamento intermittente impedisce all'impianto di recuperarsi economicamente.

Bibliografia

- [1] Fanzino Valeria, *Riqualificazione energetica degli edifici storici: compatibilità e sostenibilità: dal D.P.R. 16 aprile 2013, n. 75 alla Legge di stabilità: la nuova normativa nazionale in materia di efficienza e certificazione energetica*, Grafill, 2014.
- [2] Dall'O Giuliano, *Gli impianti nell'architettura 1*, Utet, 2000.
- [3] Dall'O Giuliano, *Gli impianti nell'architettura 2*, Utet, 2000.
- [4] Dall'O Giuliano, *Gli impianti nell'architettura 2*, Utet, 2000.
- [5] Fabbri Kristian, *Guida alla riqualificazione energetica*, Buffetti, 2008.
- [6] Corti Lucia, Rigano Elena, *CasaClima R: edifici storici ad alta efficienza energetica*, overview, 2013.
- [7] Bonacina Cesare, Cavallini Alberto, Mattarolo Lino, *Trasmissione del calore*, cleup editore, 1989.
- [8] De Carli Michele, Peretti Clara, *Sistemi radianti a bassa differenza di temperatura. Progettazione, installazione e regolazione*, EdicomEdizioni, 2015.
- [9] Camuffo Dario, *Church Heating and Preservation of the Cultural Heritage. Guide to the Analysis of the Pros and Cons of Various Heating Systems*, Electa, 2007.
- [10] Schellen, H.L. *Heating monumental churches: indoor climate and preservation of cultural heritage*, Eindhoven, 2002.
- [11] Varas-Muriel M.J. *Microclimatic monitoring in an historic church fitted with modern heating: Implications for the preventive conservation of its cultural heritage*, Elsevier, 2018.
- [12] Aste Niccolò, Della Torre Stefano, *Sustainable church heating, The Basilica di Collemaggio case-study*, Elsevier, 2016.
- [13] Aste Niccolò, Della Torre Stefano, *CFD Comfort Analysis of a Sustainable Solution for Church Heating*, Energy Procedia, 2017.
- [14] Camuffo Dario, Pagan Emanuela, Sirkka Rissanen, *An advanced church heating system favourable to artworks: A contribution o European Standardisation*, Cultural Heritage, 2010.
- [15] Turcanu Florin Emilian, Verdes Marina, Serboianu Ion, *Churchs Heating: The Optimum Balance Between Cost Management and Thermal Comfort*, Procedia Technology, 2016.
- [16] Capozza Antonio, De Carli Michele, Galgaro Antonio, Zarella Angelo, *Linee guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore*, Ricerca sistema energetico, 2012.

Sitografia

- [1] Schede tecniche dei pannelli radianti di Uponor. www.uponor.it
- [2] Schede tecniche Emmeti. www.emmeti.com
- [3] Schede tecniche pompe di calore di Ferroli. www.ferroli.com
- [4] Tabelle e diagrammi perdite di carico acqua. www.caleffi.com
- [5] Storia e foto della chiesa Albert Schweitzer. www.wikipedia.com
- [6] www.segenskirche.de
- [7] www.google.it/images