



Ricerca di Sistema elettrico

Studio sulla riqualificazione a nZEB degli edifici pubblici storici costituenti l'area Grande Miniera di Serbariu: Modello dinamico (ISO EN 52016) basato sulla caratterizzazione del sistema edificio – impianto tramite misure in opera e di laboratorio

S. Pili, F. Poggi, E. Loria, C. Frau

STUDIO SULLA RIQUALIFICAZIONE A NZEB DEGLI EDIFICI PUBBLICI STORICI COSTITUENTI L'AREA GRANDE MINIERA DI SERBARIU: MODELLO DINAMICO (ISO EN 52016) BASATO SULLA CARATTERIZZAZIONE DEL SISTEMA EDIFICIO – IMPIANTO TRAMITE MISURE IN OPERA E DI LABORATORIO

Stefano Pili, Francesca Poggi, Eusebio Loria, Caterina Frau (Sotacarbo)

Gennaio 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

Progetto: *Tecnologie e metodologie low carbon e Edifici a energia quasi zero (nZEB) – I16C18000200001*

Parte B: Edifici ad energia quasi zero (nZEB)

Tema a: Riqualificazione energetica di edifici con interventi di efficientamento

Sottotema a.1: Diagnosi energetica di un edificio pubblico

Responsabile del Progetto: dott.ssa Franca Rita Picchia, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Tecnologie e metodologie Low Carbon e Edifici ad energia quasi zero (nZEB)*"

Responsabile scientifico ENEA: ing. Paolo Deiana

Responsabile scientifico SOTACARBO: ing. Enrico Maggio

Indice

SOMMARIO.....	5
PARTE I - MODELLAZIONE ENERGETICA DINAMICA (EN ISO 52016-1:2018).....	6
1 INTRODUZIONE	6
2 METODOLOGIA	7
2.1 CENNO SULLA MODELLAZIONE DINAMICA	7
2.1.1 <i>Modello climatico di riferimento</i>	7
2.1.2 <i>Impostazione delle zone termiche e dei profili d'uso</i>	8
2.1.3 <i>Modello di calcolo dinamico</i>	9
2.1.4 <i>La modellazione dell'involucro</i>	12
2.2 DATI DI INGRESSO E PARAMETRI DEL MODELLO ENERGETICO.....	13
2.2.1 <i>Prove in laboratorio sulla muratura</i>	14
2.3 RISULTATI E DISCUSSIONE.....	15
3 RISULTATI: MUSEO DEL CARBONE	17
3.1 DESCRIZIONE GENERALE.....	17
3.2 ZONE TERMICHE E PROFILO D'USO.....	19
3.3 INVOLUCRO.....	20
3.4 SISTEMA IMPIANTISTICO	22
3.5 INDAGINE SULLA UTA	22
3.6 RISULTATI MODELLAZIONE.....	24
3.6.1 <i>Fabbisogno di energia utile dell'involucro</i>	24
3.6.2 <i>Andamento delle temperature e carico termico</i>	26
3.6.3 <i>Confronto dei fabbisogni energetici</i>	30
4 RISULTATI: MUSEO DEI PALEO AMBIENTI SULCITANI (PAS)	33
4.1 DESCRIZIONE GENERALE.....	33
4.2 ZONE TERMICHE E PROFILO D'USO	34
4.3 INVOLUCRO.....	36
4.4 SISTEMA IMPIANTISTICO	38
4.5 RISULTATI MODELLAZIONE.....	39
4.5.1 <i>Fabbisogno di energia utile dell'involucro</i>	39
4.5.2 <i>Andamento delle temperature e carico termico</i>	40
4.5.3 <i>Confronto dei fabbisogni energetici</i>	44
5 CONCLUSIONI.....	47
5.1 LEZIONI APPRESE	47
5.2 FUTURI SVILUPPI DELLA RICERCA	49
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	50
PARTE II: INDAGINI E MISURAZIONI	51
7 INDAGINE SULLA UTA DEL MUSEO DEL CARBONE.....	51
7.1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA	51
7.2 METODOLOGIA E STRUMENTAZIONE	53
7.3 RISULTATI	54
7.4 DISCUSSIONE E FUTURE RICERCHE	56
8 MISURAZIONE DELLA UMIDITÀ NEI MATERIALI DELLE MURATURE	58
8.1 DESCRIZIONE DEGLI EDIFICI.....	58
8.2 METODOLOGIA E STRUMENTAZIONE	61
8.3 RISULTATI MUSEO DEL CARBONE	66

8.4	RISULTATI MUSEO PAS.....	74
8.5	DISCUSSIONE E FUTURE RICERCHE.....	79

Sommario

Questo lavoro costituisce una integrazione del report *“Diagnosi energetica di alcuni edifici pubblici storici costituenti l’area della Grande Miniera di Serbariu- PAR 2017”* sviluppato durante l’ultimo trimestre del 2018 (ottobre-dicembre 2018).

Questo lavoro si inserisce negli studi svolti in seno all’Accordo di Collaborazione tra ENEA e Sotacarbo fanno parte del Piano Annuale di Realizzazione (PAR) 2018, ripartito in nove Progetti, riferito alla estensione della terza annualità dell’Accordo di Programma MiSE-ENEA 2015-2017, in particolare rivolto allo sviluppo di una ricerca dal titolo *“PARTE B: Edifici ad energia quasi-zero”* facente capo al piano annuale di realizzazione 2016 dell’Accordo di Programma MiSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico, ed in particolare agli ambiti attinenti il Tema di Ricerca *“Edifici a energia quasi zero (nZEB)”*, Progetto A *“Riqualificazione energetica di edifici con interventi di efficientamento”*, Obiettivo a.1 *“Diagnosi energetica di un edificio pubblico”*.

Sulla base dei risultati della fase precedente della ricerca si sono individuate alcune attività per la prosecuzione del lavoro che in parte sono state oggetto della integrazione di questo trimestre. Il documento si articola in due parti: la prima, riguardante la modellazione energetica in regime dinamico (EN ISO 52016-1:2018) degli edifici oggetto dello studio precedente (Museo del Carbone e Museo PAS) e la seconda, dedicata ad alcune attività di misura ed indagini strumentali integrative negli stessi edifici.

La modellazione dinamica riguarda gli stessi edifici analizzati col modello stazionario (UNI 11300 Asset Rating, Tailored rating) nel report precedente. Perciò, dopo una breve parte metodologica, si presentano i risultati ottenuti e si confrontano con quelli ricavati con la modellazione stazionaria eseguita in precedenza.

Le indagini strumentali sono state orientate a specificare alcuni dati di ingresso della diagnosi energetica, ossia: le portate e le caratteristiche termo igrometriche dell’aria immessa dalla UTA del museo del Carbone, la verifica della trasmittanza del materiale lapideo *“trachite rossa”* tramite l’utilizzo dello strumento realizzato nel periodo precedente di programmazione *“Prototipo per misurazioni in laboratorio di parametri relativi alle prestazioni termiche dei materiali tipici del Sulcis.”*

Considerando l’importanza di definire alcuni aspetti tipologici anche del degrado delle murature, si è proceduto anche a studiare il fenomeno della umidità di risalita effettuando delle misure non distruttive di umidità dei materiali sulle murature.

PARTE I - Modellazione Energetica Dinamica (EN ISO 52016-1:2018)

1 Introduzione

La modellazione energetica è uno degli elementi centrali della diagnosi, il suo scopo è sviluppare un modello energetico del sistema edificio-impianto che approssimi il più possibile le reali condizioni d'uso. Essa è la base per valutare le diverse ipotesi di riqualificazione dell'immobile. La diagnosi energetica di secondo livello adottata in questa ricerca (vedi report "Diagnosi energetica di alcuni edifici pubblici storici costituenti l'area della Grande Miniera di Serbariu" PAR 2017) prevede una modellazione energetica coerente con le normative tecniche vigenti, opportunamente settata per simulare le condizioni attuali di esercizio dell'edificio [1].

Per modello *standard* ci si riferisce in genere alle procedure di calcolo adottate per le verifiche di legge (UNI TS 11300 parti 1-2-3-4 s.m.i. e altre norme collegate) ed all'utilizzo di software commerciali certificati (certificazione del Comitato Termotecnico Italiano -CTI) per la simulazione e la valutazione delle azioni di efficientamento [2].

Come è noto dalla letteratura, e come è stato discusso nella parte precedente dello studio, il metodo semi stazionario proposto dalla normativa (UNI 11300 – parte 1) presenta limiti di affidabilità soprattutto se utilizzato nella progettazione bioclimatica e per la simulazione di edifici che richiedono una forte ottimizzazione del sistema impiantistico studiato nelle sue particolari condizioni d'uso [3, 4]. La metodologia stazionaria non valuta correttamente l'influenza dell'inerzia termica delle strutture risultando adatta per i climi freddi con preponderante carico termico invernale e per profili d'uso standard o continui, ma meno affidabile nei casi di forte carico estivo e per profili intermittenti. Le condizioni estive sono caratterizzate da forti variazioni orarie delle condizioni climatiche, legate principalmente all'irraggiamento solare, durante le quali il comfort interno è fortemente condizionato dagli effetti dell'inerzia termica dell'involucro, che un metodo semi stazionario difficilmente riesce a modellare con efficacia.

La metodologia di calcolo stazionario è l'attuale norma di riferimento italiana per i calcoli sugli edifici (in caso di APE, Progetto, Diagnosi.) tuttavia sono disponibili le nuove norme UNI EN ISO 52016-1 e UNI EN ISO 52017-1 sul calcolo in regime dinamico orario degli edifici che presto soppianderanno quello vigente. Si tratta di un aggiornamento normativo legato alla revisione del pacchetto "EPBD" a cura del CEN (Comitato di Normazione Europeo) su mandato della Commissione Europea. Le norme riguardano specificatamente il calcolo del fabbisogno per riscaldamento e raffrescamento dell'involucro e fanno parte del pacchetto normativo della serie ISO 52000 ancora in via di completamento. La ISO EN 52017 specifica i requisiti ed i criteri di validazione teorica di qualsiasi metodo di calcolo conforme, mentre la norma ISO EN 52016-1 descrive il calcolo nel dettaglio [5].

Sono correntemente in uso diversi codici di calcolo e software per il calcolo dinamico del fabbisogno energetico degli edifici [6] per lo più adottati per studi di tipo scientifico o per edifici di particolare valore, per tuttavia le norme propongono un modello semplificato nell'intento per favorire l'utilizzo e la diffusione capillare in ambito professionale. Le nuove procedure proposte dalla 52016 si basano su un modello dinamico semplificato per la valutazione di alcuni parametri dell'edificio: fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne, carichi termici sensibili e latenti. I vantaggi del calcolo dinamico orario sono molteplici, infatti esso consente una maggiore affidabilità dei risultati e nuove opzioni di controllo del progetto, tra le quali:

- l'analisi di un più realistico fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento dell'edificio;
- la verifica delle condizioni di comfort all'interno degli ambienti;
- lo studio delle potenze richieste dai diversi servizi di climatizzazione e quindi un'ottimizzazione del dimensionamento degli impianti;
- la valutazione dell'efficacia dei sistemi di controllo solare e del comportamento inerziale dell'involucro.

Attualmente sono presenti sul mercato alcuni software commerciali che integrano il motore dinamico semplificato all'interno delle proprie interfacce strutturate per eseguire i calcoli e le verifiche della normativa

vigente. Tali software sono patrimonio conoscitivo consolidato tra i professionisti del settore, perciò sarà presto possibile effettuare i calcoli dinamici a basso costo grazie alle interfacce facilitate presenti nella maggior parte dei software commerciali.

All'interno della metodologia adottata nella ricerca si propone perciò di effettuare il calcolo energetico con entrambe le modellazioni: sia quella semi-stazionaria, basata sulla normativa vigente, che quella dinamica basata sulla norma EN ISO 52016 che è destinata a diventare il nuovo riferimento normativo. La doppia modellazione permetterà di ottenere risultati più accurati e di confrontare le due metodologie rispetto a diversi aspetti quali:

- la facilità d'uso ossia: interpretazione dei risultati, inserimento e reperimento dei dati iniziali, esecuzione della procedura di calcolo;
- utilità dei risultati finali e di quelli parziali ai fini del progetto e la valutazione degli interventi;
- differenza tra i risultati delle due metodologie e distanza dal profilo d'uso reale.

2 Metodologia

2.1 Cenno sulla modellazione dinamica

Per effettuare il calcolo dinamico semplificato (EN ISO 52016-1) si è utilizzato il software “*Termolog EPIX 9 della LogicalSoft srl*” che, allo stato attuale, è l'unico strumento che integra tale motore dinamico all'interno di un software commerciale certificato dal CTI di ampia diffusione. Il modello implementato dal software è stato validato rispetto ai principali software per il calcolo dinamico (Energy Plus, TRSYS,...) tramite procedure certificate (ANSI/ASHRAE Standard 140-2017) è perciò da ritenersi sufficientemente affidabile [7]. Di seguito si espongono brevemente le caratteristiche del calcolo lasciando al testo della norma ed alla vasta documentazione tecnico – scientifica eventuali approfondimenti [8]. I risultati della modellazione dinamica saranno presentati in comparazione con i principali risultati di quella semi stazionaria al fine di apprezzarne le differenze nella modellazione dello stato di fatto del sistema edificio-impianto.

Le principali peculiarità del modello dinamico semplificato (EN ISO 52016) rispetto alla modellazione semi – stazionaria (serie UNI 11300 e collegate) riguardano: il clima di riferimento, l'impostazione dei profili d'uso, il modello energetico e la modellazione dell'involucro. Perciò si tratta principalmente di modifiche che influiscono nello studio del fabbisogno dell'involucro, mentre la modellazione impiantistica è da considerare molto simile ad un calcolo in Tailored Rating del modello statico. Poiché le norme della serie 52000 sono da considerarsi ancora in evoluzione si suppone che in seguito potrebbero essere emanate nuove specifiche tecniche anche sulla parte impiantistica dell'edificio che però allo stato attuale non sono disponibili.

2.1.1 Modello climatico di riferimento

La simulazione dinamica si basa su dati climatici definiti con passo orario, nel nostro caso sono stati adottati quelli della banca dati dell'Anno tipo Climatico CTI costituito dal valore statistico di diverse annualità di osservazione. L'anno tipo CTI tipo è anche la base di dati da cui sono stati ricavati i valori mensili secondo la 10349:2016. Per quanto riguarda l'irraggiamento solare si ricorda che i file dell'anno climatico CTI contengono unicamente il valore di irradianza globale sul piano orizzontale, l'irraggiamento sulle altre superfici diversamente orientate ed inclinate viene effettuata secondo il modello previsto dalla EN ISO 52010 che applica il modello del cielo di Perez [9]. Il formato standard dei dati climatici contiene perciò le seguenti informazioni (figura 1):

- Passo: step di calcolo (su base annua);
- Mese: valore numerico del mese;
- Settimana: valore numerico della settimana nell'anno;
- Giorno sett: valore numerico del giorno nella settimana dell'anno;
- Ora giorno: da 1 a 24;
- $\Theta_{e,air}$: temperatura dell'aria esterna [$^{\circ}C$];
- V_w : velocità del vento [m/s];

- H: contenuto d'acqua [g/kg];
- IsolN: Irradianza media globale sul piano verticale NORD [W/m²];
- IsolE: Irradianza media globale sul piano verticale EST [W/m²];
- IsolS: Irradianza media globale sul piano verticale SUD [W/m²];
- IsolW: Irradianza media globale sul piano verticale OVEST [W/m²];
- IsolH: Irradianza media globale sul piano orizzontale [W/m²];

passo	mese	sett	giorno sett	ora giorno	Se,air [°]	vw [m/s]	H [g/kg]	Isol N [W/m ²]	Isol E [W/m ²]	Isol S [W/m ²]	Isol W [W/m ²]	Isol H [W/m ²]
1	12	49	1	1	9,2	2,5	5,2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	12	49	2	2	9,2	2,5	5,2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	12	49	2	3	9,2	2,5	5,2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	12	49	2	4	10,1	3,3	5,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	12	49	2	5	10,4	3,4	5,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6	12	49	2	6	10,9	3,6	5,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	12	49	2	7	11,0	3,6	5,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8	12	49	2	8	11,2	3,6	5,2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9	12	49	2	9	12,6	5,5	5,1	25,341	30,745	30,177	25,341	49,600
10	12	49	2	10	12,8	5,9	5,1	43,415	49,100	51,216	43,415	85,300
11	12	49	2	11	13,2	6,1	4,8	38,832	39,149	39,999	38,832	74,400
12	12	49	2	12	13,2	6,4	4,7	26,833	26,878	27,180	26,833	51,600
13	12	49	2	13	13,5	6,1	4,5	41,484	41,484	42,305	41,601	79,400
14	12	49	2	14	13,3	6,7	4,6	54,942	54,942	64,830	59,052	108,100
15	12	49	2	15	13,1	6,1	4,7	54,919	54,919	76,144	70,679	111,100
16	12	49	2	16	13,2	6,0	4,6	18,514	18,514	18,826	18,868	35,700
17	12	49	2	17	13,1	5,4	4,6	6,002	6,002	8,909	10,895	11,530
18	12	49	2	18	12,6	5,0	4,7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
19	12	49	2	19	12,7	5,4	4,8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	12	49	2	20	12,4	5,3	5,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Figura 1. Esempio di dato climatico orario

2.1.2 Impostazione delle zone termiche e dei profili d'uso

Similmente all'impostazione del metodo stazionario, il metodo orario dinamico (EN ISO 52016-1) ragiona per "zone termiche" per le quali calcola simultaneamente i fabbisogni per riscaldamento o raffreddamento. Per ciascuna "zona termica" vengono presi in considerazione i seguenti elementi:

- l'aria ambiente della zona termica;
- le strutture opache che la delimitano verso l'esterno o verso le zone non riscaldate;
- le superfici trasparenti verso l'esterno
- i dati climatici esterni (come input).

L'aria dell'ambiente interno della zona termica è dotata di una sua temperatura ed una sua capacità termica che comprende anche il contributo (più o meno forfettario) dei mobili e di altri oggetti a contatto diretto con l'aria ambiente. La temperatura dell'aria interna si considera uniforme nell'intera zona termica, ma si differenzia da quella delle pareti, ciò permette la valutazione della temperatura operante.

Il profilo d'uso di ogni zona termica è dato su base oraria, e rappresenta la modellazione accurata della variabile umana. È possibile perciò definire per ogni intervallo di calcolo del modello (ogni ora dell'anno) uno specifico settaggio per (Figura 2):

- la temperatura interna richiesta [C°], per ogni step orario può essere di riscaldamento e/o di raffreddamento;
- l'eventuale temperatura di attenuazione [C°], ossia la temperatura di "set back" richiesta durante il non utilizzo degli ambienti;
- la ventilazione [mc/h], può essere settata secondo i ricambi d'aria richiesti dalle normative o secondo profili di personalizzati;
- gli apporti interni [W], basati sul n° occupanti presenti con le attività da loro svolte e, naturalmente, sugli altri carichi termici (illuminazione, apparecchiature elettriche,...);
- l'umidità dell'aria [kg/m²s] basata sul profilo delle attività presenti o anch'essa su dati di input standard.

Tali parametri vengono generalmente settati rispettando una programmazione settimanale ciclica tipica dell'uso della zona termica, possono essere impostati per periodi di riferimento (anno, stagione, mese, fino a giorni specifici) basati sull'effettivo uso dell'edificio in caso di diagnosi energetica oppure impostati secondo schemi di normativa in caso di asset rating o di progetto. Nello specifico, il calcolo di asset rating della APE presuppone che in tutti i locali riscaldati venga mantenuta una temperatura di 20 °C per 24h; ipotesi che, soprattutto nelle zone climatiche più miti, porta alla determinazione di fabbisogni teorici molto sovrastimati rispetto a quelli operativi reali.

L'articolazione dei profili d'uso diventa un elemento prezioso per il progetto dell'ottimizzazione del sistema edificio – impianto, o per l'efficientamento dello stesso. Naturalmente impostando una programmazione a temperatura libera (freefloating) su tutto il periodo di calcolo si può studiare nel dettaglio il comportamento dell'involucro senza l'influenza degli impianti, aspetto basilare per il progetto di edifici bioclimatici con impianti assenti o efficienze impiantistiche molto alte. Una impostazione rigorosa del profilo d'uso basata sullo studio delle condizioni reali (rilievi strumentali delle condizioni interne, studio dei registi di presenza, accurato censimento delle apparecchiature e dei sistemi,..) è uno dei parametri principali per definire modelli ben rappresentativi della condizione reale e quindi fondamentale in caso di diagnosi energetica.

	Riscaldamento		Raffrescamento		Ventilazione		Carichi interni		Umidità															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
i	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	20,0	20,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	20,0	20,0	20,0	20,0	18,0	18,0
m	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	20,0	20,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	20,0	20,0	20,0	20,0	18,0	18,0
m	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	20,0	20,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	20,0	20,0	20,0	20,0	18,0	18,0
g	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	20,0	20,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	20,0	20,0	20,0	20,0	18,0	18,0
v	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	20,0	20,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	20,0	20,0	20,0	20,0	18,0	18,0
s	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	18,0	18,0
d	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	18,0	18,0

Figura 2. Esempio di profilo d'uso su base settimanale

2.1.3 Modello di calcolo dinamico

La principale peculiarità del calcolo dinamico è che il modello esegue il bilancio termico per ogni intervallo temporale *i*-esimo tenendo conto delle condizioni fisiche del sistema nell'intervallo precedente; ciò gli permette di valutare correttamente l'effetto delle caratteristiche periodiche dell'involucro edilizio e le potenze richieste nei transitori degli impianti che il modello stazionario non simula in maniera efficace soprattutto per la stagione estiva. Infatti per ottenere una stima attendibile dei fabbisogni degli edifici usati di con un profilo continuo per un dato intervallo temporale di calcolo (es: stagione invernale), la norma prevede che il modello inizi il calcolo per almeno 15 giorni precedenti al fine di portare il sistema nella condizione reale. In altre parole se si vuole ottenere il calcolo invernale (dal 21 dicembre al 21 marzo), il modello inizierà a calcolare i bilanci termici dal 5 dicembre al fine di mettere il sistema in condizioni di regime. Ovviamente se siamo in un caso di edificio utilizzato solo per brevi periodi il calcolo dovrà tenere conto delle sue specifiche condizioni.

In questa sede non si entra nel dettaglio del modello di calcolo utilizzato, si accenna che esso rappresenta le caratteristiche termo fisiche delle strutture edilizie come un modello di circuito resistivo – capacitivo dove la massa è l'accumulatore, la trasmittanza è l'elemento resistivo e il flusso di calore la corrente (figura 3). Il bilancio termico ha come oggetto lo stato termo-igrometrico dell'aria interna, esso è rappresentato da una serie di "nodi" ai quali si può attribuire una capacità termica: un nodo è dedicato all'aria interna della zona termica, 5 nodi per ogni struttura opaca verso l'esterno e 2 nodi per ogni struttura trasparente verso l'esterno. Gli scambi termici sono definiti ai nodi e ricavano le temperature alla fine di ogni intervallo orario considerando:

- temperature dei nodi stessi all'inizio dell'ora;
- scambi termici fra i nodi;
- capacità termica dei nodi;
- iniezioni di potenza termica da parte dell'impianto e di altre sorgenti (apporti interni, irraggiamento solare, ecc.) in alcuni nodi.

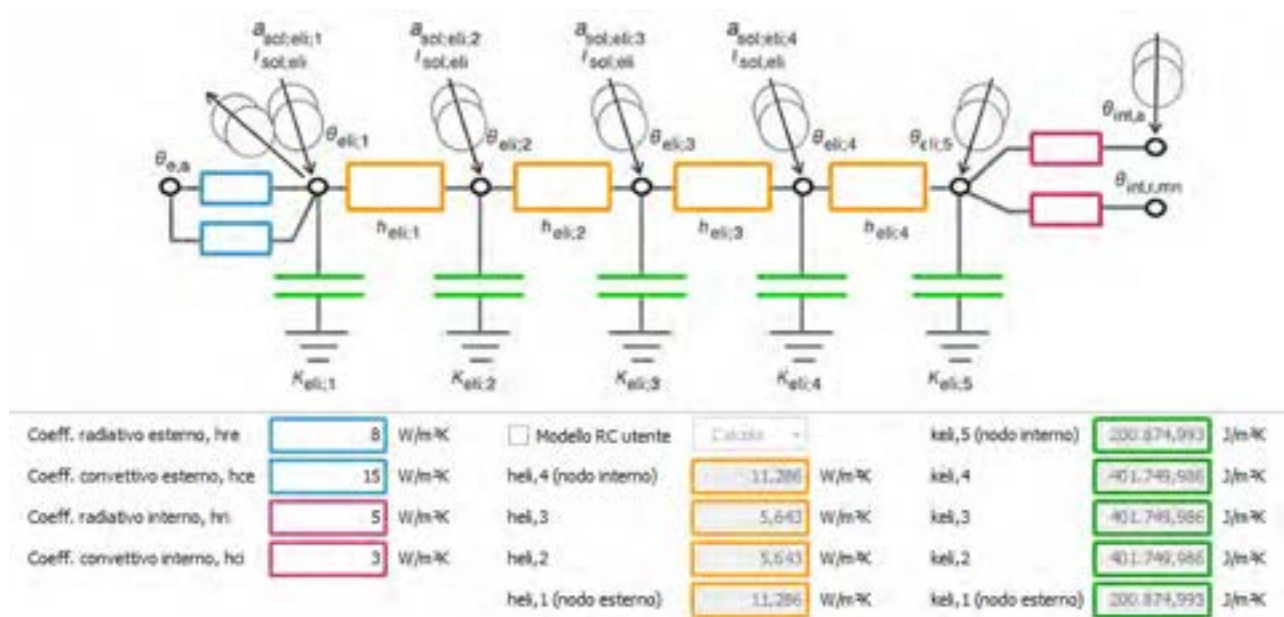


Figura 3. Rappresentazione grafica del calcolo Resistivo-Capacitivo (tratta dal software Termolog)

Combinando il modello energetico con i profili d'uso, il software utilizzato in questo lavoro permette di effettuare le seguenti tipologie di calcolo adatte a diversi scopi (figura 4):

- Calcolo con edificio e profilo d'uso reale, utile per modellare il sistema in caso di diagnosi energetica;
- Calcolo in temperatura libera (freefloating), senza impianto e senza controllo di temperatura, per avere l'andamento della temperatura interna operante senza influenza dell'impianto utile per la progettazione bioclimatica degli ambienti;
- Calcolo con profilo ideale e potenza infinita, utile per eseguire calcoli standard (asset rating e di progetto);
- Calcolo con profilo reale ma potenza infinita, utile per studiare il dimensionamento degli impianti nel caso specifico d'uso.

Oltre ad alcuni dati provenienti dalla modellazione del fabbisogno di energia utile dell'involucro e della potenza degli impianti, vi sono altri parametri di input del calcolo:

- Calore specifico dell'aria e dei mobili: il valore deve essere indicato in J/m²K;
- Frazione convettiva dei carichi interni: valore che moltiplica la potenza interna disponibile oraria. Nella tabella B.11 della EN ISO 52016:2017 si consiglia un valore di 0.40;
- Frazione convettiva degli apporti solari: valore che moltiplica la radiazione solare disponibile oraria. Nella tabella B.11 della EN ISO 52016:2017 si consiglia un valore di 0.10;
- Frazione convettiva degli apporti solari: valore che moltiplica la radiazione solare disponibile oraria. Nella tabella B.11 della EN ISO 52016:2017 si consiglia un valore di 0.40;
- Frazione convettiva degli apporti solari: valore che moltiplica la radiazione solare disponibile oraria. Nella tabella B.11 della EN ISO 52016:2017 si consiglia un valore di 0.40.

Calcolo orario

Opzioni di calcolo

☒ Carico termico con impianto specifico
☐ Temperature di involucro (Free floating)
☐ Carico termico con profilo ideale
☐ Carico termico ideale con profilo d'uso reale

Edificio e impianto reali
 Edificio senza impianto
 Profilo ideale e potenza infinita
 Profilo reale e potenza infinita

Valuta la temperatura di set-point secondo:
 ☒ calcolo ISO 52016 (utilizza temperatura operante)
 ☐ calcolo ASHRAE 140 (utilizza temperatura dell'aria interna)

☒ specifica intervallo: gennaio - dicembre

Zona climatizzata: Zona climatizzata - Museo Palea - Ingresso

Dettagli di calcolo

Superficie utile	80,27 m ²	Frazione convettiva dei carichi interni	0,40
Somma dei ponti termici (ht,ltb)	10,229 W/K	Frazione convettiva della radiazione solare	0,10
Potenza massima riscaldamento	4.542,90 W	Frazione convettiva del riscaldamento	0,40
Potenza massima raffreddamento	8.485,70 W	Frazione convettiva del raffreddamento	0,40

OK Annulla

Figura 4. Schermata del software che mostra le opzioni di calcolo disponibili

Il modello di calcolo è perciò in grado di determinare lo stato del sistema con un dettaglio temporale orario per qualsiasi intervallo di tempo selezionato calcolando (figure 5, 6):

- valore orario della temperatura interna dell'aria, della temperatura operante interna, della temperatura media radiante;
- carico termico sensibile e latente orario per riscaldamento e raffreddamento (figura 7);
- fabbisogno energetico sensibile e latente;
- condizioni termo-igrometriche dell'aria da immettere per garantire la necessaria umidificazione o deumidificazione.



Figura 5. Esempio di Andamento annuale delle temperature interne ed esterna in presenza di impianti di climatizzazione.



Figura 6. Esempio di Statistiche mensili di temperatura

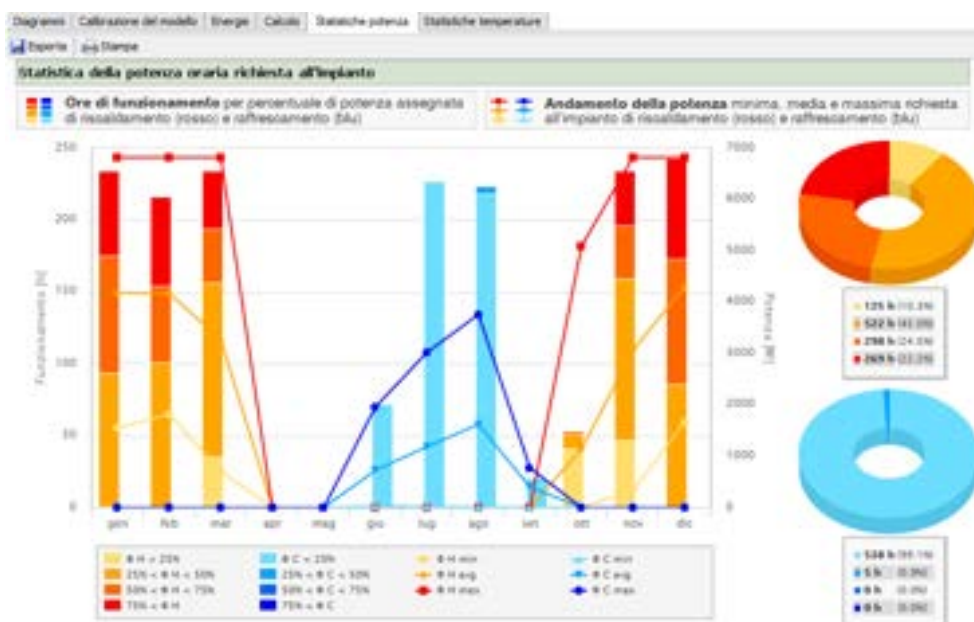


Figura 7. Esempio di grafici di potenza richiesta elaborati dal software

2.1.4 La modellazione dell'involucro

La modalità di inserimento dei dati dell'involucro proposta nel calcolo dinamico semplificato della EN ISO 52016:2018 è simile a quella adottata dall'attuale normativa tecnica vigente, solo che in questo caso la posizione degli strati nel pacchetto edilizio influenza direttamente il risultato del calcolo. Tutti i tipi di stratigrafia dell'involucro sono modellati fisicamente tramite il modello RC proposto dalla normativa, esso propone cinque tipi di strutture in funzione della disposizione della resistenza termica e della massa (figura 8) e considera gli elementi trasparenti di capacità termica nulla: isolante verso l'interno (tipo I), isolante verso l'esterno (tipo E), isolante intercluso (tipo EI), isolante distribuito o non isolato (tipo D), isolante interno ed esterno (Tipo M).

Perciò per giungere correttamente al risultato, gli elementi disperdenti che caratterizzano l'involucro, interpretati attraverso il modello RC, devono essere specificati interamente nella loro stratigrafia. In caso di edifici esistenti dove non siano note le caratteristiche costruttive dell'involucro, oltre alle misure volte alla determinazione della resistenza termica possono perciò essere necessarie indagini per determinare nel dettaglio la stratigrafia interna.

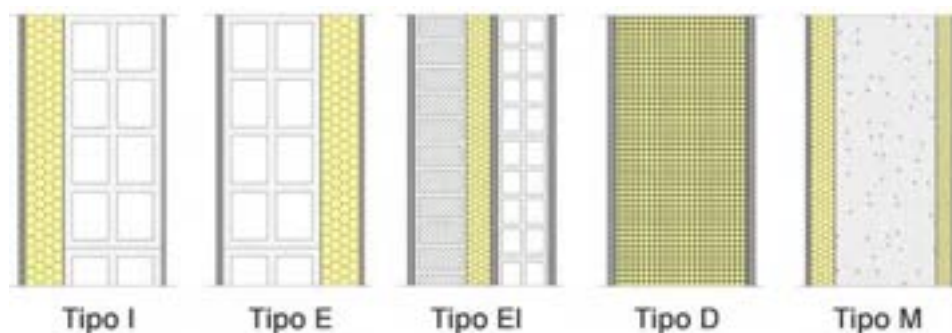


Figura 8. Rappresentazione dei tipi di chiusure opache previste dalla normativa

2.2 Dati di ingresso e parametri del modello energetico

I dati di ingresso relativi alle caratteristiche del sistema edificio – impianto degli edifici oggetto dello studio saranno presentate in maniera sintetica, rimandando per i dettagli al report precedente con i suoi allegati, mentre più spazio verrà dato ai risultati specifici della modellazione dinamica ed al confronto con lo stato attuale definito precedentemente col modello stazionario.

Per impostazione dei profili d'uso ci si è riferiti allo studio svolto in precedenza basato sul rilievo delle condizioni di comfort interne e le interviste ai fruitori degli spazi. Nel caso di mancanza totale o parziale dei dati, si sono utilizzati i settaggi standard o tipologici già adoperati per le simulazioni in regime stazionario svolte nella fase precedente. Tali settaggi hanno riguardato prevalentemente:

- la definizione delle zone termiche (estive, invernali),
- le temperature interne abitualmente mantenute nei locali climatizzati e non riscaldati adiacenti,
- il numero di presenti e le attività svolte dagli utilizzatori abituali nei diversi locali,
- la valutazione dei carichi termici aggiuntivi (apparecchi elettrici, attrezzature varie, ...),
- il profilo reale di utilizzo degli impianti e delle schermature mobili
- settaggio standard o di progetto per la ventilazione e le portate degli impianti UTA.

Nella simulazione dinamica svolta in questo lavoro, si sono approfonditi gli studi su due parametri del sistema edificio-impianto che sono stati inseriti in luogo di quelli ipotizzati in precedenza:

- valori termo-fisici della roccia locale “Trachite Rossa”, tramite l'utilizzo dello strumento di misura sviluppato nell'ambito dello stesso periodo di programmazione;
- la specificazione dei parametri termo igrometrici e delle portate d'aria della UTA, tramite misura di un giorno tipo invernale.

Il profilo climatico utilizzato per la simulazione dinamica è stato definito sulla base dei data base del CTI per la località di Carbonia (Figura 9), essi sono gli stessi dati climatici utilizzati per il calcolo statico (UNI 10394:2016).

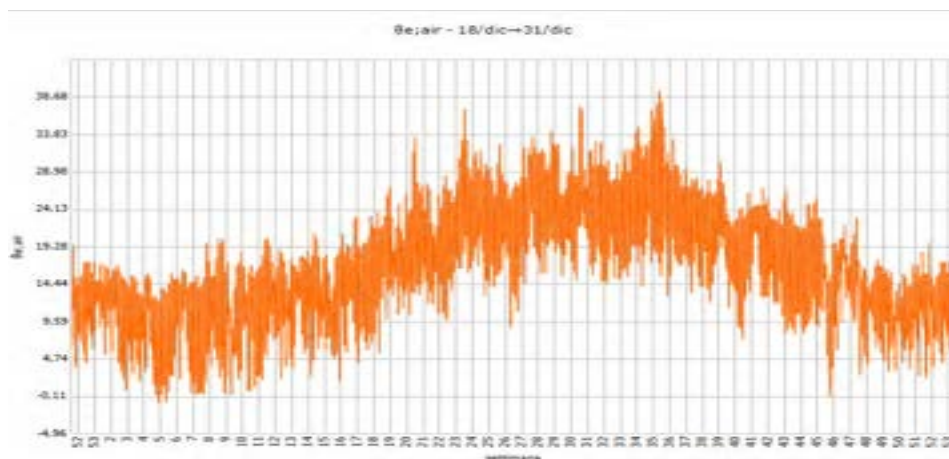


Figura 9. Andamento orario annuo delle temperature esterne della località di Carbonia

2.2.1 Prove in laboratorio sulla muratura

La muratura è costituita da conci squadrati lapidei di “*Trachite rossa*” posti con apparecchiatura regolare con stati di malta di calce, intonacata su due lati. Per valutare le caratteristiche termiche del materiale si sono effettuate delle prove in laboratorio con lo strumento realizzato nell’ambito del progetto. Gli edifici dell’ambito di studio sono protetti dal Mibact perciò non è stato possibile ricavare da essi dei saggi di muratura. I campioni da analizzare sono stati perciò reperiti direttamente in campagna, presso le cave (ormai abbandonate) che furono utilizzate per il materiale lapideo da costruzione. Si tratta di due località nelle vicinanze della città di Carbonia denominate: cava di Monte Crobu e la cava di Su Nuraxi. Le due formazioni hanno composizione mineralogica simili ma differiscono per tessitura, aggregazione e colore.

La preparazione dei campioni partendo dal materiale lapideo raccolto in campagna ha incontrato alcune difficoltà inaspettate. Il materiale, proprio per la sua natura di roccia ignimbratica, è caratterizzato da forte variabilità di tessitura e da frequenti piani di frattura interni legati alla interclusione di stati deposizionali di cenere o da strati più vetrosi che generano variabilità anche all’interno della stessa cava di estrazione. Inoltre gli elementi lapidei recuperati in campagna non avevano forme regolari e spesso presentavano fenomeni di degrado causato dagli agenti atmosferici. La realizzazione dei provini delle dimensioni adeguate allo strumento (170x240mm ed 20-50mm di spessore) è stata perciò difficile perché il materiale era soggetto ad improvvise rotture durante la lavorazione, perciò la maggior parte dei campioni recuperati presso i siti di cava è andata perduta (tabella 2).

Si sono tuttavia effettuate diverse misure di densità su spezzoni di campioni (8 campioni M.Crobu, 8 Campioni Su Nuraxi) che hanno portato ad individuare una densità media di circa 2050 [kg/m³] per i provini della cava di Su Nuraxi e 2260 [kg/m³] per quelli di Monte Crobu (tabella 2). I valori di densità sono caratterizzati da una buona uniformità, ma bisogna considerare che derivano dalle parti della cava attualmente accessibili che hanno caratteristiche piuttosto omogenee ma che possono essere sensibilmente differenti dai fronti di cava utilizzati durante la costruzione della città di Carbonia.

Per rispettare i tempi della ricerca si sono potuti realizzare solo due provini delle dimensioni utili per effettuare la prova: uno relativo alla cava di Monte Crobu ed l’altro per quella di Su Nuraxi. I provini si mostrano abbastanza differenti tra loro per peso, tessitura e colore. Il campione di Monte Crobu mostra una facies vetrosa di colore più scuro del normale che può essere considerata una particolarità all’interno della formazione. Al contrario il campione di Su Nuraxi può essere considerato molto simile al materiale lapideo utilizzato negli edifici analizzati (tabella 1).

Si riportano i risultati di conducibilità termica di questi campioni, ricavati come media di dieci cicli di misura per ognuno. Per definire un valore affidabile di conducibilità termica è perciò necessario recuperare altri campioni su cui effettuare il test in modo da avere un risultato statisticamente più rilevante. Si può anche notare che il risultato ottenuto per il campione di Su Nuraxi è simile a quello proposto dagli abachi della normativa che è stato adottato per la modellazione stazionaria (tufo roccia naturale; 2300 [kg/m³]; 1,700 [W/mK]), perciò l’effetto nel suo inserimento nel calcolo dinamico è al momento trascurabile (tabella 1).

Tabella 1. Provini utilizzati per la prova di conducibilità

		
Provino di Su Nuraxi		Provino di monte Crobu
	Conducibilità [W/mK]	Densità [kg/m³]
<i>Monte Crobu</i>	1,846	2463
<i>Su Nuraxi</i>	1,662	2015

Tabella 2. Zoom su alcuni campioni di roccia, si evidenziano le fratture e la presenza di cenere

	
Monte Crobu (8 campioni)	Densità media 2260 [kg/m³] (+/- 6%)
Su Nuraxi (8 campioni)	Densità media 2050 [kg/m³] (+/- 3%)

2.3 Risultati e discussione

In questo documento si riportano i risultati più significativi ottenuti con la modellazione energetica dinamica, quelli della modellazione statica (*Asset Rating* e *Tailored Rating*) sono già stati esposti nel report precedente e verranno ripresi in maniera sintetica solo per effettuare i confronti.

Il calcolo dinamico semplificato è stato eseguito facendo riferimento alla temperatura interna operante (ISO EN 52016-1) e non alla sola temperatura dell'aria in modo da dare risalto alle condizioni di comfort percepite e non a quelle teoriche, infatti la temperatura operante è la media tra la temperatura dell'aria e quella delle superfici interne dell'involucro.

Il calcolo è stato eseguito nelle seguenti modalità: profilo ed impianto reale, profilo reale con potenza infinita. Queste modalità sono state utili per la discussione sul dimensionamento impiantistico e per confrontare i fabbisogno energetico mensile ed annuo.

La presentazione dei risultati si basa principalmente sul confronto critico tra i risultati ottenuti dalle modellazioni energetiche (*Asset rating*, *Talored rating*, EN ISO 52016) eseguite per gli edifici oggetto di studio [10]. Essi possono riguardare:

- eventuali omissioni o punti di debolezza dei modelli energetici sviluppati, in modo da indirizzare verso altre verifiche;
- il confronto tra i risultati dei diversi modelli (semi-stazionario, Dinamico)
- l'uso della metodologia per il confronto tra fabbisogni teorici e le serie storiche dei consumi dei diversi vettori energetici dell'edificio (firma energetica), che tuttavia nel nostro caso non si è potuto effettuare per la mancanza dei dati di base sui consumi energetici.

3 Risultati: Museo del Carbone

3.1 Descrizione generale

Il Museo del Carbone appartiene al complesso della *Grande Miniera di Serbariu* posta nella periferia sud-occidentale della città di Carbonia (figura 10). L'edificio ha un asse maggiore orientato NE-SO e si compone di tre corpi di fabbrica adiacenti a pianta rettangolare ed un elemento aggiunto a pianta circolare posto a sud-est (figura 10, vedi tavole grafiche allegate alle diagnosi dell'elaborato precedente).

Il corpo principale (CF_A), posto al centro dell'edificio, è caratterizzato da una volta ad arco realizzata tramite una imponente struttura latero – cementizia, gli altri corpi di fabbrica (CF_B, CF_C, CF_A1/A2) sono tutti caratterizzati da coperture piane latero – cementizie originali (figura 11). Il corpo di fabbrica principale è attualmente utilizzato come sala espositiva, esso è adiacente alla sala congressi (verso nord - est), ed alla Zona Libreria ed uffici (verso sud-ovest).

I locali adibiti a BAR ed uffici hanno superfici finestrate prevalentemente esposte a Sud-Ovest, la sala conferenze si affaccia verso Nord-Est, mentre l'area museale presenta superfici finestrate su tutti i lati. I corpi centrali (CF_A, CF_A1, CF_A2) sono caratterizzati da avere ognuno una copertura trasparente disposta longitudinalmente, il corpo principale (CF_A) è anche provvisto di estese chiusure vetrate verticali localizzate nei frontoni dell'edificio orientati nord-est e sud – ovest (figura 12).



Figura 10. Museo Del Carbone e complesso della Grande Miniera di Serbariu (Ortofoto 2013 RAS)

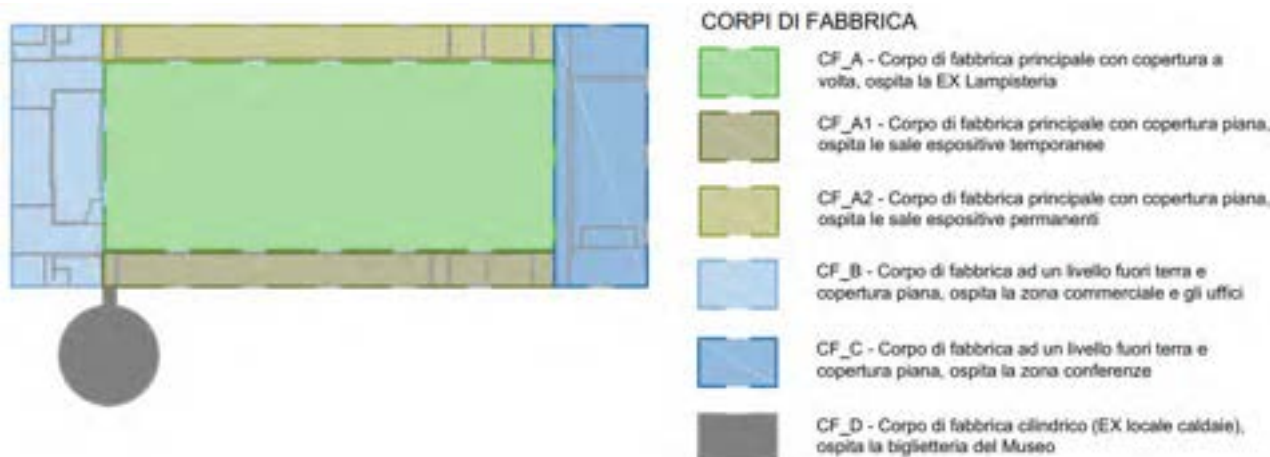


Figura 11. Individuazione dei Corpi di fabbrica

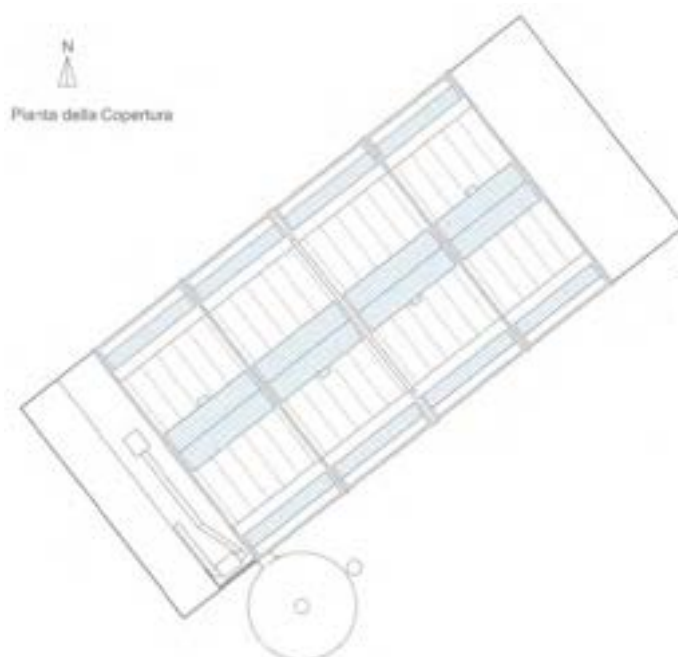


Figura 12. Planimetria della copertura



Figura 13. Vista sul complesso del Museo del Carbone, prospetto sud-est

L'edificio è realizzato in muratura portante lapidea di provenienza locale denominata "*Trachite rossa*" utilizzata per realizzare la muratura perimetrale ed alcuni setti portanti, inoltre è caratterizzato da una imponente struttura intelaiata in CA per il sostegno delle coperture latero cementizie (figura 13). Nei corpi di fabbrica più bassi (CF_2 e CF_3) la muratura può essere considerata portante in quanto si conclude con un robusto cordolo di ripartizione in CA che costituisce il vincolo strutturale del solaio latero-cementizio. Nel CF più alto (CF_1) la muratura collabora con i portali in CA che sostengono la copertura a volta.

L'edificio è stato oggetto di un restauro completo nel 2004-2006 che ne ha risanato e rinnovato l'involucro edilizio e ne ha adeguato la dotazione tecnologico impiantistica alle esigenze di un'area museale. L'intervento ha avuto un approccio conservativo, non è stato inserito isolamento termico nelle chiusure verticali mentre le coperture sono state coibentate con un sottile strato di EPS accoppiato a guaina bituminosa.

Nello specifico il restauro ha compreso le seguenti lavorazioni:

- Ripristino della muratura in elevazione e delle chiusure orizzontali esistenti;
- Restauro e parziale modifica delle chiusure finestrate;
- Realizzazione delle coperture trasparenti in luogo di originali elementi opachi;
- Installazione degli impianti di climatizzazione e produzione di ACS;
- Realizzazione dell'impianto di ventilazione della sala espositiva tramite il recupero e potenziamento di quello storico esistente;

- Realizzazione ed adeguamento di impianti tecnici (elettrico, idrico, fognario, antincendio, sorveglianza, ...);
- Adeguamento degli ambienti e delle finiture interne alla destinazione d'uso museale.

3.2 Zone Termiche e Profilo d'uso

Per il calcolo dinamico si è adottata la stessa articolazione delle zone termiche e lo stesso profilo d'uso utilizzato nel lavoro precedente, ricavato da misurazioni microclimatiche interne e da interviste ai fruitori degli spazi (Tabella 3, Figura 14).

Il volume climatizzato coincide in larga parte con quello previsto dal progetto di recupero, ossia esso si configura in due zone termiche principali: una costantemente riscaldata che comprende la parte commerciale (Libreria e BAR) e gli uffici (generatore HP_1) e l'altra da riscaldare all'occorrenza coincidente con la zona conferenze (generatore HP_2).

Nel nostro caso, il calcolo ha riguardato la parte ad uso continuo servita dalla HP_1, la quale è articolata in tre zone termiche per quattro locali:

- *Zona_1 (Zona commerciale: locali Libreria e BAR)*, provvista di sistema di climatizzazione a tutt'aria e caratterizzata da un profilo d'uso dell'impianto continuo (invernale, estivo) e da un limitato numero di presenti soprattutto in inverno;
- *Zona_3 (Ufficio)*, provvista di ventilconvettori e caratterizzata da un profilo d'uso dell'impianto continuo (invernale, estivo) ed un alto numero di presenti rispetto alla superficie disponibile;
- *Zona_4 (Deposito)*, provvista di ventilconvettori e caratterizzata da un uso dell'impianto saltuario (invernale, estivo) accoppiato a breve permanenza e un limitato numero di presenti.

L'area conferenza si struttura su due locali (Zona_2: ingresso, auditorium) serviti da un impianto di climatizzazione a tutt'aria ad essa dedicata (generatore HP_2). L'edificio si caratterizza inoltre per un ampio spazio espositivo articolato su diversi ambienti comunicanti provvisto di sola ventilazione per il ricambio d'aria (Zona 5).

Allo stato attuale, inoltre, non sono disponibili le serie storiche dei consumi in quanto il museo è alimentato da un punto di presa che comprende anche altri edifici del complesso della miniera.

Tabella 3. Sintesi del profilo personalizzato adottato

Zone termiche		Impianti				Profilo d'uso			
		Climatizzazione		Ventilazione		N° utenti		Presenza	
zona	descrizione	Invernale	Estiva	Invernale	Estiva	Invernale	Estiva	Invernale	Estiva
Zona_1	zona commerciale	HP_1	HP_1	no	no	2-4	20	continua	continua
Zona_2	Zona conferenza	HP_2	HP_2	no	no	50	50	saltuaria_2	saltuaria_2
Zona_3	Uffici	HP_1	HP_1	no	no	2-4	2-4	continua	continua
Zona_4	Deposito	HP_1	HP_1	no	no	1	1	saltuaria_1	saltuaria_1
Zona_5	Area espositiva	no	no	no	Vent_1/2	5 - 10	20 - 400	periodica	periodica

continua presenza continua durante le ore di apertura del Museo

saltuaria_2 forte presenza ma legata ad eventi molto saltuari (conferenze)

saltuaria_1 presenza quotidiana di breve durata (manutenzioni, deposito materiali,...)

periodica presenza ricorrente (es: si concentra nei fine settimana)

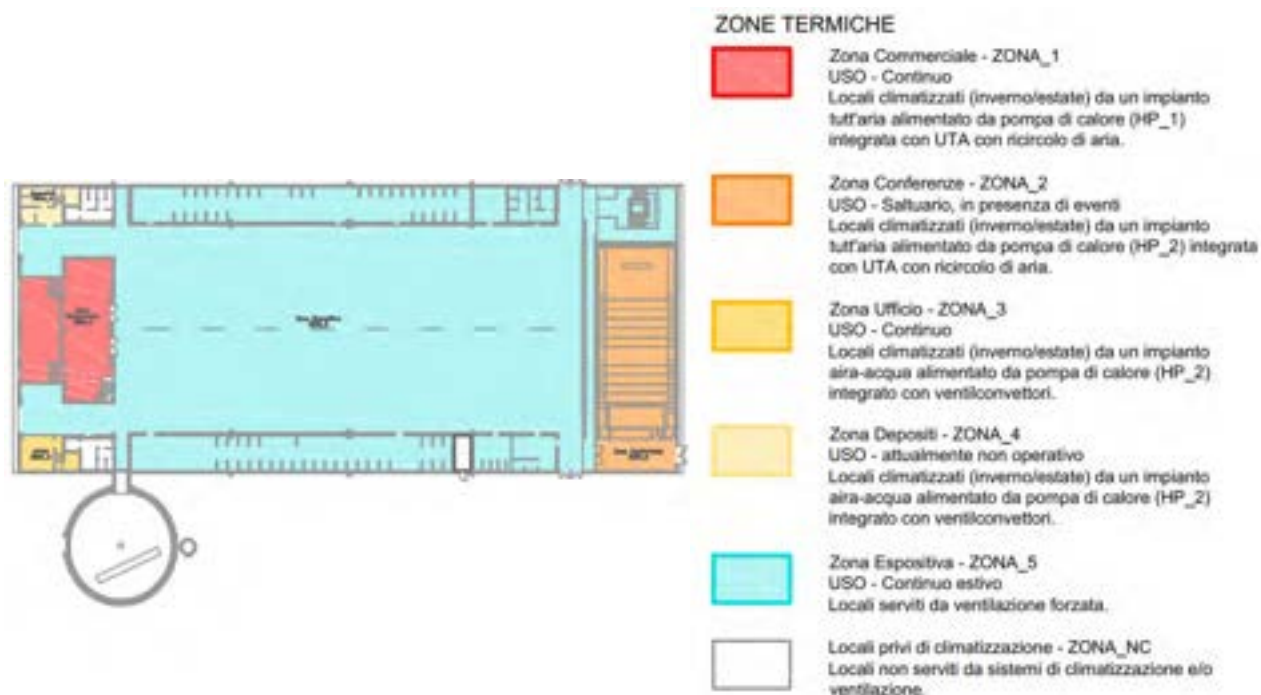


Figura 14. Articolazione delle Zone Termiche

3.3 Involucro

I dati sui componenti dell'involucro edilizio sono stati principalmente desunti dalla osservazione in loco, lo studio di alcune foto storiche e dalla documentazione fotografica relativa al cantiere di recupero (restauro del 2004-6). Lo stato di conservazione è stato studiato tramite attività di indagine con termocamera e igrometro a contatto.

Le chiusure verticali opache delle zone termiche analizzate sono principalmente costituite dalla muratura originale in trachite rossa (spessore 35cm) intonacate su due lati.

La copertura delle zone termiche è orizzontale ed è costituita dal solaio latero-cementizio che è stato recuperato con uno stato di isolamento termico (2cm EPS) e guaina bituminosa. Lo strato impermeabile e quello coibente versano attualmente in avanzato stato di degrado, non proteggendo adeguatamente la struttura.

La chiusura di base di tutte le zone termiche è costruita da una soletta latero-cementizia (originale) che confina con un locale seminterrato aperto su due lati, originariamente utilizzato per il ricovero delle biciclette dei lavoratori della miniera.

Le finestre del BAR sono orientate verso sud-ovest nell'unico lato esposto all'ambiente esterno del locale; esse sono costituite da un telaio metallico e vetro singolo.

I locali dell'Ufficio e del Deposito hanno doppia esposizione (SE-SW ufficio; SW-NW deposito) entrambe con apertura finestrata realizzata con telaio ligneo e vetro singolo.

Per approfondimenti sullo stato di conservazione e le verifiche termo-igrometriche si rimanda al documento precedente, qui si riporta una sintesi delle caratteristiche termo-igrometriche degli elementi di fabbrica adottate per il calcolo stazionario (Tabella 4, Tabella 5)

Tabella 4. Elementi costruttivi che delimitano le zone termiche analizzate

Codice	Descrizione	Rilievo: degrado, uso
Ch_Vert_01	Muratura portante originale in "trachite rossa" (Spessore 35 cm) con intonaci a base di calce originali restaurati.	Umidità di risalita localmente severa
Ch_Vert_02	Nuovo Tramezzo interno in laterizio forato (8cm spessore) intonacato su due lati.	
Cop_01	Copertura orizzontale storica in solaio latero cementizio, recuperata con cappotto esterno in EPS (2cm spessore) accoppiata a guaina ardesiata.	Degrado del manto impermeabile e dello stato coibente; Diffuse e severe infiltrazioni di acqua meteorica
Base_01	Solaio latero cementizio storico con pavimentazione in marmettoni	
fin-01	Finestre del BAR, telaio metallico fisso (70x70cm), vetro singolo senza schermatura.	
fin-02	Finestre dell'Ufficio e del Deposito, telaio ligneo (120x120cm) a doppio battente, vetro singolo e veneziane interne.	Telaio ligneo ammalorato, limitata tenuta all'aria
Por_01	Porte interne in vetro spessore 6 mm	

Tabella 5. Prestazioni termiche degli elementi costruttivi che delimitano le zone termiche analizzate

Strutture verticali opache	Trasmittanza U W/(m ² K)	Trasmittanza corretta U' W/(m ² K)	Trasmittanza limite Ulimite W/(m ² K)	Verifica
Muro_museo_carbo - Parete 1384 (pa0011)	2,281	2,332	0,340	NO
Muro_museo_carbo - Parete 1384_int_in (pa0027)	1,892	1,892	0,340	NO
Muro_museo_carbo - Parete 1384-interno (pa0026)	1,892	1,952	0,340	NO
Tramezzo_interno (pa0030)	1,276	1,314	0,340	NO
Tramezzo_interno_INT (pa0040)	1,276	1,276	0,340	NO
Strutture orizzontali opache di pavimento	Trasmittanza U W/(m ² K)	Trasmittanza corretta U' W/(m ² K)	Trasmittanza limite Ulimite W/(m ² K)	Verifica
Base_01 - (Pavimento dei locali: Bar, Libreria, Uffici, Deposito)	1,573	1,573	0,380	NO
Strutture orizzontali opache di copertura	Trasmittanza U W/(m ² K)	Trasmittanza corretta U' W/(m ² K)	Trasmittanza limite Ulimite W/(m ² K)	Verifica
Copertura_orizz_carbo - E (co0004)	0,904	0,904	0,330	NO
Serramenti	Trasmittanza U W/(m ² K)	Trasmittanza limite Ulimite W/(m ² K)	Verifica	
Fin_01 – (finestre su esterno dei locali: BAR)	5,8	2,2	NO	
Fin_02 – (finestre su esterno dei locali: Ufficio, Deposito)	4,8	2,2	NO	
Por_01 – (porte su ZnR dei locali: Libreria, BAR, Ufficio, Deposito)	3,76	2,2	NO	

3.4 Sistema impiantistico

I dati di base sul sistema impiantistico derivano dai dati di targa e dalla ricerca delle schede tecniche in rete. La documentazione non è completa in quanto non si hanno dati certi su portate, potenze degli ausiliari ed i dati reperiti in rete sui generatori non sono completi dei fattori di carico.

Il museo è dotato di un impianto di climatizzazione (tutt'aria e idronico) per il riscaldamento ed il raffrescamento suddivisibile in due sistemi indipendenti:

- HP_1 – Pompa di Calore aria – acqua (Systemair CLH202-LN), accoppiata a due circuiti di distribuzione: circuito aeraulico (UTA_1) per servire la zona commerciale, terminali idronici (fancoil) per l'ufficio ed il deposito.
- HP_2 - Pompa di Calore aria – acqua (Systemair VLH604-LN), accoppiata a un circuito aeraulico (UTA_2) per la zona conferenza.

La parte dell'edificio oggetto di modellazione è servita in maniera esclusiva dal generatore HP_1, situato all'esterno dell'edificio in uno spazio apposito. La distribuzione primaria del fluido termovettore avviene tramite una rete di tubazioni di diversa sezione, in parte realizzata sotto traccia e generalmente provvista di spessori di isolamento coerenti con la normativa. I generatori sono provvisti di gruppo idronico che pompa il fluido termo condizionato (refrigerato o riscaldato) verso il circuito aeraulico, costituito dalla Unità di Trattamento d'Aria (UTA_1), e verso il circuito idronico che alimenta due ventilconvettori.

L'UTA_1 è posizionata nella copertura sopra il corpo di fabbrica che ospita l'area commerciale (CF_B), essa effettua un ricircolo parziale d'aria interna ed i suoi aspiratori mostrano una potenza oraria assorbita di circa 1000 W (ottenuto tramite misura durante attività).

I due ventilconvettori sono posizionati uno nell'ufficio e l'altro nei locali utilizzati come deposito, la ventola ha 90W di potenza di targa.

Seguono le caratteristiche sintetiche del generatore del sistema di climatizzazione, per maggiori dettagli si rimanda all'allegato 1 del precedente lavoro.

Caratteristiche sottosistema di Generazione:

Dati generali:

Servizio	Riscaldamento / Raffrescamento
Tipo di generatore	Pompa di calore (Aria - Acqua)
Marca/Serie/Modello	SystemAir - CLH S LN 202
Tipo di pompa di calore	Elettrica

Prestazioni dichiarate: dati di targa da scheda tecnica

Coefficiente di prestazione (risc / raff)	COP / EER	3,37 / 3,13
Potenza utile (risc / raff)	P _{uh} / P _{uc}	58,00 / 54,80 kW
Potenza elettrica assorbita (risc / raff)	P _{ass}	17,2 / 17,5 kW
Funzionamento	on/off a gradini	50 %

3.5 Indagine sulla UTA

L'indagine ha avuto lo scopo di definire i parametri termo-igrometrici e le portate d'aria di immissione e di estrazione della UTA_1 che effettua il servizio di climatizzazione invernale ed estiva della zona commerciale costituita dai locali: Libreria e BAR. Per i dettagli si rimanda alla parte dedicata (paragrafo 7), qui si riportano i risultati finali che hanno costituito l'input del modello dinamico.

I due locali sono comunicanti tra loro, l'immissione dell'aria è effettuata dallo stesso canale che serve entrambi i locali, mentre la presa di emissione è posta solo nel locale Libreria. Sono presenti tre bocchette

dirette dal canale principale di immissione per ogni locale, mentre è presente una sola bocchetta di estrazione realizzata all'interno di un lucernaio (tabella 7).

Nei due locali sono stati effettuati anche dei monitoraggi del comfort interno in settimane tipo (estive ed invernali) tramite stazione microclimatica (Analisi del comfort microclimatico degli edifici pubblici storici costituenti l'area Grande Miniera di Serbariu. (PAR-2017)). I risultati hanno mostrato che l'impianto a tutt'aria in regime invernale fatica a raggiungere i limiti di comfort in entrambi i locali ma per motivi differenti: nel locale libreria le temperature sono al limite dell'accettabilità, mentre nel locale BAR si riscontrano temperature oltre il comfort ma fastidiose velocità dell'aria.

L'impostazione standard adottata per la modellazione stazionaria si basa sulla soddisfazione dei ricambi d'aria richiesta dalla normativa (UNI 10339) e sul dimensionamento di massima di impianto di termoventilazione/raffrescamento ad aria possa funzionare correttamente che considera una portata di aria di almeno 5-7 vol/h rispetto al volume dell'ambiente servito ed una temperatura di emissione di 26° (tabella 6).

Il rilievo effettuato durante un giorno tipo invernale (dicembre 2018) ha mostrato condizioni differenti di settaggio dell'impianto ma ha confermato la scarsa capacità dello stesso di raggiungere le temperature di set point dell'impianto e di mantenere confortevoli velocità dell'aria (tabella 8). In particolare le portate misurate risultano essere molto maggiori (+75% di m³ aria in ingresso) e la temperatura media di immissione è superiore a quella che si è utilizzato per il calcolo standard anche se ha una certa variazione durante la giornata (26-28°).

Tabella 6. Impostazioni Standard adottate

	<i>sup. utile [m]</i>	<i>H. netta [m]</i>	<i>Vol. [m3]</i>	<i>Persone [n°]</i>	<i>Coff. UTA [V/h]</i>	<i>Ricambio [m3 persona]</i>	<i>Aria Esterna [m3/h]</i>	<i>Ricircolo [m3/h]</i>	<i>Immissione [m3/h]</i>
LIBRERIA	92	2,50	231	20	7	17	340	1274	1614
BAR	60	3,50	210	20	7	30	600	870	1470
totali	152		441	40			940	2144	3084

Tabella 7. Bocchette di immissione ed estrazione

Ingresso					Uscita				
Libreria	<i>n°</i>	<i>h [m]</i>	<i>l [m]</i>	<i>sup [m2]</i>		<i>n°</i>	<i>h [m]</i>	<i>l [m]</i>	<i>sup [m2]</i>
bocchette L	3	0,2	0,4	0,08	bocchetta	1	0,4	0,7	0,28
BAR	<i>n°</i>	<i>h [m]</i>	<i>l [m]</i>	<i>sup [m2]</i>		<i>n°</i>	<i>h [m]</i>	<i>l [m]</i>	<i>sup [m2]</i>
bocchette B	3	0,2	0,4	0,08					

Tabella 8. Parametri rilevati

Dati Aria di ingresso				
	V_i [m/s]	Por [m ³ /h]	$temp$ [c°]	UR [%]
bocchetta L1	3,14	905	28,2	37
bocchetta L2	4,12	1187	28,2	36
bocchetta L3	1,41	405	28,1	36
bocchette B1	3,12	898	28,1	36
bocchette B2	3,23	930	28,2	37
bocchette B3	3,17	914	28,2	37
Portata tot.		5238		

Dati Aria Uscita				
	V_o [m/s]	Por [m ³ /h]	$temp$ [c°]	UR [%]
bocchetta	4,93	4972	19,2	63
Portata tot.		4972		

3.6 Risultati modellazione

In coerenza col lavoro precedente, la modellazione energetica è stata eseguita per le zone termiche dell'edificio climatizzate in maniera pressoché continua durante le ore di apertura, ossia la zona commerciale (BAR, Libreria), gli uffici, ed il deposito.

3.6.1 Fabbisogno di energia utile dell'involucro

Il fabbisogno di energia utile dell'involucro mostra una netta preponderanza della stagione invernale (energia e carichi termici) rispetto a quelli estivi. Il fabbisogno del calcolo stazionario personalizzato (*Tailored Rating*) è molto inferiore a quelli degli altri due modelli, il fabbisogno invernale maggiore è del calcolo stazionario in condizioni standard (asset rating), mentre il fabbisogno estivo ricavato col calcolo dinamico supera quello degli altri due (figura 17).

L'andamento mensile dei fabbisogni di energia termica (figura 18) mostra come il fabbisogno invernale calcolato in *Asset Rating* (UNI 11300) sia generalmente il maggiore nella stagione invernale, tuttavia per alcuni mesi delle stagioni intermedie (marzo, aprile, novembre) il fabbisogno ricavato dal modello dinamico è superiore a quello del calcolo stazionario. Ciò approssima meglio la condizione reale rilevata anche dalle analisi microclimatiche effettuate nei locali del museo e riportata anche dalle interviste (Analisi del comfort microclimatico degli edifici pubblici storici costituenti l'area Grande Miniera di Serbariu. - PAR-2017).

I risultati ottenuti dal modello dinamico nei mesi di massimo carico estivo (luglio, agosto) sono simili a quelli ricavati col metodo stazionario standard e molto superiori a quello personalizzato, tuttavia il metodo dinamico ricava fabbisogni maggiori durante i mesi intermedi che portano ad un valore annuo molto maggiore (figure 17,18).

La ripartizione dei fabbisogni di riscaldamento nei locali mostra risultati paragonabili tra le diverse metodologie di calcolo, mentre nel caso estivo il calcolo stazionario registra una maggiore incidenza dei locali serviti dal circuito aeraulico (figure 19,20).

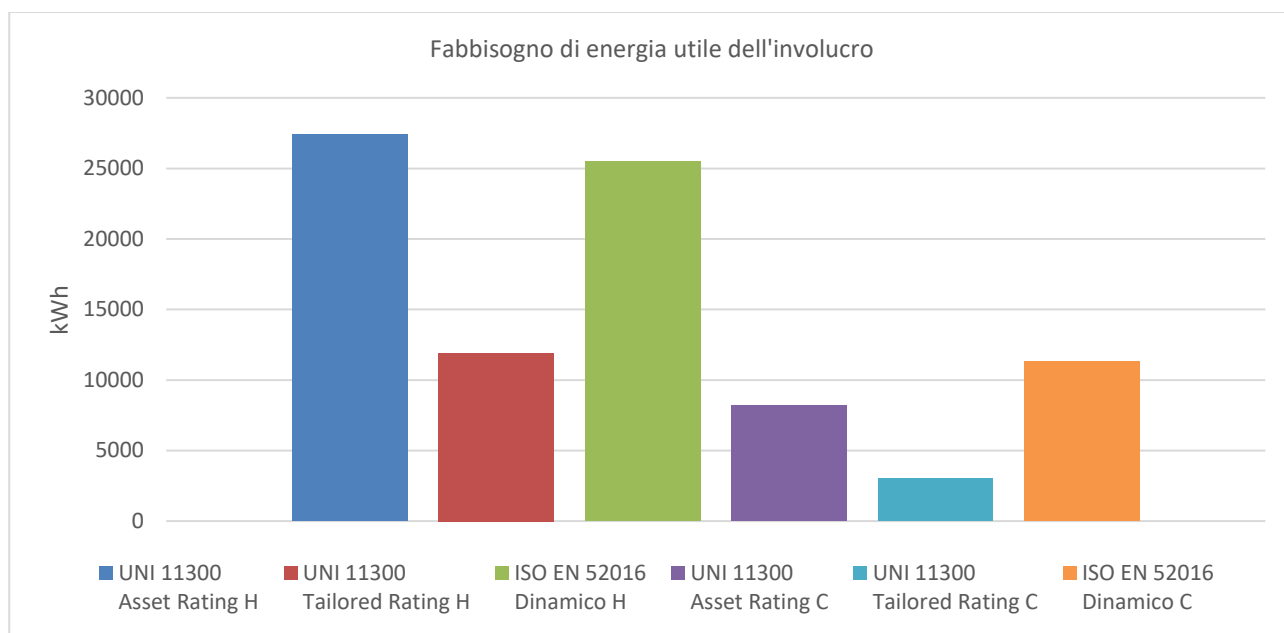


Figura 17. Confronto annuo del fabbisogno di energia utile calcolato con UNI 11300 (Asset rating, Tailored rating) e secondo la UNI ISO 52016

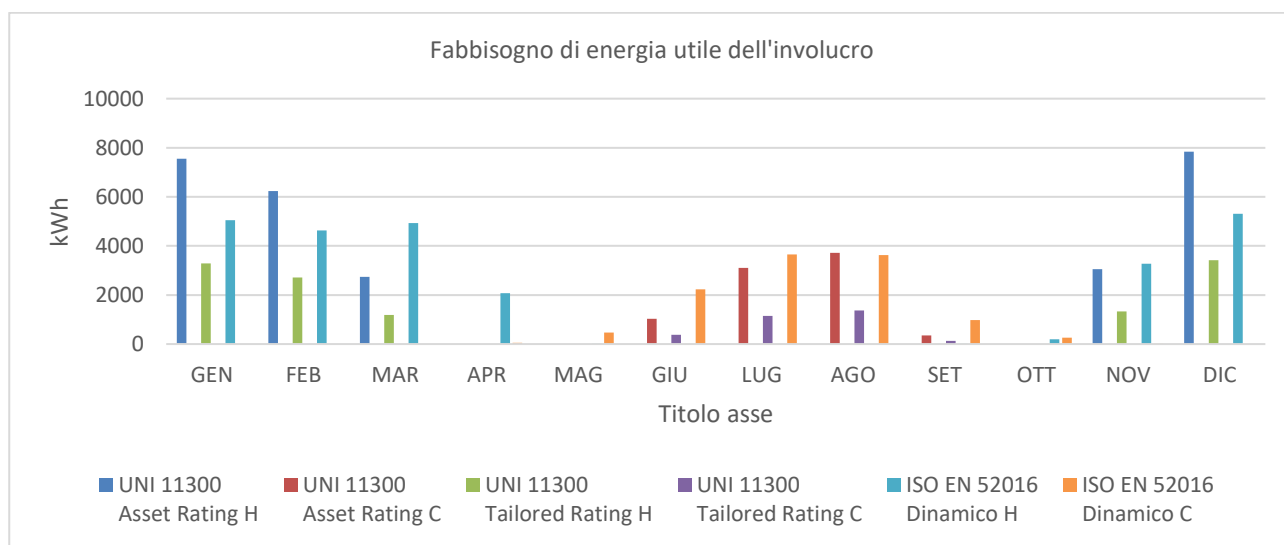


Figura 18. Confronto mensile del fabbisogno di energia utile calcolato con UNI 11300 (Asset rating, Tailored rating) e secondo la UNI ISO 52016

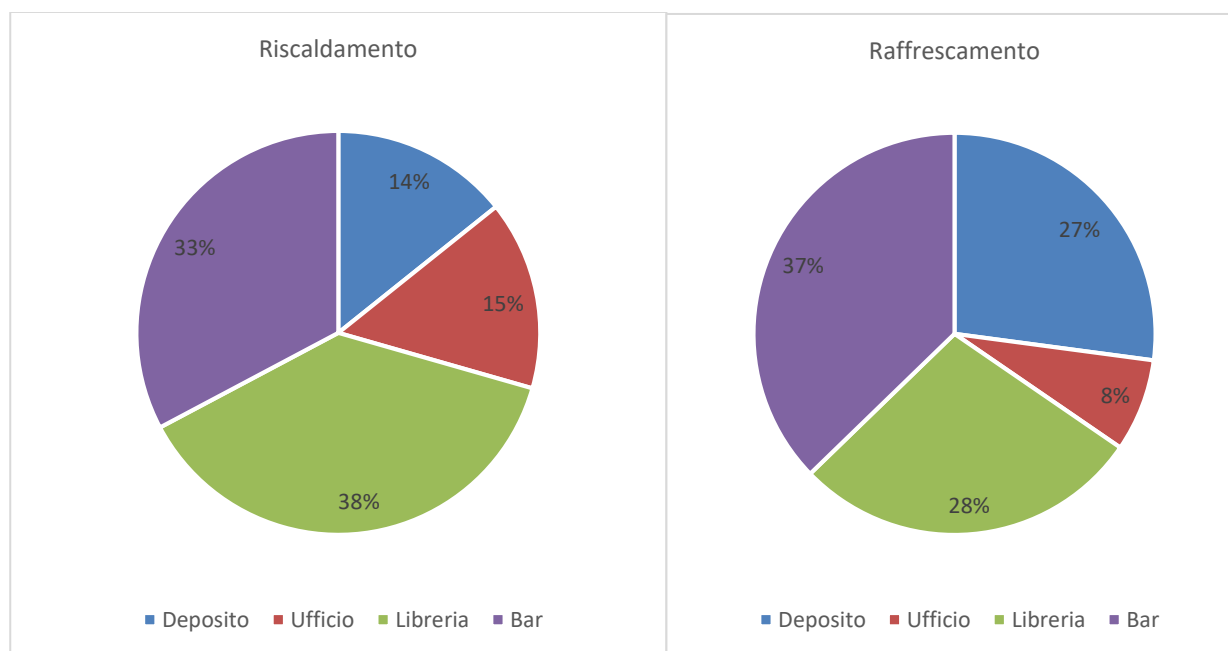


Figura 19. Ripartizione del fabbisogno di energia utile dell'involucro nei diversi ambienti (ISO EN 52016)

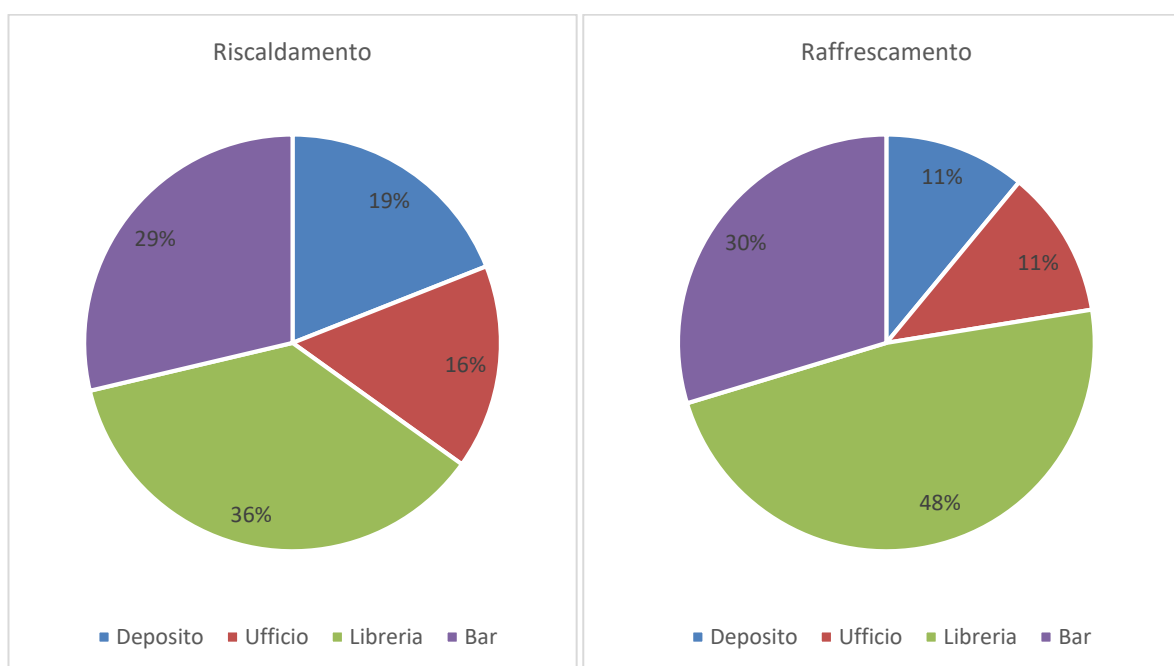


Figura 20. Ripartizione del fabbisogno di energia utile dell'involucro nei diversi ambienti (UNI 11300 – Asset Rating)

3.6.2 Andamento delle temperature e carico termico

La modellazione dinamica permette di studiare l'andamento dei parametri di temperatura interna (Temp. aria, temp. media radiante, temp. operativa) con un diverso dettaglio temporale (orario, giornaliero, settimanale, mensile, stagionale, ...) in funzione delle condizioni climatiche esterne, dell'inerzia termica delle strutture ed il funzionamento degli impianti. Ciò permette di analizzare con maggiore precisione le potenze richieste ai sistemi impiantistici.

La potenza termica invernale installata è coerente con il carico termico ricavato col metodo stazionario (UNI 12831), mentre in estate risulta essere sottodimensionata per i locali serviti dal circuito a aeraulico (libreria, BAR) (Tabella 9).

Il calcolo dinamico, invece, genera dei carichi termici teorici più alti per garantire il comfort durante i transitori generati dal funzionamento intermittente (invernale ed estivo). Infatti la potenza massima calcolata da modello dinamico è 2-3 volte superiore a quella media e gli impianti si trovano spesso a funzionare ai massimi regimi soprattutto durante il periodo invernale (figure 21, 22, 23, 24).

Le potenze medie (Tabella 9) invece sembrano essere più coerenti con quelle ottenute con il metodo standard, tuttavia mostrano differenze non trascurabili. Per il circuito idronico le potenze medie (invernali, estive) calcolate dal modello dinamico sembrano essere paragonabili a quelle ottenute col calcolo standard. Osservando il sistema a tutt'aria si assiste invece a risultati più discordanti: il carico medio estivo in dinamico è in generale inferiore a quello ottenuto col metodo Carrier, mentre il carico invernale del circuito aeraulico sembra essere molto maggiore.

Tabella 9. Carichi termici (estivi / invernali) dei locali

locali	P_h	Φ_h	Avg (sdt)h	Avg (Din)h	Max (Din)h	P_c	Φ_c	Avg (sdt)c	Avg (Din)c	Max (din)c
Bar	7816	7991	6856	15978	49425	7680	14780	6484	8072	19107
Libreria	7816	8516	7816	17820	55084	7680	16813	5428	5880	12496
Ufficio	3500	3225	3408	4662	15206	2800	3935	1565	1619	3683
Deposito	3500	4045	3471	5115	16549	2800	3616	2800	5247	9096

P_h, P_c potenza (risc / raffr) del sistema installato

Φ_h Carico termico invernale (UNI 12831)

Φ_c Carico termico estivo (Carrier - Pizzetti)

Avg (sdt) h/c Potenza media (risc / raffr) calcolata col modello statico

Avg (Din) h/c Potenza media mensile max (risc / raffr) calcolata col modello dinamico

Max (Din) h/c Potenza massima (risc / raffr) calcolata col modello dinamico

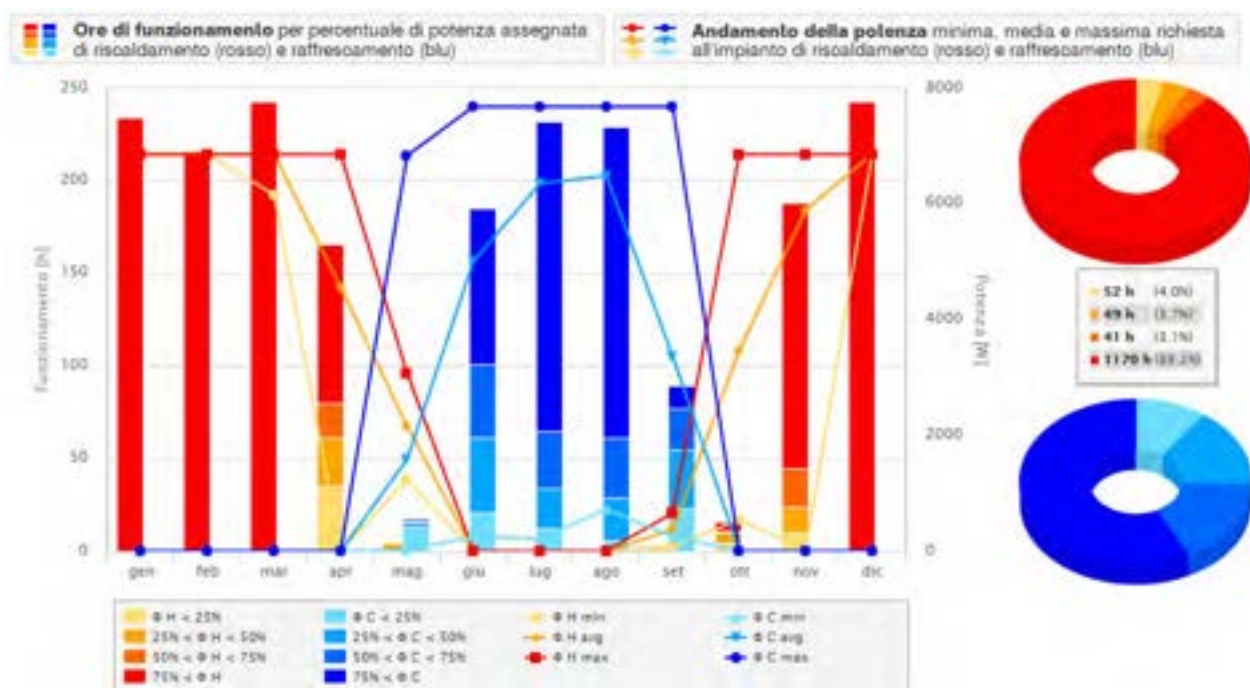


Figura 21. Grafico delle ore funzionamento e potenze locale: BAR

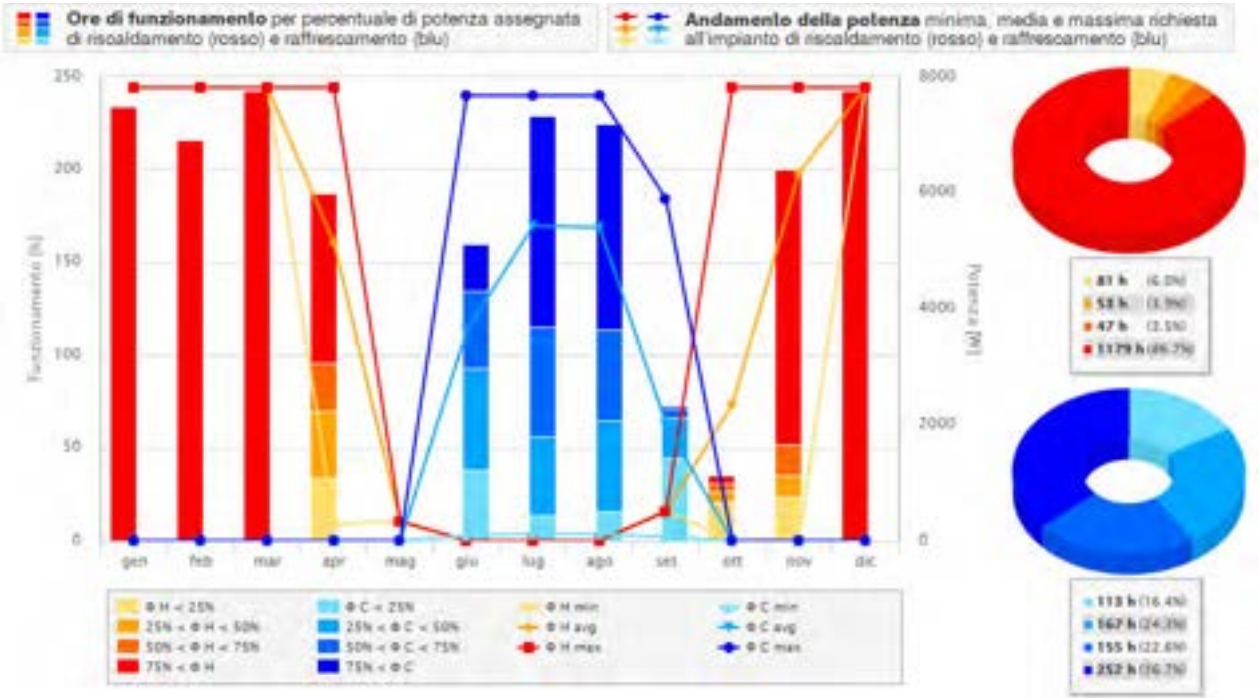


Figura 22. Grafico delle ore funzionamento e potenze locale: Libreria

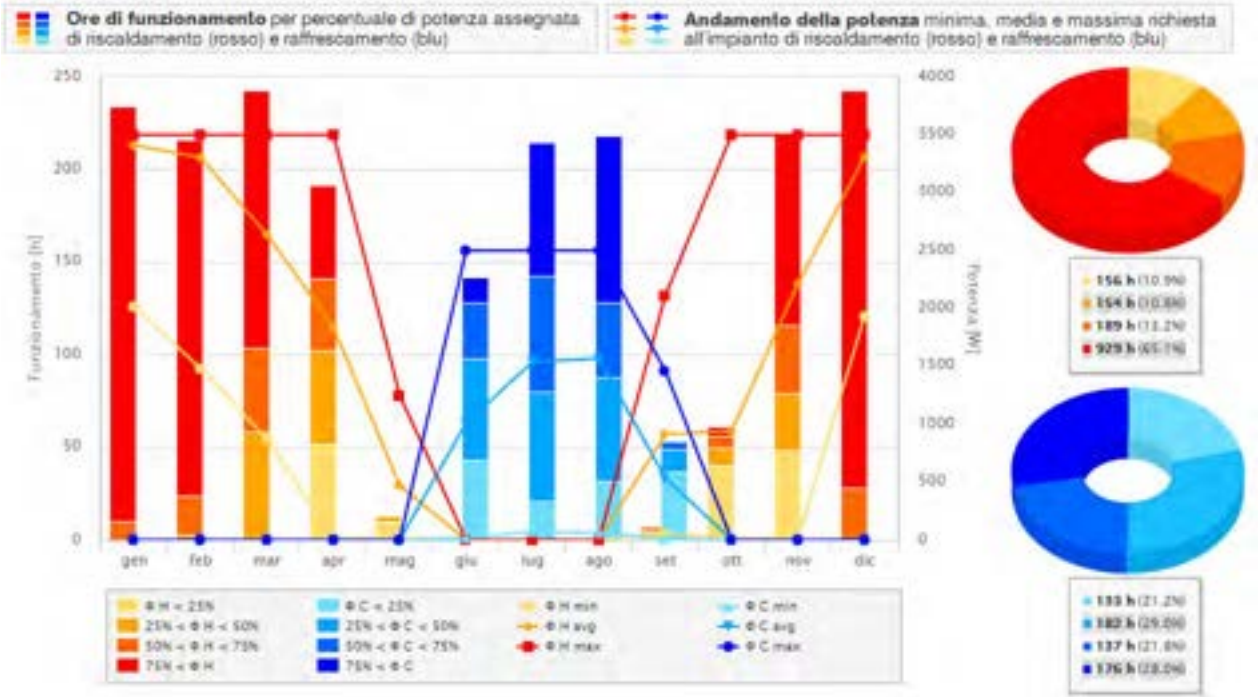


Figura 23. Grafico delle ore funzionamento e potenze locale: Ufficio

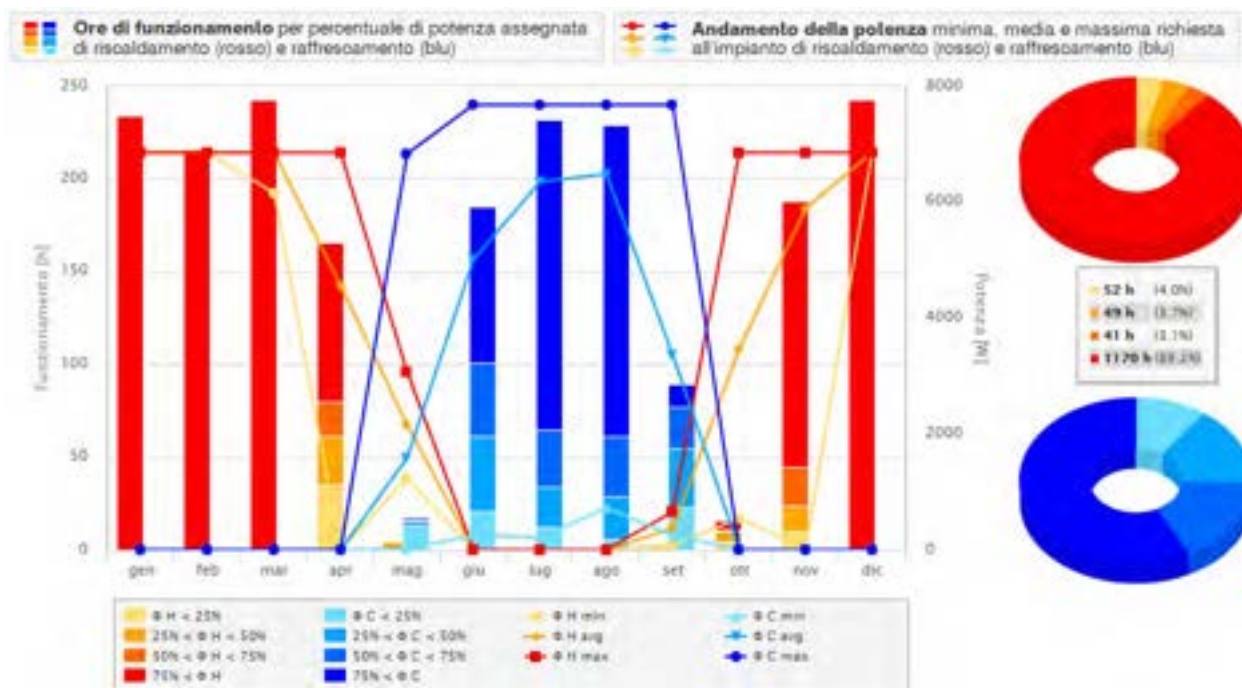


Figura 24. Grafico delle ore funzionamento e potenze locale: Deposito

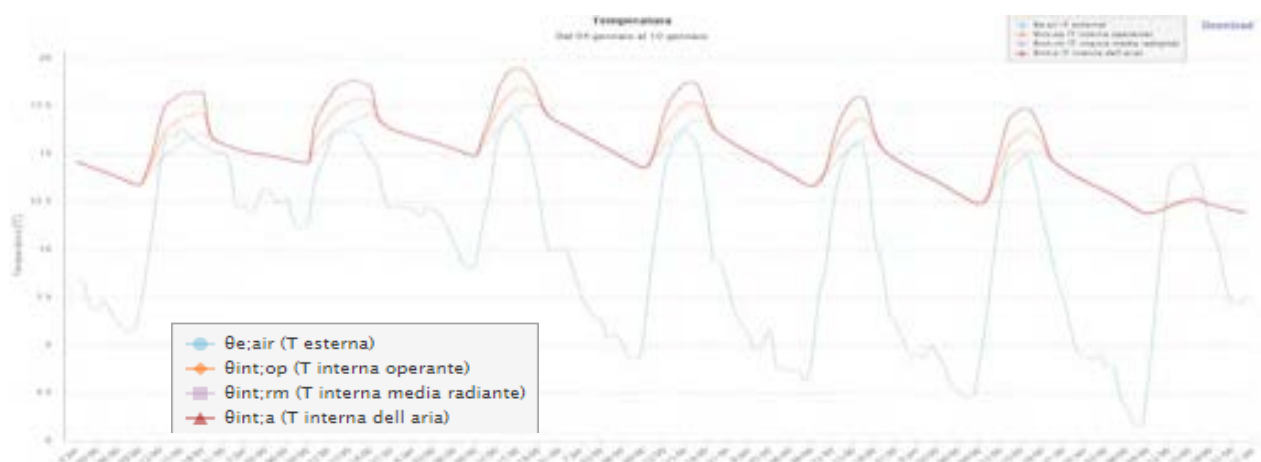


Figura 25. Andamento temperature settimana invernale tipo: locale BAR

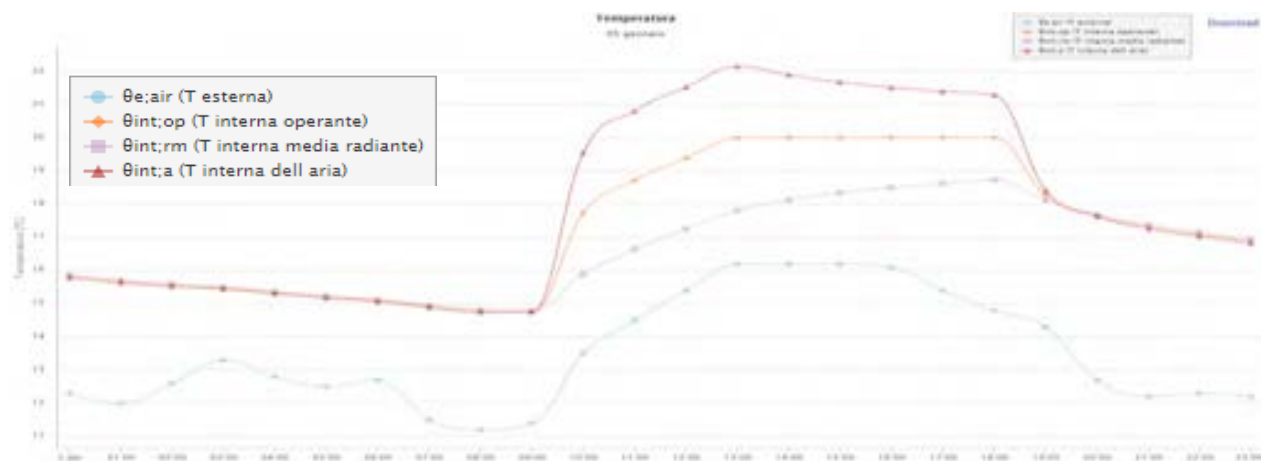


Figura 26. Andamento temperature giorno invernale tipo: locale BAR

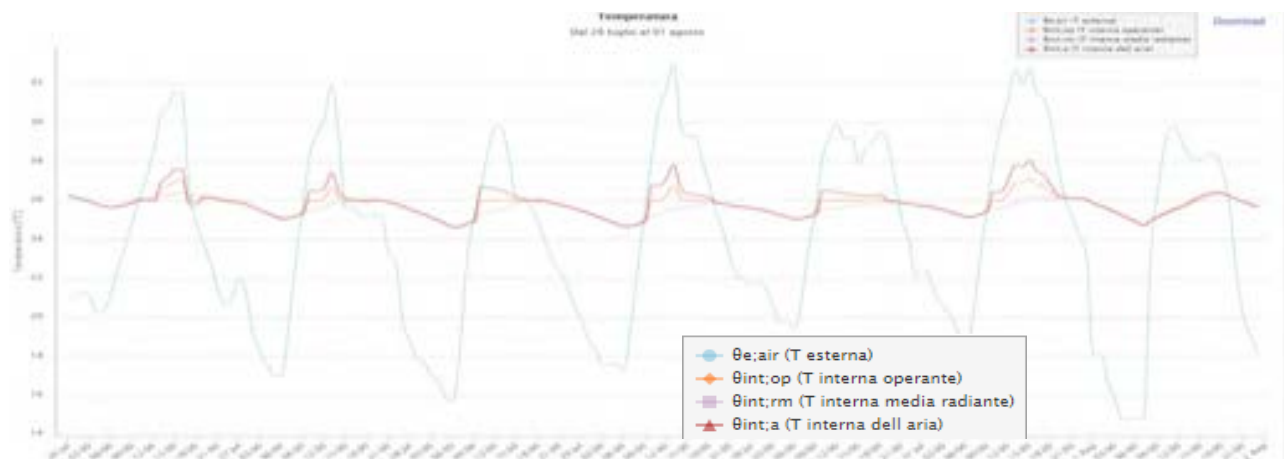


Figura 27. Andamento temperature settimana estiva tipo: locale BAR

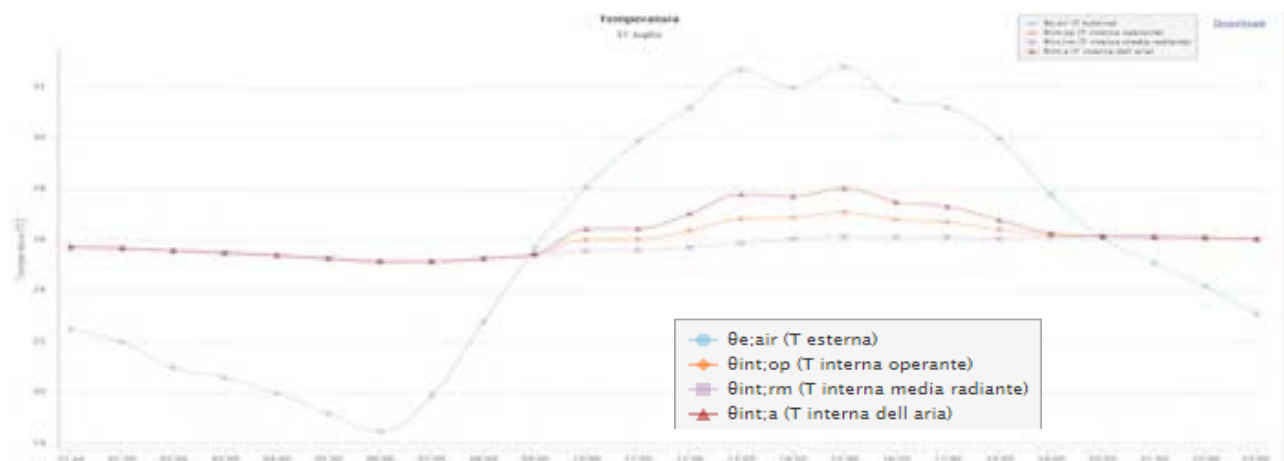


Figura 28. Andamento temperature giorno estivo tipo: locale BAR

3.6.3 Confronto dei fabbisogni energetici

In generale i risultati mostrano forti fabbisogni legati alla scarsa performance dell'involucro, alla bassa efficienza dei sottoinsiemi impiantistici (emissione, regolazione, distribuzione, ...) ed alla limitata capacità modulante della pompa di calore. Inoltre il fabbisogno per ventilazione dei locali Bar e libreria (circuito aerulico UTA) incide in maniera non trascurabile sul bilancio. Si ricorda però che il calcolo dei fabbisogni energetici è stato effettuato sulla base di alcune assunzioni iniziali:

- utilizzando impostazioni di ricambi d'aria da normativa per il calcolo stazionario, in quanto non si sono potute valutare le portate e le temperature reali;
- utilizzando fattori di calcolo tipologici, in quanto non si dispone di schede tecniche adeguate degli impianti che sono stati realizzati nel 2006.

Le prestazioni dei sottoinsiemi impiantistici (emissione, regolazione, distribuzione) sono comuni a tutti i modelli energetici (Tabella 10), mentre i tre calcoli hanno ricavato rendimenti di generazione differenti basate sui fattori di carico dell'impianto (Tabella 11). Il modello stazionario personalizzato (*Tailored Rating*) pur avendo dei fabbisogni di energia utile molto inferiori è gravato da fattori di carico più penalizzanti che lo hanno portato a fabbisogni di energia elettrica paragonabili agli altri.

Il modello dinamico sembra ottimizzare meglio il funzionamento estivo della pompa di calore arrivando ad un fabbisogno elettrico per il servizio di raffrescamento minore pur partendo dal fabbisogno di energie utile

maggiore. Infatti i costi operativi teorici stimati dal modello stazionario Tailored e dal Dinamico sono molto simili e naturalmente inferiori di circa il 20% rispetto al calcolo standard.

Tabella 10. Rendimenti dei sottosistemi impiantistici

<i>sottosistemi Impiantistici</i>	<i>Circuito Aeraulico</i>	<i>Cicuito idronico</i>	
	<i>BAR/Libreria</i>	<i>Ufficio</i>	<i>Deposito</i>
rendimento emissione (inv/est)	0,92 / 0,97	0,94 / 0,98	0,94 / 0,98
rendimento regolazione (inv/est)	0,75 / 0,75	0,85 / 0,85	0,85 / 0,85
rendimento distribuzione (inv/est)	0,88 / 0,85	0,99 / 0,93	0,82 / 0,35

Tabella 11. Confronto dei fabbisogni energetici

	Service	11300 std	11300 tai	ISO 52016
<i>Fabbisogno energia utile</i>	H	27416	11926	25469
	C	8189	3022	11303
<i>Energia in uscita dal generatore</i>	H	66764	29376	52731
	C	28575	10573	33490
<i>Energia in ingresso dal generatore</i>	H	23260	18050	20438
	C	10395	7277	10087
<i>Efficienza di generazione</i>	H	2,87	1,63	2,58
	C	2,75	1,45	3,32
<i>Energia Elettrica</i>	H	29763	23099	24962
	C	18815	13102	15947
	V	4723	4070	2128
	tot	53301	40271	43037
<i>Efficienza complessiva</i>	H	0,92	0,52	1,02
	C	0,44	0,23	0,71
<i>Costo operativo</i>	tot	10660	8054	8607

Si analizzano ora brevemente alcune ipotesi di intervento tra le più rilevanti per la modellazione energetica già discusse nel documento precedente al quale si rimanda per i dettagli (tabella 12). La valutazione delle ipotesi di intervento col modello dinamico mostra risultati differenti rispetto al modello stazionario (tabella 13). Il minore costo operativo annuo porta a maggiori tempi di ritorno, assimilabili a quelli stimati col modello Tailored, invece gli effetti sul fabbisogno differiscono tra i due modelli pur mantenendo risultati coerenti tra di loro. Il modello dinamico sembra sfavorire maggiormente l'isolamento dell'involucro in quanto genera un aumento del fabbisogno estivo. Mentre la sostituzione degli impianti mantiene un impatto simile tra le due simulazioni energetiche.

Tabella 12. Selezione di alcune ipotesi di intervento

Codice	Descrizione	Costo stimato [Euro]
AZ_Inv_01	<u>Isolamento muratura</u> : cappotto termico interno da 10cm in materiale compatibile	31650
AZ_inv_02	<u>Isolamento Copertura</u> : cappotto termico esterno da 14cm, considerato come lavorazione aggiuntiva di un intervento di manutenzione straordinario della impermeabilizzazione ormai necessario.	10300
AZ_Inv_03	<u>Pellicole selettiva</u> : intervento di schermatura dall'irraggiamento solare realizzato tramite pellicole trasparenti selettive	800
AZ_inv_05	<u>Isolamento solaio di base</u> : con cappotto termico esterno realizzato dal locale sottostante	10100
AZ_Clima_01	Sostituzione HP: sostituzione del generatore con una Pompa di calore (aria-acqua) di maggiore capacità modulante	15000
AZ_clima_02	Sostituzione HP (meno): sostituzione del generatore con una Pompa di calore (aria-acqua) di maggiore capacità modulante e minore potenza	10000

Tabella 13. Valutazione delle ipotesi di intervento coi due modelli (UNI 11300 – asset rating; ISO EN 52016-1)

Codice	UNI 11300 -Asset Rating				ISO EN 52016-1			
	Temp. Rit [anni]	Costo operativo [euro]	Variazione Fabbisogno energetico [%]	Variazione Costi operativi [%]	Temp. Rit [anni]	Costo operativo [euro]	Variazione Fabbisogno energetico [%]	Variazione Costi operativi [%]
AZ_Inv_01	36	10660	-8,3	-8,3	95	8607	-3,5	-3,5
AZ_inv_02	25	10660	-3,9	-3,9	30	8607	-4,5	-4,5
AZ_Inv_03	3,1	10660	-2,4	-2,4	3,6	8607	-2,8	-2,8
AZ_inv_05		10660	0,6	0,6		8607	1,8	1,8
AZ_Clima_01	7,7	10660	-18,3	-18,3	10,3	8607	-20,6	-20,6
AZ_clima_02	4,6	10660	-20,5	-20,5	7,2	8607	-24,4	-24,4

4 Risultati: Museo dei Paleo Ambienti Sulcitani (PAS)

4.1 Descrizione generale

Il Museo dei Paleo Ambienti Sulcitani (PAS) appartiene al complesso della Grande Miniera di Serbariu situata nella periferia sud-occidentale della ex città mineraria di Carbonia (figura 29). Esso si struttura con un corpo principale rettangolare a due livelli con asse maggiore orientato NE-SO e due corpi laterali ad un solo livello disposti a formare una pianta quadrata che delimita una corte interna (figura 29). L'edificio ha tre lati esposti verso l'esterno (nord-ovest, nord-est e sud ovest) mentre nel suo lato sud-est confina con un altro corpo di fabbrica di dimensioni maggiori che ospita altri uffici pubblici.

Il corpo di fabbrica principale a due livelli ha una copertura a falde di nuova realizzazione mentre gli altri hanno la copertura piana originaria. La struttura in elevazione è interamente realizzata in una muratura portate lapidea storica denominata "trachite rossa". Le coperture orizzontali delle parti ad un livello sono costituite dagli originali solai latero cementizi, mentre le coperture del corpo a due livelli (museum_1) e di alcuni locali che danno verso la corte (BAR e servizi igienici adiacenti) sono nuove coperture lignee.

L'edificio era parte delle officine meccaniche della miniera, il restauro completo effettuato nel 2007 ha ricostruito e rinnovato l'involucro edilizio ed ha provveduto alla installazione della dotazione impiantistica necessaria alle attività museali. L'intervento ha avuto un approccio parzialmente conservativo in quanto sono stati realizzati diversi nuovi volumi edilizi e la copertura del corpo di fabbrica principale è stata completamente sostituita con una a struttura lignea. In particolare, alcuni nuovi copri di fabbrica sono stati realizzati verso la corte interna aventi destinazione d'uso di progetto BAR e servizi igienici annessi. Tali locali hanno copertura lignea, il locale BAR è caratterizzato da una ampia vetrata priva di schermature che affaccia verso la corte con orientamento sud-est.

Le coperture orizzontali originarie sono state conservate ma si è aggiunto dell'isolante ed un nuovo massetto delle pendenze in calcestruzzo alleggerito.

Le chiusure di base sono state fortemente modificate con sbancamenti e la realizzazione del massetto di pavimentazione sopra un vespaio areato e forti spessori calcestruzzo.

Le pareti perimetrali non sono state isolate ma è stata realizzata una contro parete interna con un foglio di laterizio forato (8 cm spessore) per l'alloggiamento degli impianti e la protezione dalla umidità di risalita.

Nello specifico il restauro ha compreso le seguenti lavorazioni:

- Ripristino della muratura (intonaci e materiale lapideo) con l'inserimento di contro parete interne e placcatura esterna in trachite rossa nella muratura perimetrale.
- Ripristino delle coperture orizzontali latero cementizie con aggiunta di isolamento termico e di nuova impermeabilizzazione;
- Sostituzione delle chiusure finestrate con altre lignee con vetrocamera di simile fattura;
- Realizzazione di alcune nuove coperture e di nuovi ambienti nella corte interna (BAR, servizi annessi);
- Installazione di un impianto di climatizzazione realizzato con pompa di calore e ventilconvettori;
- Installazione di impianti di ventilazione nei bagni e di impianti per la produzione di Acqua Calda Sanitaria (ACS);
- Realizzazione ed adeguamento di impianti tecnici (elettrico, idrico, fognario, antincendio, sorveglianza, ...).



Figura 29. Individuazione dell'Edificio nel complesso della Grande Miniera di Serbariu (Ortofoto 2013 RAS)



Figura 30. Museo PAS Prospetto Nord-ovest



Figura 31. Prospetto nord -est, il museo è sulla destra. A sinistra l'edificio confinato a due livelli, a destra si nota il corpo di fabbrica a due livelli della sala museale principale.

4.2 Zone termiche e profilo d'uso

L'articolazione delle zone termiche ed il profilo d'uso utilizzato per il calcolo dinamico sono gli stessi del lavoro precedente, ricavato da misurazioni microclimatiche interne e dalle interviste ai fruitori degli spazi (Tabella 14, Figura 32). Il progetto originale prevedeva la climatizzazione di gran parte della volumetria ad eccezione della sala espositiva principale (museo_1) e dei servizi, tuttavia allo stato attuale solo l'impianto della zona termica 2 risulta operativo.

L'uso attuale dell'edificio si basa sugli orari di apertura al pubblico ed è caratterizzato da tre profili d'uso:

- i dipendenti del museo (2-4 persone), che hanno una presenza continuativa nella zona uffici e nell'ingresso;
- i visitatori a permanenza breve (15-30 min), caratterizzati da un basso e discontinuo flusso nelle zone espositive;
- i visitatori a permanenza lunga (1-4 ore), che utilizzano gli ambienti dedicati alle attività didattiche.

Negli ultimi anni si sono avuti 10-20 eventi annui (attività con scuole, conferenze,) della durata di 3-5 ore concentrati durante la stagione primaverile che generano un fabbisogno termico difficilmente valutabile ed inoltre probabilmente trascurabile rispetto all'uso continuato dell'edificio.

Le sale museali sono aperte e visitabili durante gli orari di apertura del museo, le luci e le attrezzature espositive sono accese manualmente solo in presenza di visitatori, mentre gli impianti di climatizzazione vengono accesi per gli eventi o le attività didattiche che presuppongono una durata maggiore.

Il locale BAR ed i locali della biblioteca non sono stati attrezzati e sono attualmente utilizzati per le esposizioni temporanee. Il locale BAR è caratterizzato da una parete vetrata non schermata orientata a sud-ovest che in estate rende la sala inutilizzabile a causa delle alte temperature.

Durante la stagione invernale i dipendenti del museo utilizzano stufette elettriche per migliorare il comfort dei locali da loro utilizzati (Uffici 1-2, Hall) privi di impianto di climatizzazione funzionante, che permangono comunque al di sotto dei limiti di comfort accettabili.

La modellazione energetica perciò si è concentrata sugli ambienti utilizzati di continuo, ossia gli uffici e la Hall, considerando funzionante l'impianto presente. Inoltre allo stato attuale non sono disponibili le serie storiche dei consumi in quanto il museo è alimentato da un punto in bassa tensione che comprende anche altri edifici del complesso della miniera.

Tabella 14- Orari di apertura e profilo d'uso adottato

Zone Termiche			Temp. Riscaldamento [C°]			Temp. Raffrescamento [C°]		
Locali	Sup. [mq]	Vol. [mc]	Progetto	Media	Media Min.	Design	Media	Media Min.
Hall	81	315	20	15	14	26	31	32
Office_1	26	74	20	16	14	26	30	32
Office_2	26	76	20	16	14	26	30	32
Lobby	17	49	20	15	14	26	29	30
Total/share %	150 - 14%	514 - 16%						

Periodo	orario	gg/settimana	Ore settimanali
1st April – 30st Settembre	10.00-14.00 and 15.00-18.00	6/7	42
1 gennaio – 30 marzo; 1 Ottobre – 31 Dicembre	10.00-16.00	5/7	30



Figura 32. Articolazione planimetrica delle zone termiche

4.3 Involucro

Le informazioni sull'involucro sono state desunte dai progetti esecutivi depositati presso gli uffici comunali e verificati tramite sopralluogo ed indagine con termocamera.

La zona termica è delimitata dalle seguenti apparecchiature costruttive: due tipologie di coperture, due tipologie di pavimentazione, quattro tipi di chiusure verticali opache e due tipologie di infissi trasparenti ed una porta opaca. Per i dettagli si rimanda alla diagnosi energetica effettuata nel precedente lavoro (allegato 1), qui si riporta una breve descrizione ed uno schema delle prestazioni termiche degli elementi di fabbrica (tabella 15, 16). Il rilievo nella zona termica analizzata ha evidenziato la presenza di degrado degli intonaci delle murature causato da infiltrazioni meteoriche provenienti dagli infissi. In altre parti dell'edificio sono presenti anche severe infiltrazioni nelle coperture causate dalla non perfetta conservazione dello strato impermeabile.

Tabella 15. Elementi costruttivi che delimitano le zone termiche analizzate

Codice	Descrizione	Ambiente disperdente confinante
Ch_Vert_01	Muratura portante originale in "trachite rossa" restaurata in esterno tramite una nuova la finitura in conci di trachite rossa (15cm spessore), nel paramento interno con la sovrapposizione di una contro parete in aderenza di mattoni forati (8cm spessore) successivamente rifiniti con intonaco a base di calce.	esterno
Ch_Vert_03	Muratura portante originale in "trachite rossa" con intonaci a base di calce originali restaurati	Interno non riscaldato (museo_1, Archivio)
Ch_vert_06	Nuova Muratura portante in blocchi di laterizio alveolato (spessore 20cm)	Interno non riscaldato (WC_5)
Ch_Vert_07	Nuovo Tramezzo interno in laterizio forato (8cm spessore) intonacato su due lati.	Interno non riscaldato (WC_5, WC_4, Rip_1)
Pf-3	Portone di ingresso opaco in legno, 2,53x2,77m spessore medio 6cm	esterno
Porte interne	Porte interne in legno, spessore medio 6cm	Interno non riscaldato (museo_1, Archivio)
Base_01	Chiusura orizzontale di base realizzata sopra la pavimentazione originale. La nuova pavimentazione è così costituita: pavimentazione industriale (cls, 10cm), Massetto alleggerito con argilla espansa (10cm spessore). La Pavimentazione originale si suppone così realizzata: massetto in cls (20cm) allettato su magrone contro terra (30cm).	Ingresso
Base_02	Chiusura orizzontale di base realizzata sopra la pavimentazione originale. La nuova pavimentazione è così costituita: pavimentazione ceramica realizzata sopra massetto cementizio alleggerito con argilla espansa (15cm spessore). La Pavimentazione originale si suppone così realizzata: massetto in cls (20cm) allettato su magrone contro terra (30cm).	Locali uffici (ufficio_1, Ufficio_2, Dis_1, Bagni)
Cop_03	Copertura originale in solaio latero cementizio, recuperata con cappotto esterno in EPS (4cm spessore), massetto delle pendenze in CLS alleggerito con EPS (10cm spessore medio).	Ingresso
Cop_03_contro	Copertura originale in solaio latero cementizio, recuperata con cappotto esterno in EPS (4cm spessore), massetto delle pendenze in CLS alleggerito con EPS (10cm spessore medio). I soffitti più bassi fanno pensare alla presenza di un controsoffitto realizzato con materiale latero cementizio	Locali uffici (ufficio_1, Ufficio_2, Dis_1, Bagni)

Tabella 16. Trasmittanze medie e limiti di legge (1 luglio 2015)

Codice struttura	U [W/m²K]	U media* [W/m²K]	U ammissibile [W/m²K]
Ch_Vert_01	1,404	1,478	0,400
Ch_Vert_03	1,723	1,789	0,667
Base_01	0,381	0,421	0,420
Base_02	0,292	0,309	0,420
Cop_03	0,506	0,524	0,340
Cop_03_contro	0,437	0,472	0,340
Complessivi	U [W/m²K]	U media* [W/m²K]	
Muri	1,602	1,632	
Soffitto	0,475	4,86	
Pavimenti	0,311	0,348	
Finestre	1,878	1,929	

4.4 Sistema Impiantistico

I dati degli impianti sono stati desunti dai progetti esecutivi presenti presso gli uffici comunali e verificati tramite sopralluogo e la ricerca dei dati di targa.

Il museo è dotato di un impianto di climatizzazione per il riscaldamento ed il raffrescamento suddivisibile in tre rami (IMPIANTO_1, IMPIANTO_2, IMPIANTO_3) per tre zone distinte (ZONA_1, ZONA_2, ZONA_3). Si tratta di impianti a pompa di calore (aria-acqua) collegati a ventilconvettori a servizio degli ambienti riscaldati. Gli impianti si presentano in un generale buono stato di conservazione, tuttavia si rileva che i generatori al servizio della ZONA_1 e della ZONA_3 sono non funzionanti dal 2015 a causa di una non ben precisata avaria tecnica.

Il sistema di generazione dell'impianto è costituito da tre pompe di calore aria/acqua monoblocco tipo MTA serie HCYGNUS di diversa potenza poste al di sopra dei nuovi locali dei bagni realizzati nella corte interna.

Il sistema di distribuzione del fluido termovettore avviene tramite una rete di tubazioni di diversa sezione, realizzata sotto traccia con adeguati spessori di isolamento.

Il sistema di regolazione è costituito da 3 termostati a servizio dei 3 impianti/zone distinte e si completa con la regolazione manuale della velocità della ventola presente su ogni ventilconvettore.

Il sistema di emissione è costituito da N° 30 Ventilconvettori (VC) ad asse verticale tipo MTA serie Mistral di quattro tipologie diverse (VC_TIPO 1, VC_TIPO 2, VC_TIPO 3, VC_TIPO 4) a seconda della potenzialità minima alla velocità più bassa:

- VC_TIPO 1 Resa frigorifera 1275 W Resa riscaldamento 2654 W
- VC_TIPO 2 Resa frigorifera 1781 W Resa riscaldamento 3621 W
- VC_TIPO 3 Resa frigorifera 2685 W Resa riscaldamento 5328 W
- VC_TIPO 4 Resa frigorifera 3670 W Resa riscaldamento 7413 W

Come già anticipato, la modellazione energetica si è concentrata sulla zona 1 ad uso continuo servita dalla pompa *HP_1* (MTA –serie HCYGNUS modello CG/HCG-040). Essa non è attualmente operativa, ma per effettuare i calcoli si è considerata funzionante. La pompa di calore alimenta 17 Ventilconvettori (Tipo 3), ma nella zona considerata ne sono presenti solo sei (3 hall, 2 uffici, 1 nel corridoio), il termostato è posizionato nel corridoio. Gli impianti sono utilizzati in maniera continua solo durante l'orario di apertura, negli altri momenti sono spenti.

Zona	Museo paleografico –impianto 1 a servizio di zona 1	Quantità	1
Servizio	Riscaldamento/Raffrescamento	Fluido termovettore	Acqua
Tipo di generatore	Pompa di calore	Combustibile	Energia elettrica
Marca – modello	MTA –serie HCYGNUS modello CG/HCG-040		
Tipo sorgente fredda	Aria esterna		
Potenza termica utile in riscaldamento	47.5	kW	
	40850	kcal/h	
COP	3.8	@Acqua in 40°C	
		@Acqua out 45°C	
		@temperatura ambiente	da
		riscaldare 10°C	
Potenza termica utile in raffrescamento	37.6	kW	
	32336	kcal/h	
EER	3.00	@Acqua in 12°C	
		@Acqua out 7°C	
		@temperatura ambiente	da

4.5 Risultati modellazione

Coerentemente con i calcoli in regime stazionario svolti nella parte precedente del report, la modellazione energetica dinamica stata effettuata riducendo la zona termica ad i locali utilizzati in maniera continuativa (Ufficio_1, Ufficio_2, Ingresso, Corridoio) considerando come funzionante la configurazione impiantistica esistente. Non si è potuto effettuare la calibrazione del modello in quanto non si hanno a disposizione le serie storiche dei consumi e le attività di misura sul posto non sono possibili perché gli impianti non sono attualmente funzionanti.

4.5.1 Fabbisogno di energia utile dell'involucro

Il fabbisogno di energia utile dell'involucro calcolato con le tre modellazioni mostra una netta preponderanza della stagione invernale (energia e carichi termici) rispetto a quelli estivi. Ciò è coerente con l'orientamento a nord-est e nord-ovest delle superfici finestrate che limitano il contributo termico solare.

Il fabbisogno invernale calcolato con le impostazioni standard del metodo stazionario (Design Rating) supera del 36% quello del modello personalizzato (Tailored Rating) e del 27% il risultato del modello dinamico. Gli andamenti mensili mostrano come il modello dinamico ed il modello stazionario personalizzato abbiano valori simili nei mesi di maggiore carico (dicembre, gennaio, febbraio) mentre, nei mesi intermedi (marzo, novembre) tali differenze si accentuano in favore del modello della UNI ISO 52016. Il fabbisogno estivo calcolato con il modello dinamico (UNI ISO 52016) supera di circa il 25% quello del modello stazionario standard e di oltre il 50% definito tramite Tailored Rating soprattutto a causa dell'aumento dei carichi interni causato dalla ventilazione naturale dell'ingresso durante le ore di massima insolazione. La minore presenza degli utenti dei modelli che utilizzano un profilo personalizzato (Tailored e dinamico) limita le ore della climatizzazione, giustificando in larga parte le differenze col modello standard e rendendo i risultati sostanzialmente coerenti tra loro.

Anche la ripartizione del fabbisogno nei diversi locali è differente nelle tre metodologie di calcolo, le differenze maggiori sono nel regime estivo dove il modello dinamico porta a risultati molto differenti. In questo modello aumenta il peso del ufficio 1 che è maggiormente utilizzato e presenta maggiore carico termico interno.

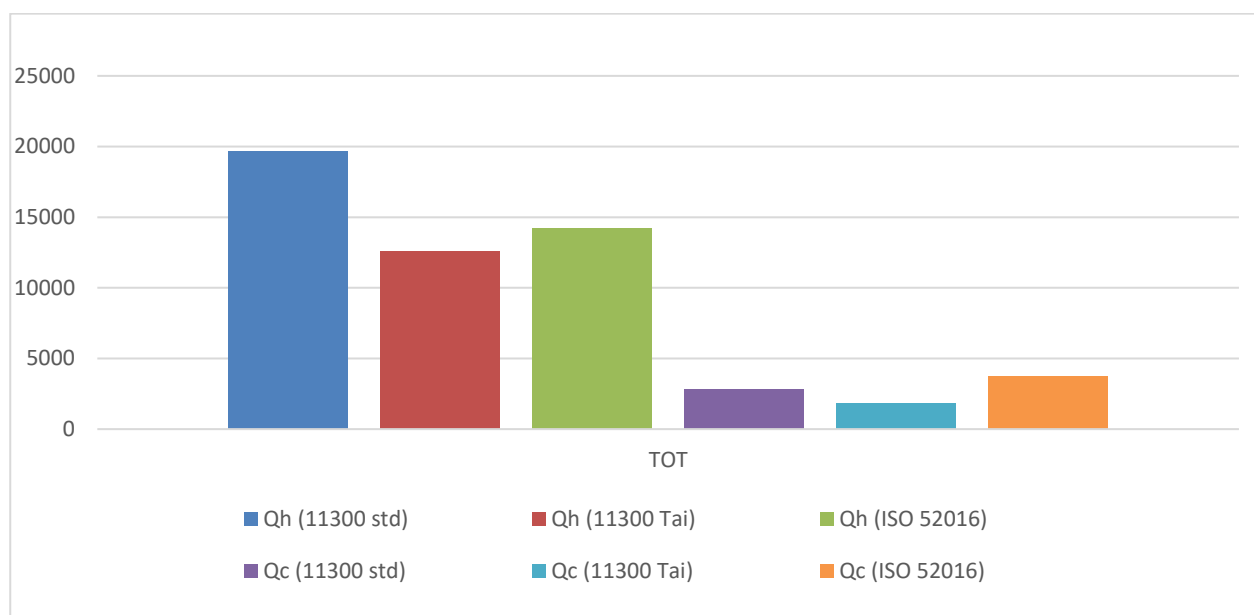


Figura 33. Confronto annuo del fabbisogno di energia utile

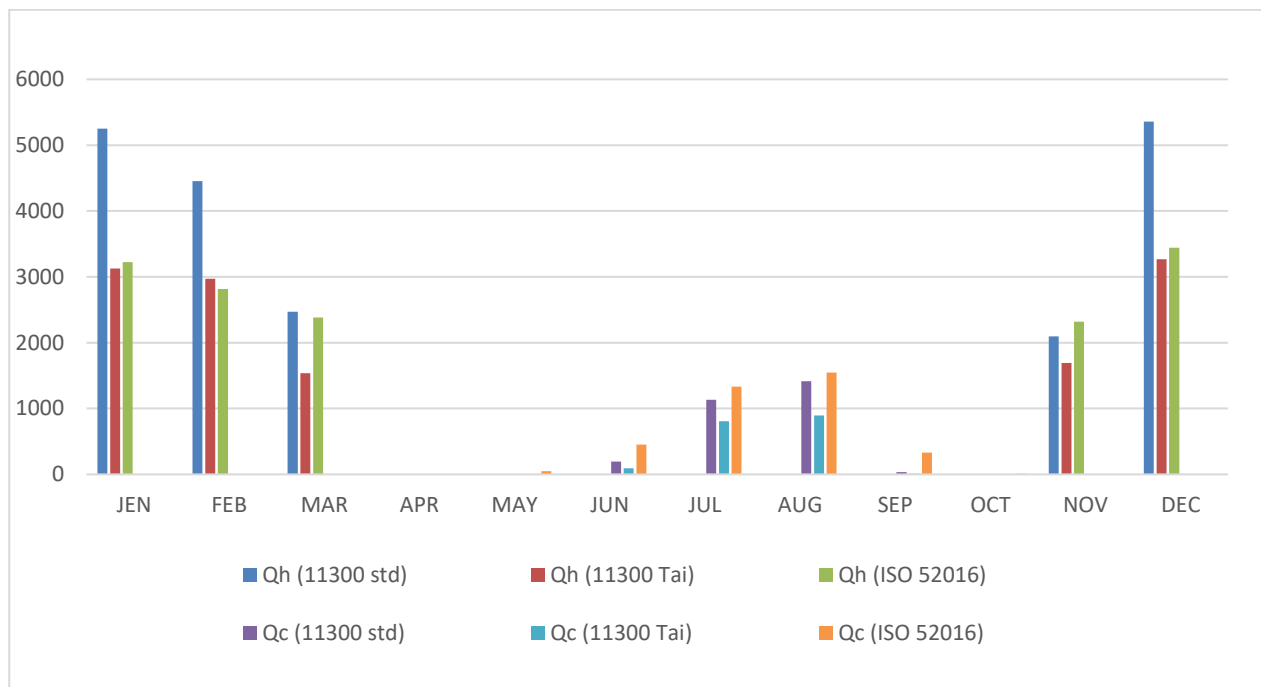


Figura 34. Confronto mensile del fabbisogno di energia utile

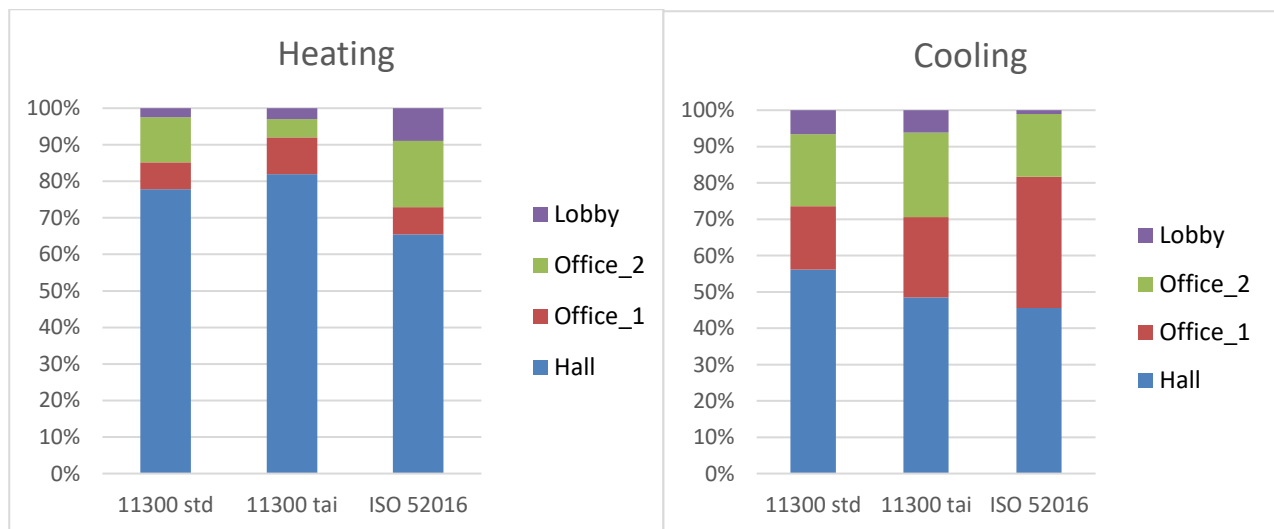


Figura 35. Confronto mensile del fabbisogno di energia utile

4.5.2 Andamento delle temperature e carico termico

Gli impianti di climatizzazione del museo PAS sono caratterizzati da un funzionamento discontinuo senza temperatura di attenuazione, che genera forti fabbisogni energetici nel transitorio. Si riportano qui alcuni grafici dell'andamento delle temperature interne (della hall e di uno degli uffici), per evidenziare gli effetti dell'intermittenza sul carico termico.

Il diagramma su base annuale della temperatura operante (figure 36, 37) mostra un corretto andamento altalenante delle temperature degli ambienti caratterizzati da climatizzazione intermittente senza temperatura di attenuazione.

L'andamento settimanale delle temperature evidenzia chiaramente l'influenza dell'inerzia termica della muratura che fa diminuire la caduta della temperatura durante il periodo di spegnimento dell'impianto (figure 38, 39, 40, 41). In inverno la chiusura di due giorni (domenica e lunedì) esaurisce molto dell'effetto periodico dell'accumulo di calore portando l'edificio a temperature più basse. Come si evince dal grafico

l'edificio richiede circa due giorni di utilizzo per arrivare ad una condizione stazionaria dove le temperature interne minime non scendono oltre i 14 gradi. Gli ambienti mostrano comportamenti simili per quanto riguarda l'inerzia dell'involucro, ma l'ingresso ha un fabbisogno estivo più alto causato dai maggiori scambi d'aria con l'esterno o aree non climatizzate, e dai maggiori carichi interni generati dai visitatori e dalle apparecchiature elettriche.

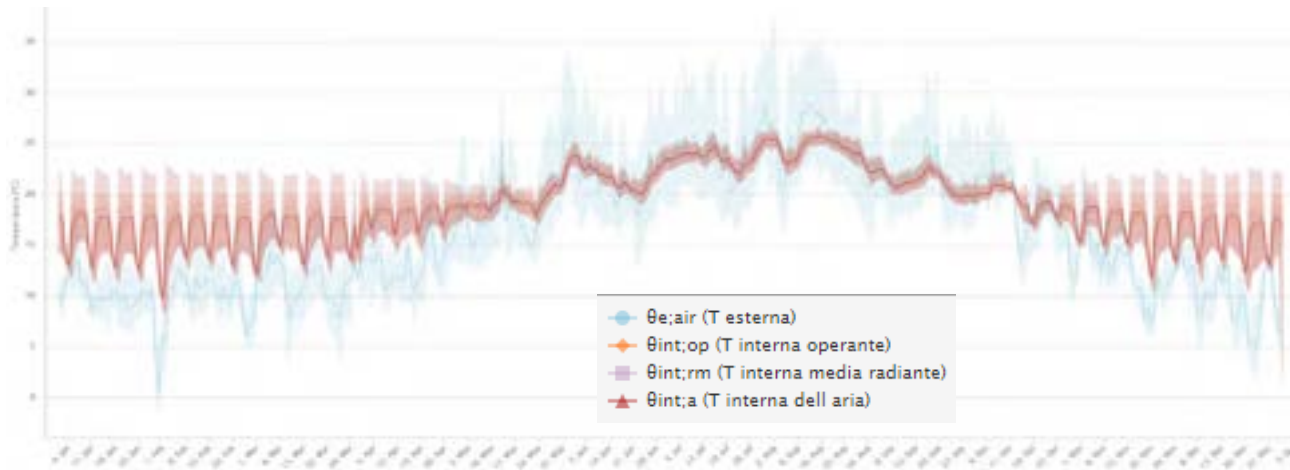


Figura 36. Andamento annuo temperature (aria esterna, aria interna, superfici, operante) degli uffici

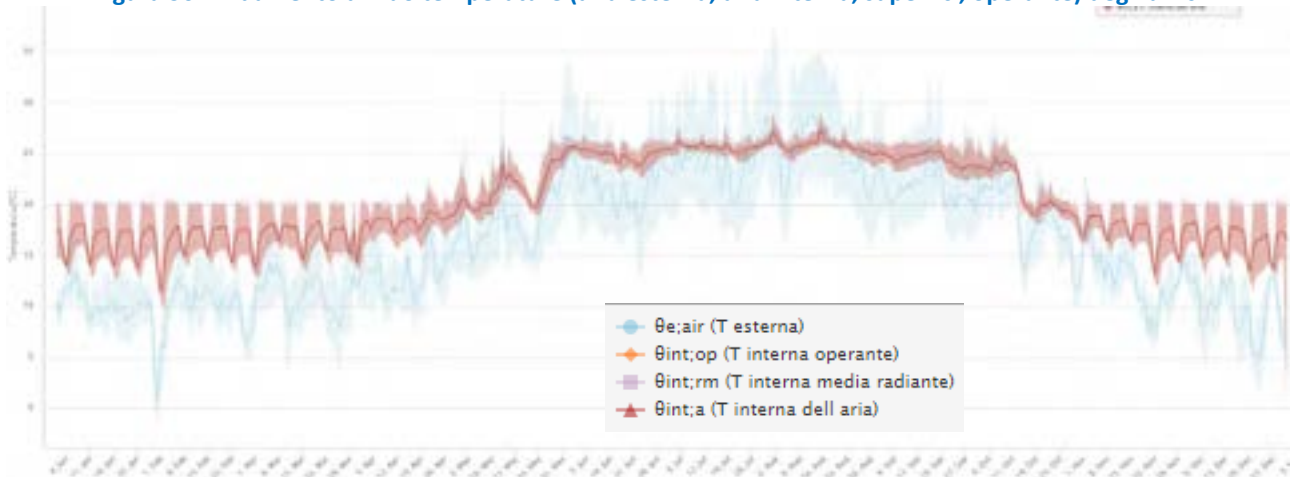


Figura 37. Andamento annuo temperature (aria esterna, aria interna, superfici, operante) dell'ingresso

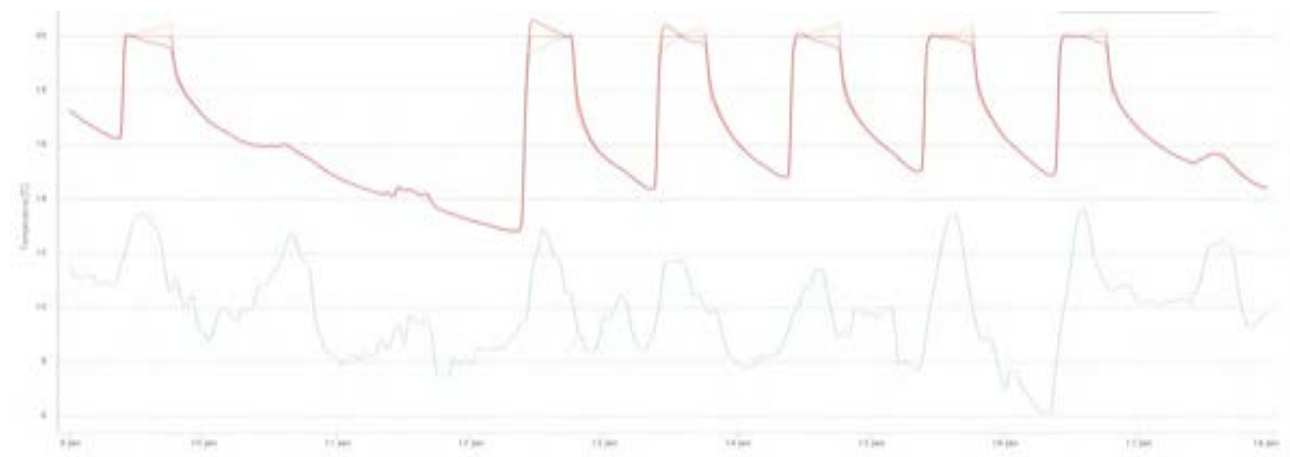


Figura 38. Andamento temperature (aria esterna, aria interna, superfici, operante) nella settimana tipo invernale (da sabato a sabato) dell'ingresso

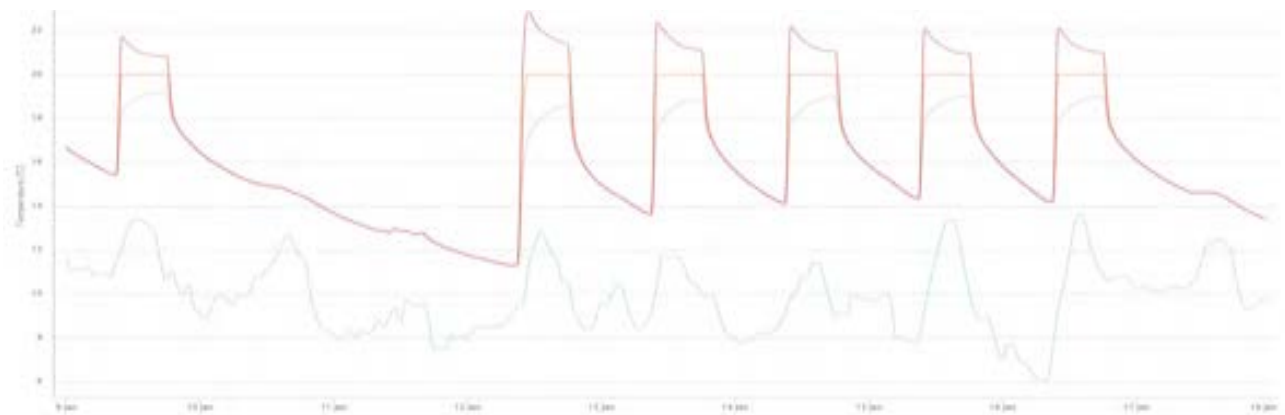


Figura 39. Andamento temperature (aria esterna, aria interna, superfici, operante) nella settimana tipo invernale (da sabato a sabato) degli uffici



Figura 40. Andamento temperature (aria esterna, aria interna, superfici, operante) nella settimana tipo estiva (da sabato a sabato) dell'ingresso

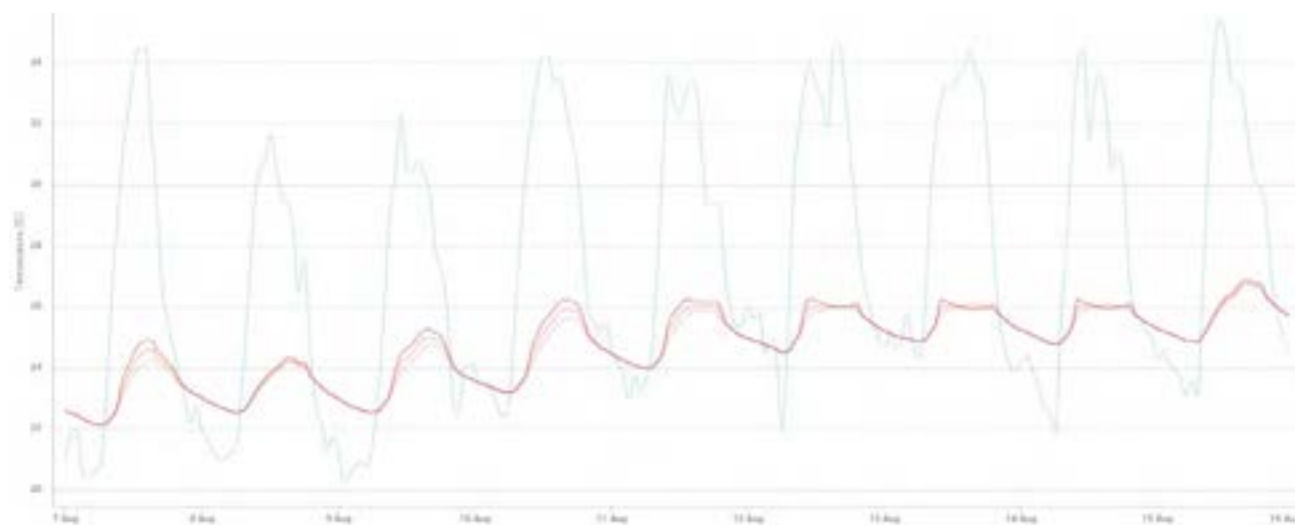


Figura 41. Andamento temperature (aria esterna, aria interna, superfici, operante) nella settimana tipo estiva (da sabato a sabato) degli uffici

Le potenze degli impianti installati sono in genere coerenti con i carichi di picco definiti dal metodo stazionario, che però sono molto maggiori di quelli medi, ciò porta il sistema ad operare spesso con rendimenti ridotti dal fattore di carico (tabella 17). Il regime intermittente della climatizzazione invece porta il modello dinamico a definire delle potenze massime più alte di quelle ricavate con gli algoritmi stazionari (Uni 12831, Carrier Pizzetti) principalmente per la gestione dei transitori delle prime ore di accensione degli impianti. Le potenze medie mensili risultano invece comparabili tra loro e coerenti con quelle degli impianti installati. La potenza fornita dall'impianto di climatizzazione invernale sembra essere adeguata ai fabbisogni dell'edificio: le statistiche di potenza nei diversi locali sono bene distribuite durante la stagione. Tuttavia per coprire totalmente i fabbisogni dei transitori, la potenza erogata dovrebbe essere leggermente superiore soprattutto nella hall dove l'impianto lavora per quasi il 50% del tempo ai massimi regimi. Infatti nelle prime ore di accensione l'impianto di climatizzazione invernale può non essere sufficiente a raggiungere in breve tempo la temperatura operante, le statistiche delle temperature mostrano circa 100 ore annue in cui non si raggiungono le condizioni di temperatura operante richieste. I locali ufficio 1 ed il corridoio mostrano minori fabbisogni di picco in quanto l'impianto funziona per circa il 75% del tempo a regimi inferiori al 25% del FC. La climatizzazione estiva invece è caratterizzata da un minore fabbisogno di potenza, perciò l'impianto sembra essere sufficiente a mantenere le condizioni di comfort interne, infatti le ore annue in cui si non si raggiungono le condizioni di comfort sono solo 3. Il fabbisogno estivo di potenza della hall è soddisfatto agevolmente dall'impianto che si mantiene spesso nelle condizioni di uso con maggior efficienza (50-75% Fc). Al contrario gli uffici ed il corridoio sono caratterizzati da un basso fabbisogno che costringe l'impianto a lavorare per molto tempo a ridotto fattore di carico (minore del 25% Fc) che è caratterizzato da una forte perdita di efficienza (figura 42).

Tabella 17. Confronto dei carichi termici (estivo/invernale)

Rooms	Φ_{hl}	Φ_{cl}	Mh	Mmh	Mc	Mmc	Ac_h	Ac_c
	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
Hall	9783	12591	28853	10506	7650	3433	15984	8055
Office_1	1929	2103	6988	1345	2790	1270	5328	2685
Office_2	2571	2611	9754	3090	2270	958	5328	2685
Lobby	3716	1906	6005	1250	475	225	5328	2685
	17999	19212	51600	16191	13185	5886	26640	13425

Φ_{hl} = max heating load (UNI EN 12831)
 Φ_{cl} = max cooling load (Carrier - Pizzetti)
Mh = max heating load (UNI 52016)
Mmh = max monthly average heating load

Mc = max cooling load (UNI 52016)
Mmc = max monthly average cooling load
Ac_h = Heating Nominal Power
Ac_c = Cooling Nominal Power

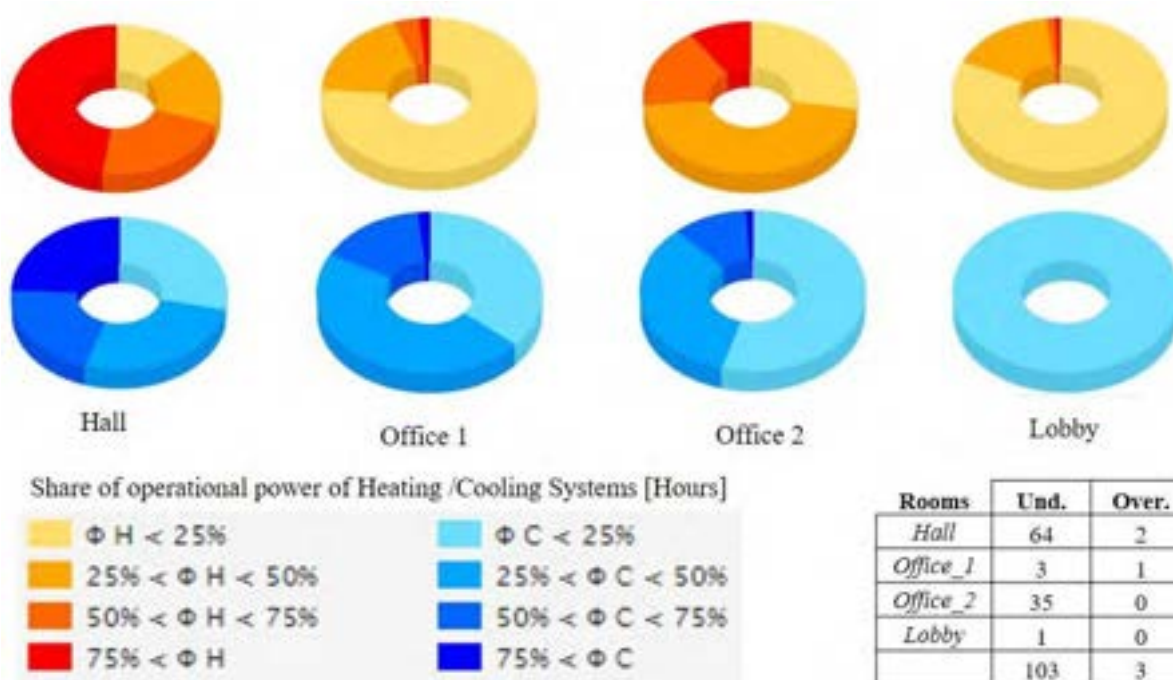


Figura 42. Potenze tempo di accensione (UNI ISO 52016)

4.5.3 Confronto dei fabbisogni energetici

L'edificio è caratterizzato da prestazioni dell'involucro buone per essere un edificio storico ed un sistema impiantistico teoricamente dotato di buon rendimento. Infatti l'involucro della zona termica è costituito prevalentemente dagli elementi di fabbrica originali recuperati tramite l'inserimento di strati isolanti che li hanno portati a valori prossimi ai limiti di legge. L'elemento dell'involucro con peggiore prestazione termiche sono le chiusure verticali opache, che hanno valori di U tre volte superiori ai limiti di legge. Tuttavia nel suo complesso l'involucro presenta un Coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione (H'_t) di $0,77 \text{ W/m}^2\text{K}$ in luogo del $0,55 \text{ W/m}^2\text{K}$ dell'edificio di riferimento (maggiore di circa il 40%).

L'adozione del profilo reale d'uso in luogo di quello standard porta ad una forte diminuzione del fabbisogno di energia utile nel calcolo stazionario, fortemente influenzato dal tempo di utilizzo e dalle minori temperature medie. Nel modello dinamico tale diminuzione è in parte compensata dai picchi di carico termico dei transitori. Tale aspetto è evidenziato dalla differenza tra la valutazione della prestazione energetica eseguita secondo normativa in caso di calcolo standard (classe F) e di Tailored (Classe B) (figura 43).

I rendimenti dei sotto sistemi impiantistici (emissione, regolazione, distribuzione) sono comuni a tutte le metodologie di calcolo adottate (Tabella 18). Tuttavia i fattori di carico degli impianti ed il tempo di funzionamento hanno portato ad efficienze stagionali differenti. Tale aspetto andrebbe verificato tramite il confronto con le serie dei consumi reali, che nel nostro caso non è stato possibile (tabella 19).

Il calcolo personalizzato (*Tailored Rating*) mostra un fabbisogno teorico di energia elettrica minore di circa un quarto rispetto a quello ricavato dal calcolo standard (*Asset Rating*) a fronte di un fabbisogno di energia utile inferiore di circa il 40%. Tale differenza è causata dalla diversa valutazione del rendimento stagionale dell'impianto. Nel caso del calcolo dinamico i rendimenti si mantengono più alti generando una diminuzione di del fabbisogno teorico di energia elettrica in linea con la diminuzione della Utile (circa 25%).

Tabella 18. Rendimenti stagionali dei sottosistemi impiantistici

Descrizione	Riscaldamento	Raffrescamento	u.m.
Rendimento di emissione	95,0	98,0	%
Rendimento di regolazione	97,0	94,0	%
Rendimento di distribuzione	98,4	97,5	%

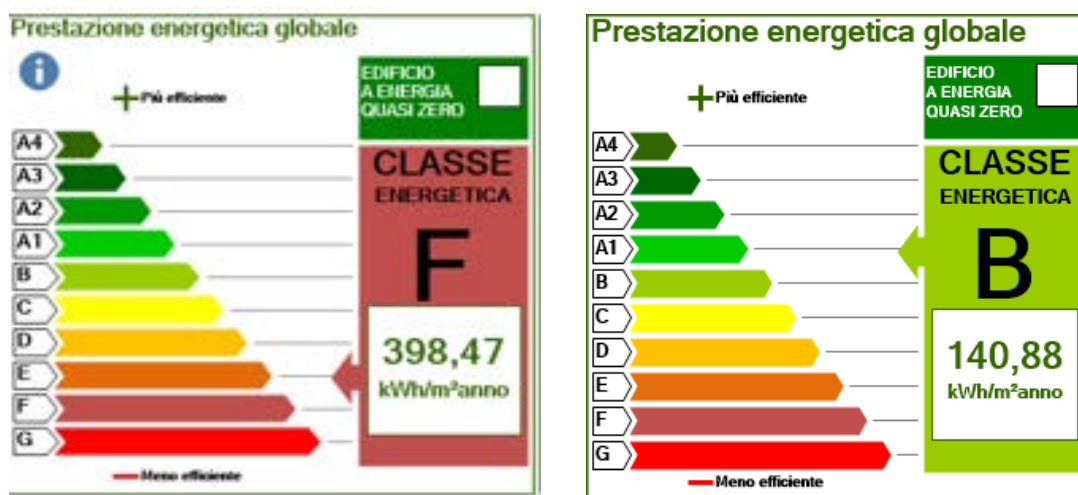


Figura 43. Prestazione energetica in Design Rating e Tailored Rating

Tabella 19. Confronto dei fabbisogni energetici teorici

	um	STD 11300	TAI 11300	(TAI - STD)/STD [%]	Din ISO 52016	(DIN - STD)/STD [%]
Energia Utile H	kWh	19.631	11.598	-41	14.866	-24
Energia Utile C	kWh	2.786	1.507	-46	3.219	16
Consumo teorico (elettricità)	kWh	14.121	10.392	-26	10.784	-24
Consumo H	kWh	11.086	8.092	-27	8.394	-24
Consumo C	kWh	3.035	2.300	-24	2.390	-21
Consumo V	kWh					
C. O. teorico	€	2.824	2.078	-26	2.157	-24

Analizzando alcune delle principali ipotesi di intervento (tabella 20) già discusse nel documento precedente (vedi report precedente) sembra evidente che il modello dinamico mostri risultati abbastanza simili a al modello stazionario in modalità di Tailored Rating in quanto entrambi hanno stimato simili costi operativi (tabella 21). Il modello dinamico calcola un costo operativo annuo leggermente superiore principalmente legato al maggiore fabbisogno estivo, che porta a migliorare leggermente i tempi di ritorno. Il modello dinamico sembra sfavorire l'isolamento dell'involucro in quanto genera un aumento del fabbisogno estivo, ed in parte anche le pompe di calore che potrebbero trovarsi a lavorare con peggiori fattori di carico. Tuttavia i risultati sul sistema impiantistico potranno essere valutati con maggiore accuratezza quando saranno disponibili le specifiche tecniche a completamento del pacchetto della ISO 52000.

Tabella 20. Confronto dei fabbisogni energetici teorici

Codice	Descrizione	Costo stimato [Euro]
Az_inv_01	Cappotto termico interno zona uffici, realizzato in Pannelli di calcestruzzo aereoclavato	11000
Az_inv_05	Modifica delle porte di accesso all'ambiente "Ingresso", intervento sulla regolazione	5000
Az_clima_02	Sostituzione del generatore con uno di minore potenza	8000
Az_Clima_03	Installazione di un Sistema di climatizzazione HP multi split per gli uffici	7000

Tabella 21. Confronto dei fabbisogni energetici teorici

	UNI 11300 -Tailored Rating				ISO EN 52016-1			
	Temp. Rit [anni]	Costo operativo [euro]	Variazione Fabbisogno energetico [%]	Variazione Costi operativi [%]	Temp. Rit [anni]	Costo operativo [euro]	Variazione Fabbisogno energetico [%]	Variazione Costi operativi [%]
Codice								
Az_inv_01	49,5	2074	-8,2	-8,2	55	2157	-6,4	-6,4
Az_inv_05	35,5	2074	-3,78	-3,78	33	2157	-4,5	-4,5
Az_clima_02	15,5	2074	-17,7	17,7	16	2157	-19,8	-19,8
Az_Clima_03	5,5	2074	-41,85	-44,5	7	2157	-34,3	-34,3

5 Conclusioni

Il lavoro presentato in questo documento si configura come una naturale integrazione di quello presentato nel report precedente “Diagnosi energetica di alcuni edifici pubblici storici costituenti l’area della Grande Miniera di Serbariu – PAR 2017”. L’obiettivo generale della ricerca era la sperimentazione di una procedura di analisi applicabile in diversi edifici del contesto territoriale volta ad esplicitare le caratteristiche ricorrenti del patrimonio immobiliare ed a valutare le principali criticità che le attività di Audit possono incontrare (mancanza di dati, costo delle attività di rilievo, limiti di affidabilità della modellazione energetica, ...).

Il report ha presentato i risultati ottenuti attraverso l’applicazione del modello dinamico semplificato (UNI ISO EN 52016-1) agli edifici oggetto di studio (Museo del Carbone, Museo PAS), ha inoltre effettuato un confronto con i principali risultati ricavati dal modello stazionario adottato dalla normativa vigente eseguito con settaggi standard e personalizzati (*Asset Rating, Tailored Rating*).

I risultati mostrano le potenzialità del modello dinamico che presto diverrà il riferimento normativo sostituendo l’approccio stazionario attualmente vigente. Il modello condivide essenzialmente gli stessi dati di partenza utilizzati per il calcolo stazionario attuale, perciò adotta metodologie e conoscenze già in gran parte note agli operatori del settore. Si può quindi ipotizzare che, quando sarà completato il pacchetto della 52000, si disporrà uno strumento potente a basso costo per lo studio energetico a supporto del progetto bioclimatico degli edifici.

Esistono già dei software commerciali che permettono il calcolo energetico dinamico implementando la prima parte della nuova normativa (52016-1) per il calcolo delle prestazioni dell’involucro ed adattando la normativa vigente (basata sul calcolo stazionario) per la determinazione dei rendimenti degli impianti e dei fabbisogni di energia dei servizi di climatizzazione (riscaldamento, raffrescamento, ventilazione). Questi strumenti possono essere già utilizzati per effettuare modellazioni più accurate finalizzate alle diagnosi energetiche, tuttavia per avere dei risultati affidabili in termini di fabbisogni e rendimenti impiantistici si dovrà aspettare il completamento delle norme della serie ISO 52000. Le nuove norme dovranno fare chiarezza su diversi aspetti specialmente riferiti ai sistemi impiantistici quali ad esempio: definire dei nuovi indici di efficienza e di prestazione per i calcoli standard o di progetto, come considerare il passaggio da uno step orario ad un altro sulle potenze istantanee erogate dagli impianti, come considerare l’accumulo di calore nelle reti, come considerare gli effetti del mancato raggiungimento del comfort, definire algoritmi di ottimizzazione tra le caratteristiche dell’impianto, programmazione e regolazione dello stesso.

5.1 Lezioni apprese

Pur condividendo gli stessi dati di partenza (modello geometrico, i materiali e le strutture, ed i sistemi impiantistici) i risultati delle tre procedure di calcolo hanno mostrato differenze non trascurabili nel calcolo dei parametri che regolano la prestazione energetica dell’edificio: *fabbisogno di energia utile dell’involucro, temperature e carichi termici, rendimenti e fabbisogni dei sistemi impiantistici*.

Fabbisogno di energia utile dell’involucro

La parte di analisi del fabbisogno dell’involucro e di studio delle potenze richieste è quella più consolidata della nuova normativa perciò il confronto con i risultati della procedura stazionaria può essere fatto in maniera più completa ed affidabile.

Il modello dinamico differisce da quello stazionario principalmente perché considera per il calcolo del bilancio energetico l’inerzia termica delle strutture, un profilo d’uso orario personalizzato ed un dato climatico esterno di dettaglio orario al posto del dato medio mensile proprio del calcolo stazionario.

Il modello stazionario adotta condizioni di utilizzo standard (20° interni, per tutta la durata della giornata, alcuni parametri di ventilazione ed umidità interna, ...). Il modello stazionario Tailored adotta impostazioni personalizzate del profilo d’uso (temperatura, carichi interni, tempo di utilizzo,..) ma entrambi non sono in grado di valutare correttamente l’effetto inerziale delle strutture ed il calcolo si basa su dati climatici medi mensili.

Gli edifici analizzati sono caratterizzati da profili d'uso discontinui senza impostazione di temperature di set back, perciò le ore di utilizzo del servizio di climatizzazione sono molto inferiori rispetto ad uso standard. Nel calcolo invernale il modello stazionario con settaggi standard è generalmente caratterizzato da fabbisogni energetici maggiori mentre quello Tailored produce i risultati minori in quanto fortemente influenzato dal tempo di utilizzo degli impianti. Il modello dinamico ha ottenuto risultati annui intermedi, in quanto la maggiore variabilità dei dati climatici di base fa registrare fabbisogni di riscaldamento non trascurabili anche nelle stagioni intermedie (novembre, marzo, aprile) che normalmente, nella zona climatica analizzata (ZONA C), sono caratterizzate da fabbisogni nulli o molto bassi. Inoltre nelle prime ore di accensione degli impianti il modello dinamico registra fabbisogni energetici di picco molto maggiori generati dall'uso intermittente degli stessi, che possono avere un effetto sul valore annuo del fabbisogno.

Temperature e carichi termici

Il modello dinamico, diversamente da quello stazionario, permette di simulare tramite un approccio fisico l'andamento dei parametri di comfort termo-igrometrico interni (temp. aria interna, Temp. media radiante, Temp. Operante, Umidità, ...) con un dettaglio orario per tutti i giorni dell'anno. Tale caratteristica permette di studiare soluzioni bioclimatiche per limitare i carichi termici e valutare i requisiti dei sistemi impiantistici e per garantire il comfort interno anche durante i transitori.

Il profilo d'uso degli edifici analizzati è intermittente perciò genera forti fabbisogni energetici durante le prime ore di accensione degli impianti. Gli edifici analizzati utilizzano l'impianto per un tempo limitato di ore al giorno (8h Museo carbone, 6h museo PAS) ed hanno dei giorni di chiusura settimanale (invernali ed estivi) durante i quali gli impianti sono completamente spenti (2gg inverno ed 1 estate museo PAS, 1gg Inverno museo del Carbone). L'influenza dell'inerzia termica è visibile sia su base giornaliera che settimanale: i giorni di chiusura dissipano buona parte dell'effetto della climatizzazione, infatti il giorno di riapertura registra fabbisogno energetici molto maggiori rispetto agli ultimi giorni della settimana caratterizzati da alte potenze per il mantenimento del confort termico, anche tre volte superiori alla potenza media richiesta. Nei nostri casi studio, le potenze medie ricavate dal modello dinamico sono maggiori di quelle stimate tramite i metodi legati alla normativa vigente: per il regime estivo sembrano essere abbastanza coerenti con quelle ricavate col metodo Carrier-Pizzetti, mentre sono in genere molto superiori a quelle invernali (UNI EN 12831).

La modellazione dinamica semplificata è perciò uno strumento potente per l'ottimizzazione degli impianti e dei profili d'uso. Si configura come uno strumento importante per studiare in maniera verosimile il comfort interno ed il comportamento impiantistico anche finalizzato ad una diagnosi energetica standard dove non sempre sono disponibili dati diretti dei parametri microclimatici interni o dei consumi. Nell'ambito generale della ricerca è risultato evidente che spesso non si hanno a disposizione serie dei consumi sufficientemente complete e che non è sempre possibile impostare campagne di monitoraggio di lunga durata per ragioni di risorse economiche e di compatibilità con le attività svolte negli ambienti. L'uso del modello dinamico può essere di supporto in quanto brevi campagne di misura (come giorni o settimane tipo, come quelle effettuate nei casi studio) potrebbero sufficienti per avere una verifica dell'affidabilità della simulazione energetica.

Rendimenti e fabbisogni dei sistemi impiantistici

Le tre modellazioni adottano le stesse procedure per il calcolo dei fabbisogni energetici dei servizi di climatizzazione, ma partendo da fabbisogni di energia utile differenti per quantità e distribuzione temporale determinano diversi rendimenti dei sottosistemi impiantistici e naturalmente diversi fabbisogni. Come già detto questa parte della nuova normativa non è completamente definita, inoltre non si sono potuti calibrare i modelli sui consumi reali a causa della mancanza delle serie storiche. Per rispettare le esigenze delle attività espositive ed a causa delle frequenti avarie dei sistemi impiantistici non è stato possibile effettuare monitoraggi prolungati ed esaustivi dei consumi durante l'esercizio.

Per questi motivi i risultati degli studi svolti sono da considerarsi di natura teorica, e, per quanto riguarda la parte riferita ai rendimenti dei sistemi impiantistici, caratterizzati da una limitata affidabilità causata anche dalla mancanza di schede tecniche affidabili e complete che hanno reso necessario l'utilizzo di dati tipologici. I risultati ottenuti nei nostri casi studio hanno mostrato come il minore fabbisogno utile invernale del modello Tailored seppure porti minori consumi energetici rispetto a quello standard, possa essere caratterizzato da

rendimenti di generazione sensibilmente più bassi del modello standard (anche del 30-40%). I rendimenti ricavati dal modello dinamico invece sembrano essere più simili a quelli del modello standard.

Il fabbisogno estivo è caratterizzato da forti carichi termici di punta sul quale generalmente sono dimensionate le macchine ma basse potenze medie che possono generare fattori di carico penalizzanti. In quest'ottica il maggiore fabbisogno estivo calcolato dal modello dinamico garantisce rendimenti più elevati, mentre quello Tailored rimane il più penalizzato.

Lo studio svolto in precedenza ha mostrato come tutti gli scenari mostrino peggiori indici economici se analizzati tramite il modello energetico Tailored. Questo accade perché nei nostri casi studio il calcolo personalizzato porta a stimare dei fabbisogni e dei costi annui molto inferiori rispetto allo standard che limitano il flusso di cassa ottenibile dalle azioni di retrofit. Gli interventi diretti all'involucro spesso ottengono performance molto negative anche perché diminuendo il fabbisogno di energia utile possono peggiorare i rendimenti degli impianti, appare perciò chiaro che uno degli aspetti cruciali sia il ripensamento del sistema impiantistico su un profilo di richiesta di potenza più verosimile che solo tramite un modello dinamico può essere effettuata.

5.2 Futuri sviluppi della ricerca

Le future fasi della ricerca si integrano con quelle esposte nel report precedente specificando gli aspetti relativi alla modellazione energetica.

Una possibile attività di interesse, coerente con le finalità generali della ricerca, è sicuramente la raccolta e lo sviluppo altri casi studio locali su cui effettuare confronti tra le metodologie di calcolo stazionario ed eventualmente con metodi dinamici più consolidati in letteratura (Energy Plus, Trnsys,...). Tale confronto potrebbe anche essere esteso alla valutazione degli scenari di efficientamento che possono dare risultati differenti con l'uso del modello dinamico, valorizzando soluzioni che sfruttano l'inerzia termica e soluzioni impiantistiche più ottimizzate sul profilo d'uso.

Nell'attesa si completi il nuovo pacchetto normativo (serie ISO EN 52000), si potrebbero sviluppare delle analisi di sensitività dei dati di base della modellazione del fabbisogno di energia utile dell'involucro nel clima specifico locale e per le tipologie di edifici pubblici e anche residenziali più diffuse della città di Carbonia.

Dal punto di vista metodologico, si può testare l'uso del modello dinamico semplificato accoppiato a brevi (giorno tipo, settimana tipo) attività monitoraggio dei consumi o delle condizioni microclimatiche interne per la definizione di modelli più affidabili orientati alla valutazione delle ipotesi di retrofit energetico.

6 Riferimenti bibliografici

- [1] Marta Calzolari ed altri, prestazione energetica delle architetture storiche: sfide e soluzioni. Analisi dei metodi di calcolo per la definizione del comportamento energetico, Franco Angeli 2016, codice isbn: 9788891738752
- [2] Elenco software certificati CTI - <https://www.cti2000.it/>
- [3] I. Ballarini, E. Primo, V. Corrado; "On the limits of the quasi-steady-state method to predict the energy performance of low-energy buildings" Thermal Science · January 2018 DOI: 10.2298/TSCI170724133B
- [4] F. Asdrubali, G. Baldinelli, F. Bianchi, F. Sciurpi, C. Carletti, "Valutazione energetica degli edifici: confronto tra codici di calcolo stazionari e dinamici", atti del 10° congresso nazionale CIRIAF, 9/10 aprile 2010/10 aprile 2010
- [5] L. Socal, "Il nuovo metodo orario dinamico per il calcolo dei fabbisogni dell'involucro", Progetto 2000 n. 54, Giugno 2018
- [6] C. Marinosci, G. Semprini, "Software di simulazione energetica dinamica degli edifici", https://webapi.ingenio-web.it/immagini/file/byname?name=Software%20di%20simulazione%20energetica_Marinosci-Semprini_SITO.pdf
- [7] https://www.logical.it/pdf/Report_validazione_Motore_DINAMICO_ORARIO_TERMOLOG_Politecnico_Milano.pdf
- [8] D. Van Dijk, M. Spiekman, L. Hoes - Van Oeffelen, "EPB standard EN ISO 52016: calculation of the building's energy needs for heating and cooling, internal temperatures and heating and cooling load", The REHVA European hvac journal, volume 53, issue 3, may 2016.
- [9] R. Perez et al. A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surface, Solar Energy vol.39 (1987), pp 221-231
- [10] F. Sciurpi, C Carletti, F. Asdrubali, G. Baldinelli, "Analisi e confronto di codici di calcolo esistenti per la valutazione energetica degli edifici", Convegno AICARR certificazione energetica: normative e modelli di calcolo per il sistema edificio-impianto posti a confronto 2009.

PARTE II: indagini e misurazioni

7 Indagine sulla UTA del museo del Carbone

L'obiettivo di questa attività di indagine è misurare i parametri dell'aria di immissione e di emissione del sistema a tutt'aria utilizzato per la climatizzazione (estiva ed invernale) della zona termica commerciale (locali: BAR e Libreria) del Museo del Carbone. La misurazione è utile per impostare in maniera più corretta il modello energetico e per indagare sulla regolazione dell'impianto negli ambienti che hanno mostrato maggiore criticità durante il monitoraggio microclimatico effettuato nella precedente fase della ricerca.

I tempi di questa integrazione della ricerca hanno permesso la sola misurazione in regime invernale, in seguito si eseguirà anche la misura estiva.

7.1 Descrizione del sistema

La misura riguarda le portate d'aria relative al sistema di climatizzazione a tutt'aria dei locali BAR e Libreria, costituito da un circuito aeraulico (UTA_1) alimentato da una pompa di calore Aria- Acqua (HP_1) (figura 44). La distribuzione dell'aria in immissione è costituita da un solo canale primario con bocchette laterali (3 per il Bar, e 3 per la Libreria), mentre l'estrazione è effettuata da una sola bocchetta di dimensioni maggiori posta nella libreria (tabella 22, figure 45, 46). Per il corretto funzionamento dell'impianto è perciò necessario lasciare aperte le porte che collegano i due ambienti (Bar e Libreria), generando correnti d'aria non trascurabili negli ambienti.

Durante il test le porte verso l'area espositiva sono state tenute chiuse, tuttavia durante l'utilizzo abituale tali porte sono spesso tenute aperte per esigenze di carattere commerciale, generando ulteriori dispersioni e movimenti d'aria non controllati. L'impianto è normalmente acceso per tutta la durata dell'orario di apertura (dalle 10,00 alle 18,00), spesso se i dipendenti attivano prima viene acceso in anticipo (verso le 9,30) per mitigare il disagio durante le prime ore di apertura.

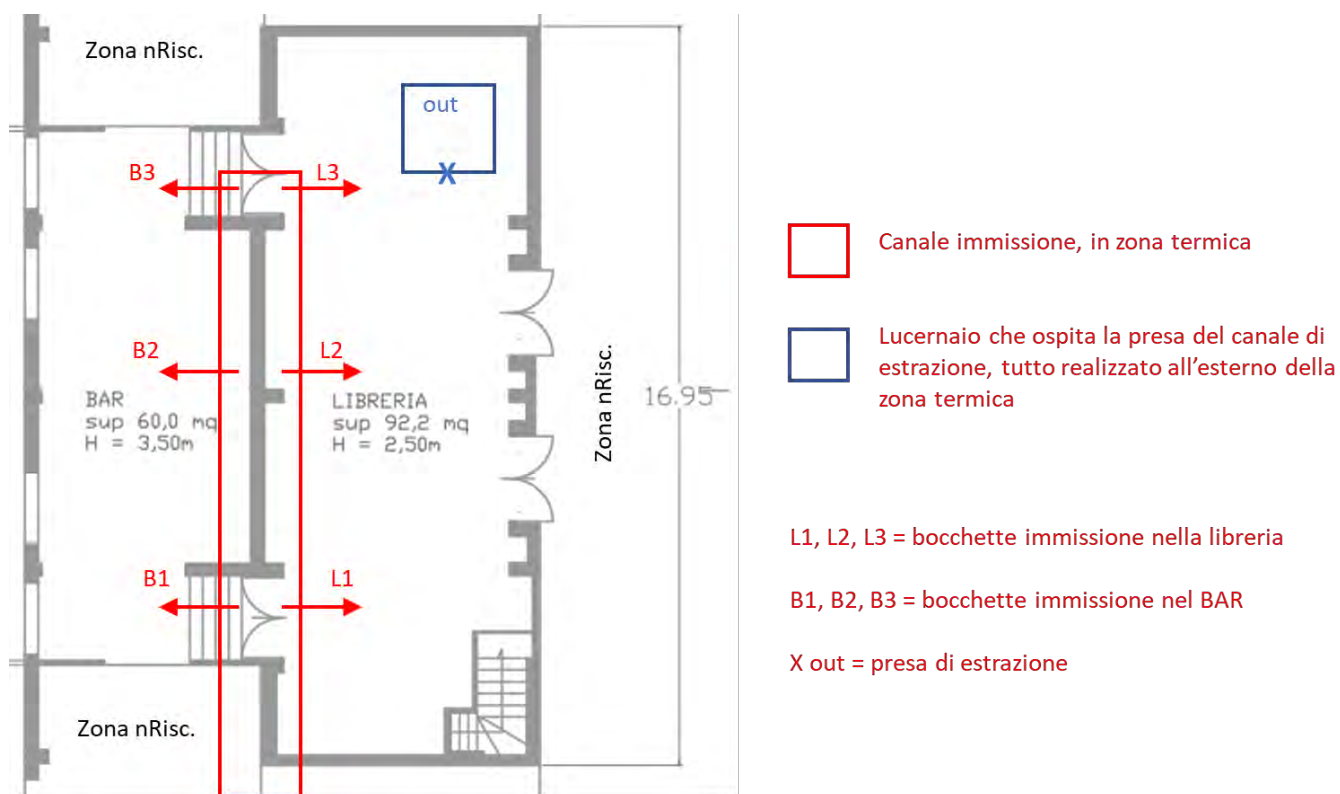


Figura 44. Planimetria dei locali e circuito aeraulico



figura 45. Distribuzione aeraulico: canali esterni e presa del lucernaio

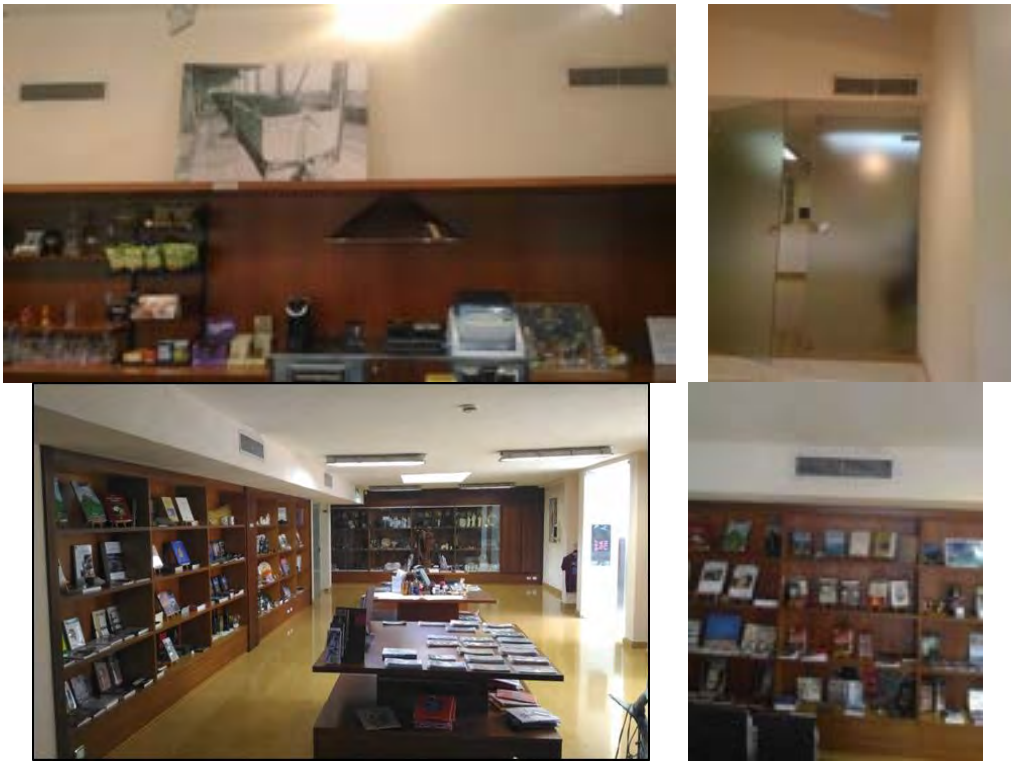


Figura 46. Ambienti serviti: BAR e Libreria

Tabella 22. Bocchette circuito aeraulico

Immissione					Estrazione				
Libreria	<i>n°</i>	<i>h [m]</i>	<i>l [m]</i>	<i>sup [m2]</i>		<i>n°</i>	<i>h [m]</i>	<i>l [m]</i>	<i>sup [m2]</i>
bocchette L	3	0,2	0,4	0,08	bocchetta	1	0,4	0,7	0,28
BAR	<i>n°</i>	<i>h [m]</i>	<i>l [m]</i>	<i>sup [m2]</i>		<i>n°</i>	<i>h [m]</i>	<i>l [m]</i>	<i>sup [m2]</i>
bocchette B	3	0,2	0,4	0,08					

7.2 Metodologia e strumentazione

Coerentemente con le altre attività di misura ed indagine effettuate nella ricerca, si è proseguito a caratterizzare il funzionamento del sistema edificio - impianto durante periodi tipo di funzionamento (invernale /estivo). In questo caso, considerando i tempi della ricerca, si è puntato a definire le caratteristiche dell'aria (immessa ed estratta) nei locali Libreria ed BAR del museo durante una giornata tipo di funzionamento invernale. Le misure sono state effettuate il venerdì 07 dicembre 2018 durante tutto l'orario di apertura (dalle 10 alle 18). La giornata mostra valori climatici coerenti con un profilo minimo stagionale medio.

7 Dicembre 2018	Dati rilevati
Temperatura media	10 °C
Temperatura minima	8 °C
Temperatura massima	12 °C
Punto di rugiada	8 °C
Umidità media	88 %
Umidità minima	87 %
Umidità massima	93 %
Velocità del vento media	7 km/h
Velocità massima del vento	13 km/h
Precipitazioni	Assenti, poco nuvoloso

La temperatura, l'UR e la velocità dei flussi d'aria di tutte le bocchette della canalizzazione sono state misurate con un intervallo orario. Gli stessi parametri sono stati misurati in quattro punti di rilievo equamente distribuiti nei locali oggetto di studio (Libreria, BAR) ad una altezza che simula in visitatore in piedi (1,50m dal pavimento) (figura 47). Ogni misura è stata effettuata per un tempo di osservazione di almeno 30 sec, qui si riporteranno solo i risultati dei valori medi registrati durante le misure.

Per effettuare le misure si è utilizzato il multimetro testo 435 con sonda termo – igrometrica a filo caldo per la misura dei parametri dell'aria: temperatura, velocità, umidità relativa (tabella 23).

Tabella 23. Strumentazione misura aria

Sonda	Campo di misura	Precisione
NTC	-20 a +70 °C	±0,3 °C
Sensore igrometrico capacitivo	0 a +100 %UR	±2 %UR (+2 a +98 %UR)
Filo caldo	0 a +20 m/s	±(0,03 m/s + 4 % del v.m.)

Multimetro



Sonda



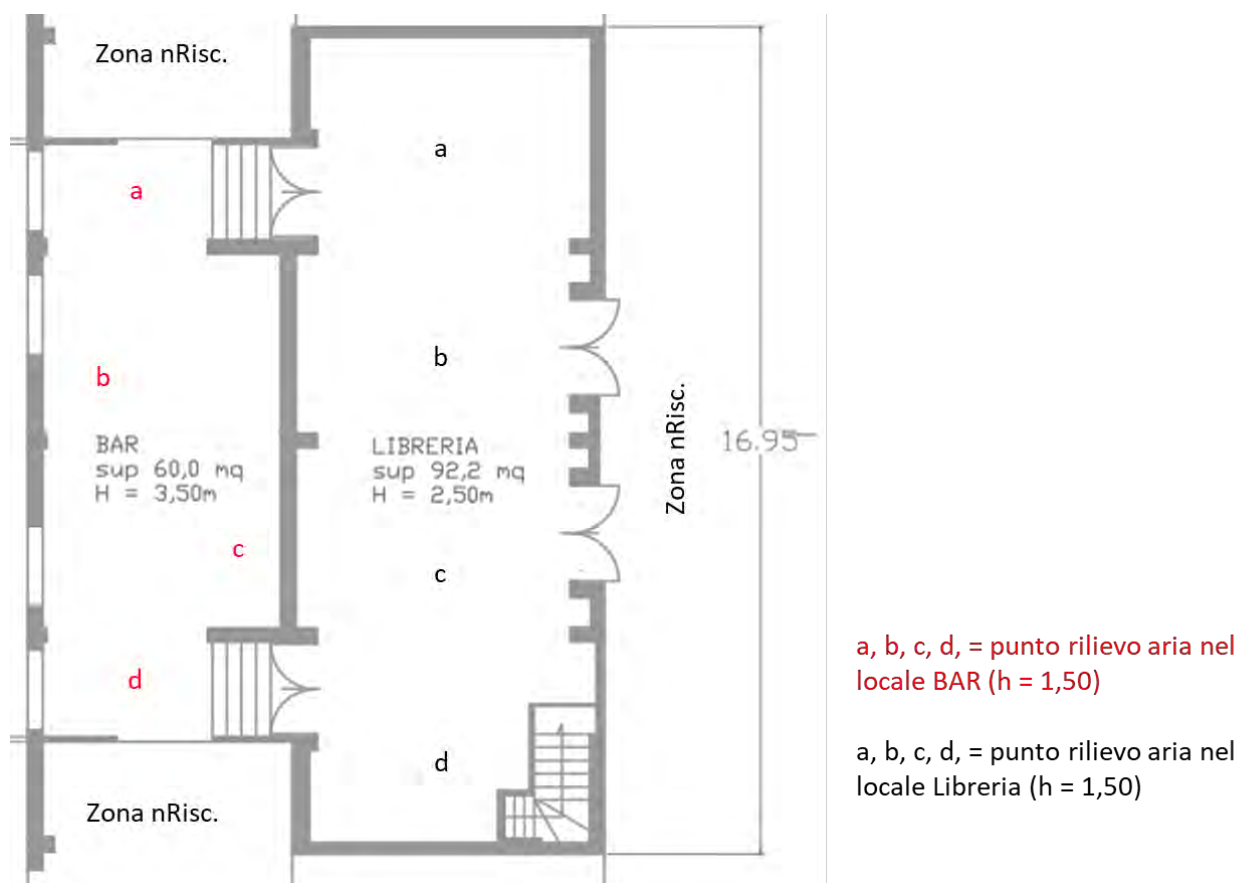


Figura 47. Planimetria dei locali e postazioni di rilievo dell'aria in ambiente

7.3 Risultati

La misura dell'aria in immissione ha evidenziato come i parametri siano sostanzialmente uniformi per tutte le bocchette (tranne la L3), in quanto sono tutte in comunicazione diretta con il canale principale (tabelle 24, 25). La temperatura dell'aria in uscita cresce durante la giornata, segno che le prime ore di accensione sono necessarie all'impianto per entrare in regime stazionario. La UR in ingresso è sostanzialmente coerente con quella ambiente, mentre la velocità di uscita supera spesso i limiti previsti per il comfort. La velocità dell'aria in uscita invece è molto maggiore di quella in ingresso in quanto deve equilibrare la portata in ingresso da una sola presa, ciò genera localmente dei fenomeni di disagio rilevati anche durante la prova.

Le Misurazioni fatte nell'aria in ambiente hanno mostrato temperature differenti tra i due locali ma abbastanza omogenee all'interno di ognuno di essi (tabelle 26,27). Il Bar è soggetto ad un rialzo della temperatura nelle ore pomeridiane a causa dell'irraggiamento solare e probabilmente grazie ad una migliore miscelazione dell'aria in ambiente. Nella Libreria il movimento dell'aria, specialmente nei pressi della bocchetta di estrazione è distintamente sensibile e fastidioso in quanto la velocità dell'aria interna supera quasi sempre i limiti di comfort (oltre i 0,20 m/s di velocità media). Le velocità dell'aria registrate nei punti di rilievo in entrambi i locali sono quasi sempre oltre i limiti del comfort, questo aspetto, unitamente ad un impianto rumoroso, abbassa la qualità dell'ambiente interno.

Un altro aspetto che vale la pena sottolineare è che i valori di velocità dell'aria riportati nelle tabelle sono medie di 30 sec di osservazione (una misura al secondo), tale misure mostrano una forte variabilità soprattutto nelle bocchette di immissione dove la velocità può variare di oltre +/- 1 ms in pochi secondi generando fastidiosi moti turbolenti nella stanza.

Tabella 24. Misure dell'aria nelle bocchette della Libreria

	L1			L2			L3			Uscita		
<i>ora</i>	<i>temp</i> [c°]	<i>UR</i> [%]	<i>vel</i> [ms]	<i>temp</i> [c°]	<i>UR</i> [%]	<i>vel</i> [ms]	<i>temp</i> [c°]	<i>UR</i> [%]	<i>vel</i> [ms]	<i>temp</i> [c°]	<i>UR</i> [%]	<i>vel</i> [ms]
10	26,2	39	2,84	26,2	41	3,89	26,1	40	1,80	17,7	67	4,93
11	27,1	37	2,96	27,1	35	4,40	27,2	38	1,90	15,7	60	4,88
12	28,5	38	3,02	28,4	37	4,80	28,5	39	2,00	18,9	67	4,18
13	28,1	36	3,23	28,3	35	4,01	28,4	37	0,98	20,9	60	5,32
14	29,5	34	3,12	29,5	34	3,77	29,4	34	0,87	21,5	60	5,15
15	29,1	35	3,21	29,3	36	3,83	29,0	36	1,30	20,1	59	4,99
16	28,2	37	3,31	27,9	37	4,50	28,1	35	1,28	20,5	57	4,87
17	28,1	38	3,26	27,8	36	3,78	28,4	40	1,60	18,9	62	5,11
18	28,8	40	3,32	29,1	38	4,10	28,8	40	0,92	19,2	65	4,96
medio	28,2	37	3,14	28,2	37	4,12	28,2	38	1,41	19,3	62	4,93

Tabella 25. Misure dell'aria nelle bocchette della Bar

	B1			B2			B3		
<i>ora</i>	<i>temp</i> [c°]	<i>UR</i> [%]	<i>vel</i> [ms]	<i>temp</i> [c°]	<i>UR</i> [%]	<i>vel</i> [ms]	<i>temp</i> [c°]	<i>UR</i> [%]	<i>vel</i> [ms]
10	26,0	37	2,90	26,1	39	2,84	26,3	38	3,17
11	27,4	37	2,75	27,2	39	2,89	27,5	37	2,72
12	28,4	39	3,11	28,7	37	3,33	28,4	40	2,74
13	27,9	34	3,47	28,4	34	3,29	28,5	35	2,95
14	29,3	35	3,19	29,3	35	2,92	29,7	33	2,81
15	29,2	36	3,07	29,2	34	2,99	28,8	34	3,18
16	28,4	38	3,17	28,0	37	3,10	28,0	35	3,34
17	28,1	38	2,97	28,0	38	3,20	27,7	40	3,34
18	29,0	40	3,22	28,8	42	3,47	28,6	39	3,54
medio	28,2	37	3,09	28,2	37	3,11	28,2	37	3,09

Tabella 26. Condizioni aria interna in Libreria

	Libr_a			Libr_b			Libr_c			Libr_d		
<i>ora</i>	<i>temp</i> [c°]	<i>UR</i> [%]	<i>vel</i> [ms]	<i>temp</i> [c°]	<i>UR</i> [%]	<i>vel</i> [ms]	<i>temp</i> [c°]	<i>UR</i> [%]	<i>vel</i> [ms]	<i>temp</i> [c°]	<i>UR</i> [%]	<i>vel</i> [ms]
10	16,4	65	0,21	16,5	64	0,35	16,6	65	0,19	16,4	67	0,11
11	17,1	62	0,25	17,5	64	0,31	17,8	64	0,18	17,9	63	0,08
12	19,3	66	0,19	19,5	67	0,37	19,3	64	0,19	19,1	66	0,09
13	20,1	61	0,20	20,1	62	0,29	20,1	61	0,17	20,4	60	0,11
14	20,6	62	0,25	20,4	61	0,28	20,2	61	0,18	19,9	62	0,12
15	20,8	59	0,29	20,5	57	0,31	20,3	60	0,17	20,3	60	0,15
16	20,5	61	0,28	20,4	61	0,35	20,0	60	0,15	20,2	61	0,09
17	19,8	63	0,25	19,8	65	0,37	19,9	64	0,18	20,1	64	0,11
18	19,4	64	0,27	19,4	66	0,25	19,2	62	0,15	19,2	64	0,15
medio	19,3	63	0,24	19,3	63	0,32	19,3	62	0,17	19,3	63	0,11

Tabella 27. Condizioni aria interna in BAR

	Bar_a			Bar_b			Bar_c			Bar_d		
<i>ora</i>	<i>temp</i> [c°]	<i>UR</i> [%]	<i>vel</i> [ms]	<i>temp</i> [c°]	<i>UR</i> [%]	<i>vel</i> [ms]	<i>temp</i> [c°]	<i>UR</i> [%]	<i>vel</i> [ms]	<i>temp</i> [c°]	<i>UR</i> [%]	<i>vel</i> [ms]
10	17,9	65	0,21	17,9	68	0,13	17,8	67	0,11	18,0	64	0,21
11	18,5	66	0,18	18,8	65	0,15	18,6	69	0,07	18,3	68	0,18
12	20,3	64	0,16	20,2	65	0,09	20,3	64	0,12	20,0	61	0,25
13	20,8	60	0,22	21,0	58	0,10	21,2	57	0,09	21,4	62	0,18
14	21,6	62	0,18	21,7	64	0,18	21,5	60	0,16	21,8	63	0,21
15	22,6	62	0,09	22,8	59	0,15	23,0	59	0,08	23,2	65	0,22
16	22,5	65	0,12	22,7	62	0,18	22,7	63	0,10	22,6	62	0,15
17	21,3	61	0,18	21,3	63	0,12	21,4	64	0,08	21,3	61	0,19
18	20,8	62	0,26	21,1	61	0,21	21,0	65	0,11	20,9	65	0,21
medio	20,7	63	0,18	20,8	63	0,15	20,8	63	0,10	20,8	64	0,20

7.4 Discussione e future ricerche

L'impostazione standard ha fatto riferimento alla normativa (UNI 10339) per la soddisfazione dei ricambi d'aria ed al dimensionamento di massima di impianto di termoventilazione/raffrescamento basato su una portata di aria di almeno 5-7 vol/h rispetto al volume dell'ambiente servito (tabella 24).

Confrontando le impostazioni standard adottate per calcolo stazionario (presentato nel report precedente) con le misurazioni effettuate le principali differenze riguardano le portate e la temperatura dell'aria di immissione. La temperatura media rilevata (28°) anche se mostra una certa variabilità durante la giornata (tabelle 24,25), supera di circa due gradi quella utilizzata nel modello stazionario (26°). Le portate rilevate sono quasi doppie (la portata reale supera del 70% quella teorica) rispetto a quelle utilizzate nella precedente modellazione, inoltre si può anche notare come una bocchetta della libreria (L3) abbia una portata molto inferiore probabilmente a causa di qualche ostruzione. La differenza complessiva tra le portate misurate di immissione e quelle di estrazione è compatibile con la filtrazione attraverso le porte che separano la zona riscaldata (zona commerciale) dalla zona non riscaldata (Espositiva) (tabella 25). Si possono perciò definire delle condizioni medie per l'aria immessa e per quella dell'ambiente te che possono essere inserite nel modello energetico (tabella 29, 30).

Una futura raffinazione del modello potrebbe tenere conto che le porte della Libreria e del BAR sono spesso aperte, perciò, dopo avere definito un profilo temporale tipo (di apertura e chiusura), si potrebbe rilevare il flusso d'aria uscente ed entrante definendo un profilo verticale di velocità, temperatura e direzione.

Tabella 28. Impostazioni utilizzate per il calcolo stazionario

	<i>sup.</i> <i>utile</i> [m]	<i>H. netta</i> [m]	<i>Vol.</i> [m3]	<i>Persone</i> [n°]	<i>Coff.</i> <i>UTA</i> [V/h]	<i>Ricambio</i> <i>persona</i> [m3 persona]	<i>Aria</i> <i>Esterna</i> [m3/h]	<i>Ricircolo</i> [m3/h]	<i>Immissione</i> [m3/h]
LIBRERIA	92	2,50	231	20	7	17	340	1274	1614
BAR	60	3,50	210	20	7	30	600	870	1470
totali	152		441	40			940	2144	3084

Tabella 29. Rilievo delle portate

Dati Aria di ingresso				
	<i>Vi [m/s]</i>	<i>Por [m3/h]</i>	<i>temp [c°]</i>	<i>UR[%]</i>
bocchetta L1	3,14	905	28,2	37
bocchetta L2	4,12	1187	28,2	36
bocchetta L3	1,41	405	28,1	36
bocchette B1	3,12	898	28,1	36
bocchette B2	3,23	930	28,2	37
bocchette B3	3,17	914	28,2	37
Portata tot.		5238		

Dati Aria Uscita				
	<i>Vo [m/s]</i>	<i>Por [m3/h]</i>	<i>temp [c°]</i>	<i>UR[%]</i>
bocchetta	4,93	4972	19,2	63
Portata tot.		4972		

Tabella 30. Condizioni medie rilevate nei locali

BAR			Libreria		
temp [c°]	UR [%]	vel [ms]	temp [c°]	UR [%]	vel [ms]
20,8	63	0,16	19,3	63	0,21

8 Misurazione della umidità nei materiali delle murature

Uno degli obiettivi del lavoro è definire i processi di degrado tipici degli del patrimonio edilizio oggetto di studio. L'osservazione dei casi studio, i musei analizzati durante l'ultimo anno di attività ma anche gli altri edifici studiati negli anni precedenti (Centro Ricerche Sotacarbo, Municipio di Carbonia,...), sembra evidenziare una ricorrenza dei fenomeni di umidità di risalita nelle murature realizzate in trachite rossa. Molte proprietà tecnologiche dei materiali edilizi (resistenza al gelo, modulo di elasticità, conducibilità termica, etc.) dipendono in modo rilevante dal loro stato igrometrico ed inoltre la necessità di interventi di risanamento può essere un'occasione per effettuare un miglioramento della prestazione energetica dell'involucro.

I musei mostrano chiari segni del fenomeno su alcuni corpi di fabbrica, ma non sempre tale evidenza è confermata dalla semplice ispezione visiva. L'obiettivo primario del lavoro è definire la presenza e la diffusione dei fenomeni di degrado per umidità nella massa muraria degli edifici che ospitano i musei (Museo del Carbone, Museo PAS). Cercando di capire se essa sia da imputare ad una caratteristica intrinseca del materiale o della apparecchiatura costruttiva storica o se, piuttosto, sia legata a condizioni locali (perdite acqua, infiltrazioni di altra natura, contatto col terreno non correttamente schermato, ...). Secondariamente si vuole valutare l'efficacia di una metodologia di indagine non distruttiva basata su sensori commerciali di umidità nei materiali da costruzione.

8.1 Descrizione degli edifici

Lo studio della apparecchiatura costruttiva degli edifici è il primo passo per definire il tipo di degrado che può essere presente in esso ed interpretare correttamente le letture degli strumenti (figura 48). La muratura in elevazione dei due musei è realizzata in trachite rossa, una roccia inghinbritica di origine locale ampiamente utilizzata come materiale da costruzione durante la fondazione della città, che è stata recuperata in maniera differente nell'ambito dei lavori di restauro dei due edifici. Per i dettagli si rimanda alle parti descrittive sulle strutture dei due musei già presentate negli allegati del report precedente, qui si descrivono brevemente le tipologie di chiusura di base e di muratura dei due edifici.

Nel Museo del Carbone si sono essenzialmente recuperati gli intonaci originali su entrambi i lati, nella finitura interna è spesso presente la placcatura ceramica originale e si sono anche aggiunte delle lastre di marmo per decorare la sala espositiva. Le chiusure di base sono rimaste essenzialmente le stesse: la zona commerciale (CF_B) confina con un locale seminterrato aperto su due lati, le aree espositive laterali (CF_A2, CF_A1) erano dedicate a docce e bagni per gli operai perciò sono realizzate sopra un canale di drenaggio che raccoglieva e smaltiva le acque dei servizi igienici. Solo la pavimentazione della sala centrale (CF_A_Lampisteria) può essere considerata controterra, mentre le chiusure di base del corpo di fabbrica (CF_C) sono state completamente sostituite per la realizzazione della zona conferenza e della discesa per visita in sotterraneo.

Il fabbricato adibito ad ingresso e biglietteria del museo, realizzato nel corpo cilindrico dell'ex locale delle caldaie (CF_D), ha conservato sostanzialmente la muratura con la sua finitura originale. Questo edificio mostra evidenti segni di degrado dei materiali causato da umidità di risalita. Gli altri corpi di fabbrica mostrano segni di risalita nelle finiture esterne ma in quelle interne il fenomeno non è visibile forse a causa della placcatura.

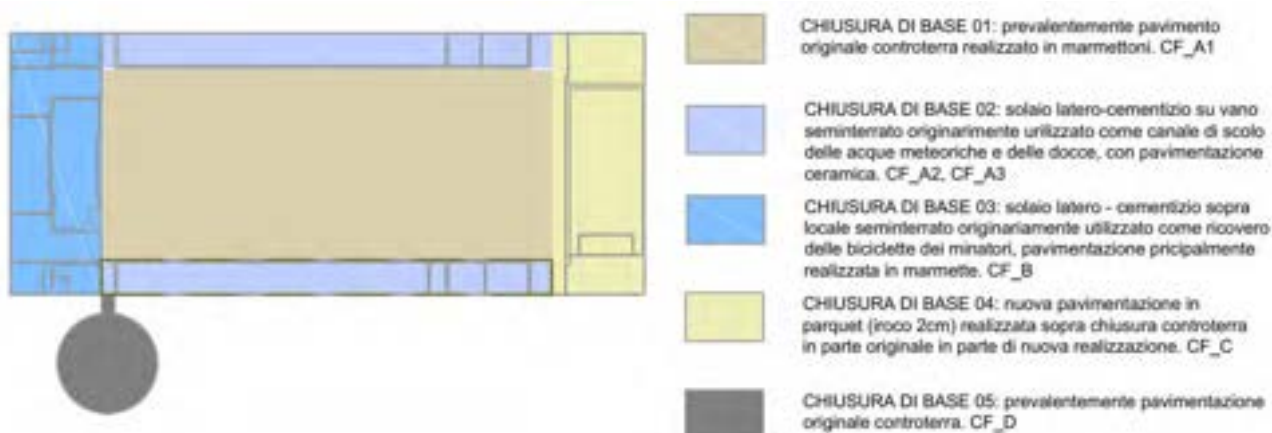


Figura 48. Planimetria corpi di fabbrica con chiusura di base museo del Carbone

Il Museo PAS ha subito un intervento più invasivo di recupero della muratura e delle chiusure contro-terra (figura 49). La muratura perimetrale è stata placcata all'esterno con una finitura di conci lapidei in trachite rossa (spessore 15cm), mentre, verso l'interno, è stato posto uno strato di mattoni forati (spessore 8cm) successivamente intonacato. Le chiusure orizzontali di base sono state completamente rinnovate: nella sala principale è nei locali di nuova realizzazione verso la corte interna si è eseguito uno sbancamento profondo, la chiusura orizzontale è realizzata da una soletta in cls alleggerito con argilla espansa posta sopra casseri a perdere. Nelle altre parti dell'edificio la soletta alleggerita è posta direttamente sopra l'originale pavimentazione contro-terra. Gli schemi progettuali mostrano anche l'utilizzo di teli in materiale plastico che possono contribuire alla protezione delle strutture dell'umidità di risalita.



Figura 49. Planimetria con indicazione delle strutture dell'involucro Museo PAS

Gli edifici oggetto di studio sono interessati da diffuse infiltrazioni meteoriche, che non sono oggetto di questo approfondimento in quanto molto evidenti e legate a vistose carenze dello strato impermeabile. L'ispezione visiva degli edifici oggetto di studio ha evidenziato dei segni di degrado compatibile con umidità di natura ascendente. Il fenomeno è molto evidente nel corpo di fabbrica del museo del carbone adibito a biglietteria (CF_D) con vistosi distacchi di vernice, spolveramento dell'intonaco ed efflorescenza salina (figura 50). Tuttavia tracce di efflorescenza salina e distacchi sono ben visibili nelle murature esterne di entrambi gli edifici, e sporadicamente anche nelle interne (figura 51, 52).



Figura 50. Chiari segni di degrado per umidità ascendente nella biglietteria del museo del carbone



Figura 51. Segno esterno di umidità ascendente, segno nella muratura interna ne museo del carbone



Figura 52. Segno esterno espulsione salina e distacchi Museo PAS

8.2 Metodologia e strumentazione

Il problema della umidità nella massa muraria è molto complesso perché le circostanze che possono provocare l'ingresso e la diffusione dell'acqua nelle murature sono relativamente numerose e una manifestazione di degrado per umidità può a volte essere originata da più fenomeni concomitanti. L'umidità può essere presente nelle costruzioni per diverse cause, la loro individuazione è necessaria per definire le strategie di intervento per il risanamento (Figura 53):

- *umidità da risalita capillare o ascendente*, derivante dal sottosuolo attratta dalle murature per capillarità o da forze elettro-osmotiche;
- *umidità da condensazione*, è l'umidità che può condensare all'interno dei materiali o sulle superfici a causa delle condizioni termo igrometriche interne e del clima esterno;

- *umidità da costruzione*, è presente in genere come residuo delle lavorazioni di costruzione negli edifici recenti oppure in edifici antichi in disuso quando gli spessori dei muri sono molto consistenti;
- *umidità meteorica o di infiltrazione*, è causata dalla pioggia non adeguatamente trattenuta dalla copertura che penetra in diversa misura nelle murature;
- *umidità accidentale*, è derivante da cause impreviste come la rottura oppure difetti costitutivi di elementi tecnologici (fognature, condotti pluviali, serbatoi d'acqua, ecc);
- *umidità da terrapieno*, è conseguenza della percolazione dai terrapieni a contatto laterale con i muri (scantinati, seminterrati, ..) in cui l'acqua arriva alle murature con un lento passaggio filtrante dai terreni.

L'osservazione della tipologia di degrado presente nella muratura e negli intonaci può portare ad individuare o escludere a priori alcune cause di umidità ma solo una analisi strumentale accurata può definirne con certezza l'estensione e l'eziologia (figura 54). La tipologia di umidità di interesse per questo lavoro è quella di natura ascendente. Essa interessa quasi tutti gli edifici antichi ed anche quelli di recente costruzione se privi di adeguati sistemi d'impermeabilizzazione. Il fenomeno si manifesta soprattutto con la comparsa di macchie alla base delle costruzioni con sgretolamento delle tinteggiature oppure con distacco degli intonaci o di frammenti di materiale da costruzione (pietre, mattoni, ecc.).

Nel caso si diagnostichi la presenza di umidità di risalita bisogna distinguere se l'acqua, che risale i muri per capillarità, proviene da fonti inesauribili (es. acque di faldefreatiche), oppure da ristagni di acqua piovana o da perdite di reti idriche (acque disperse di scorrimento).

Il formarsi delle acque disperse è da imputare a cause di origine accidentale che possono essere la perdita di una fognatura, come una forte imbibizione del terreno provocata dalle piogge non adeguatamente drenate; insomma da difetti di costruzione o da cattiva manutenzione dell'edificio e delle opere a questo correlate. Questo tipo di problemi è generalmente di natura occasionale e/o localizzata in parti specifiche dell'edificio. Un caso frequente è quello della modifica del livello del piano di campagna che può esporre al contatto con il terreno la muratura più porosa non accuratamente protetta generando l'assorbimento delle acque di scorrimento.

La "falda freatica" è uno strato continuo d'acqua che scorre nel sottosuolo alimentato dalle precipitazioni e dai corpi idrici superficiali. Se essa non è molto profonda l'acqua può risalire fino ad interessare le fondazioni dell'edificio e così diffondersi così per capillarità nelle strutture. Questo tipo di umidità presenta fenomeni di degrado imponenti con le seguenti caratteristiche:

- attacca l'edificio in tutta la sua pianta con perfetta uniformità, a meno che l'edificio non sia stato costruito con materiali diversi;
- l'altezza di risalita è massima nell'esposizione nord, minima nelle esposizioni molto soleggiate;
- il fenomeno è comune a tutti gli edifici della stessa zona, coevi di costruzione, ed omogenei per i materiali impiegati.

L'ingresso e la diffusione della umidità ascendente nelle murature sono dovuti essenzialmente al fenomeno fisico della capillarità, cioè a quel fenomeno che porta l'acqua a risalire per le murature in opposizione alla legge di gravità. Secondo la legge di gravità il liquido contenuto in due vasi comunicanti rimane allo stesso livello, quando però i vasi hanno dimensioni differenti il liquido risalirà in misura inversamente proporzionale alla dimensione dei vasi stessi, cioè salirà tanto più in alto quanto più ridotta sarà la dimensione del capillare (legge di Jurin). Perciò lo studio del fenomeno su materiali e strutture dello stesso tipo può essere di indirizzo per le conseguenti azioni di risanamento.

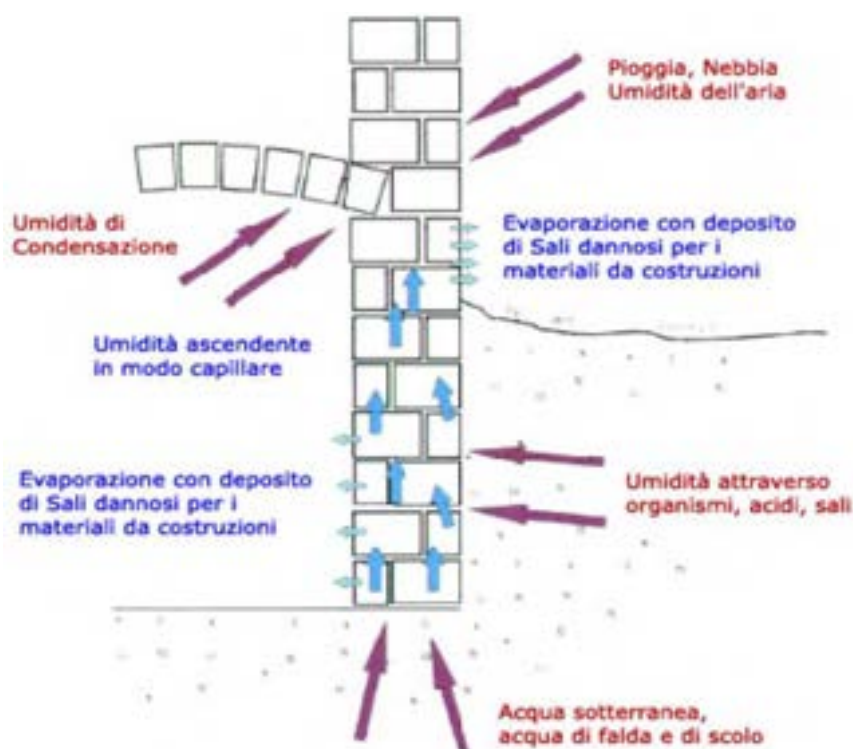


Figura 53. Tipologie di umidità nelle murature



Figura 54 distribuzione della umidità per tipo di causa

I metodi quantitativi di rilievo della umidità in un materiale prevedono il recupero di diversi campioni della muratura in opera e la successiva analisi con specifiche metodologie (metodo ponderale (bilancia termo essiccante), misura al carburo di calcio (metodo Hoescht), ...). Tuttavia nel nostro caso non è possibile eseguire dei saggi sulla muratura perciò l'indagine si svolgerà nel campo delle misurazioni qualitative proprie delle indagini assolutamente non distruttive sugli edifici.

Gli strumenti più utilizzati per il rilievo della umidità dei materiali tramite indagini non distruttive sono i dispositivi basati sulla misura della resistenza elettrica dei materiali e della variazione di campo elettromagnetico tramite fenomeni dielettrici. Questi strumenti non misurano direttamente l'acqua presente nei materiali ma ricavano un valore in Digit che può essere correlato ad esso tramite delle curve ricavate in laboratorio per materiali noti. Questi strumenti sono nati per la misurazione della umidità nel legno da costruzione, per i quali sono disponibili delle curve di calibrazione basate su campioni controllati degli stessi (norma l'ASTM D4442-07), che permettono di ottenere una indicazione abbastanza attendibile del contenuto assoluto di acqua del materiale (% di massa) sulla base della misura in Digit registrata. Per gli altri materiali da costruzione invece tali curve non sono generalmente disponibili, perciò la misura da indicazioni qualitative

del grado di umidità contenuto. Le misure infatti sono strettamente dipendenti alle tipologie di materiali, alle tecniche di posa ed alle condizioni di misura (temp. ambiente, uniformità della superficie, ...) riferibili al singolo caso di studio, perciò le campagne di misura sono difficilmente confrontabili tra loro. Nel caso di misura su materiali da costruzione, si deve perciò provvedere ad una procedura di taratura locale dello strumento che consiste nel registrare come valore *asciutto*, la misura rilevata su parti di muratura sicuramente asciutta, e come *bagnato* il valore registrato dallo strumento in parti della muratura che mostrino evidenti tracce di umidità. I valori intermedi tra questi due estremi registrati daranno una misura qualitativa del grado di umidità del materiale indagato. Tuttavia esistono dei valori indicativi che possono essere di riferimento per alcune tipologie di materiale, ma che possono essere sensibilmente differenti in funzione delle condizioni locali di misura (figura 55).

valore misurato		Materiale da costruzione generico
< 40	digit	asciutto
40-80	digit	umido
> 80	digit	bagnato (limite di saturazione)
valore misurato		Valutazione nel legno
< 50	digit	asciutto
50-80	digit	umido
> 80	digit	limite saturazione

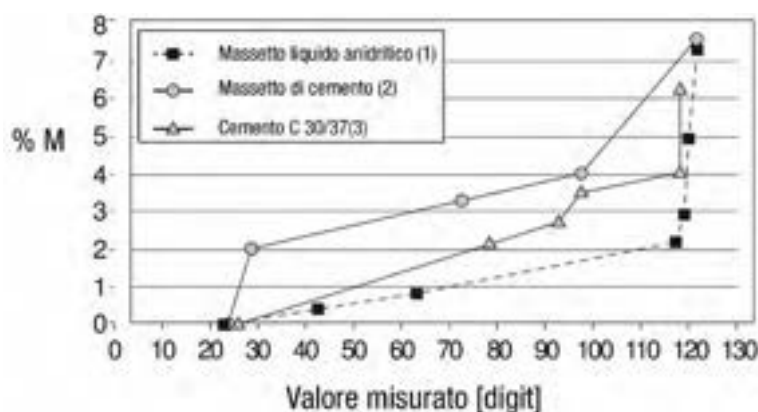
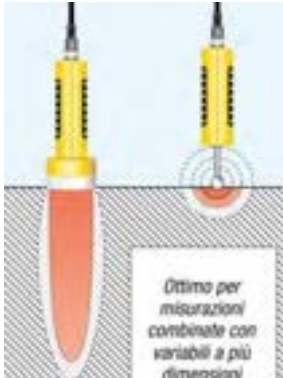


Figura 55. Valori di riferimento per la valutazione del grado di umidità con sensore dielettrico ed esempio di curva di calibrazione (fonte: documentazione tecnica del TS 660)

Per effettuare l'indagine si sono utilizzate due sonde per la misura della umidità dei materiali collegate ad un multimetro digitale (Trotec T3000): una basata sulla variazione del campo dielettrico (igrometro a contatto Trotec TS660), l'altra basata sulla variazione del campo elettromagnetico di un emettitore di microonde (igrometro a contatto Trotec TS610). La sonda a puntali basata sul principio della resistenza elettrica (Trotec TS510) non si è potuta utilizzare in quanto avrebbe prodotto un danneggiamento degli intonaci non consentito. Si è scelto di utilizzare due tipologie di sonde in quanto hanno caratteristiche differenti ed ai fini della ricerca può essere utile per confrontare i risultati. Inoltre il diverso grado di penetrazione nella massa muraria permette di tracciare un profilo della umidità anche in profondità: il sensore dielettrico TS660 fornisce una misura dei primi 2-4cm del materiale mentre il sensore a microonde TS610 può arrivare fino a 20-30 cm profondità. Si ricorda che il valore in Digit ricavato dagli strumenti è la media della porzione di materiale interessato dalla sonda, perciò la misura della sonda dielettrica è più attendibile per la parte superficiale della muratura, mentre quella a microonde è meno sensibile in quanto fa una media di un campo di analisi di 20-30 cm di diametro perciò è fortemente dipendente dalla struttura interna della muratura. È probabile nel nostro caso che il primo sensore valuti principalmente lo stato di intonaco, mentre il secondo arrivi ad interessare anche una buona porzione di pietra.

Le sonde T610 e TS660 sono state utilizzate per effettuare le misurazioni seguendo una griglia da 0,5x0,5m partendo dalla prossimità del pavimento fino ad una altezza massima di 2m. Nel museo del Carbone le prime misure sono state fatte nel corpo di fabbrica che ospita la biglietteria (CF_D) in modo da settare lo strumento su parti dove l'umidità è facilmente visibile e valutabile. Poi si sono indagate porzioni campione delle murature perimetrali e dei setti portanti interni. Stesso approccio è stato attuato nel Museo PAS, partendo da un punto in cui fossero più evidenti i segni del degrado e poi indagando su altre parti della muratura a campione.

Tabella 31. Sensori utilizzati per la misura

			
TS 610 con multimetro T3000		TS 660 con multimetro T3000	
			
TS 510 con multimetro T3000		uso combinato del TS610 e TS660	
TS 660 Sensore dielettrico per la misura della umidità dei materiali			
Metodo di misura: dielettrico variazione del campo magnetico Intervallo di misurazione: da 0 a 200 Digit Risoluzione: 0,1 Digit Profondità di penetrazione: 20-40 mm		<i>Pro:</i> misura veloce ed accurata dello strato superficiale <i>Contro:</i> dipendente dalla presenza di sali che conducono	
TS610 Sensore a microonde per la misura della umidità dei materiali			
Metodo di misura: dielettrico a microonde Intervallo di misurazione: da 0 a 200 Digit Risoluzione: 0,1 Digit Profondità di penetrazione: 200-300 mm		<i>Pro:</i> misura in profondità, indipendente dai sali nei materiali <i>Contro:</i> misure molto qualitative in quanto fortemente dipendenti dalla struttura interna della parete.	
TS510 Sensore resistivo per la misura della umidità dei materiali			
Metodo di misura: resistivo Intervallo di misurazione: da 15 a 100 Digit Risoluzione: 0,1 Digit Profondità di penetrazione: 10 mm, varia dipende dalla punta elettrodo		<i>Pro:</i> misura superficiale accurata, diponibilità di curve di taratura per alcuni materiali da costruzione, molte tipologie di elettrodi che permettono misure in profondità o in luoghi difficili. <i>Contro:</i> parzialmente invasivo, dipendente dai sali presenti nel materiale	

8.3 Risultati Museo del Carbone

Le indagini sul Museo del Carbone sono state effettuate su diverse parti della muratura prese sia dal perimetro esterno che da un muro portante interno alla zona termica (figura 56). Tutte le pareti sono realizzate in muratura portante lapidea (trachite rossa) di uno spessore di circa 35cm, solo quella della biglietteria è intonacata da entrambi i lati (MC_1). Le altre pareti perimetrali (MC_2, MC_4, MC_5) presentano in generale una placcatura (in marmo o mattonelle) nel paramento interno fino a circa un'altezza di circa 2m. Solo la parete della biglietteria (MC_1) presenta all'interno evidenti segni del degrado causato dalla umidità ascendente, le altre non mostrano tali segni probabilmente per la presenza della placcatura. La prima indagine è stata svolta perciò nella biglietteria al fine di calibrare lo strumento sullo specifico caso studio in una parte dove lo stato della muratura fosse evidente. Ogni parete è stata analizzata con l'ausilio di una griglia a maglie regolare (50x50cm) per l'esecuzione delle misure e di entrambe le sonde: TS 660 – dielettrico; TS 610 – Microonde.

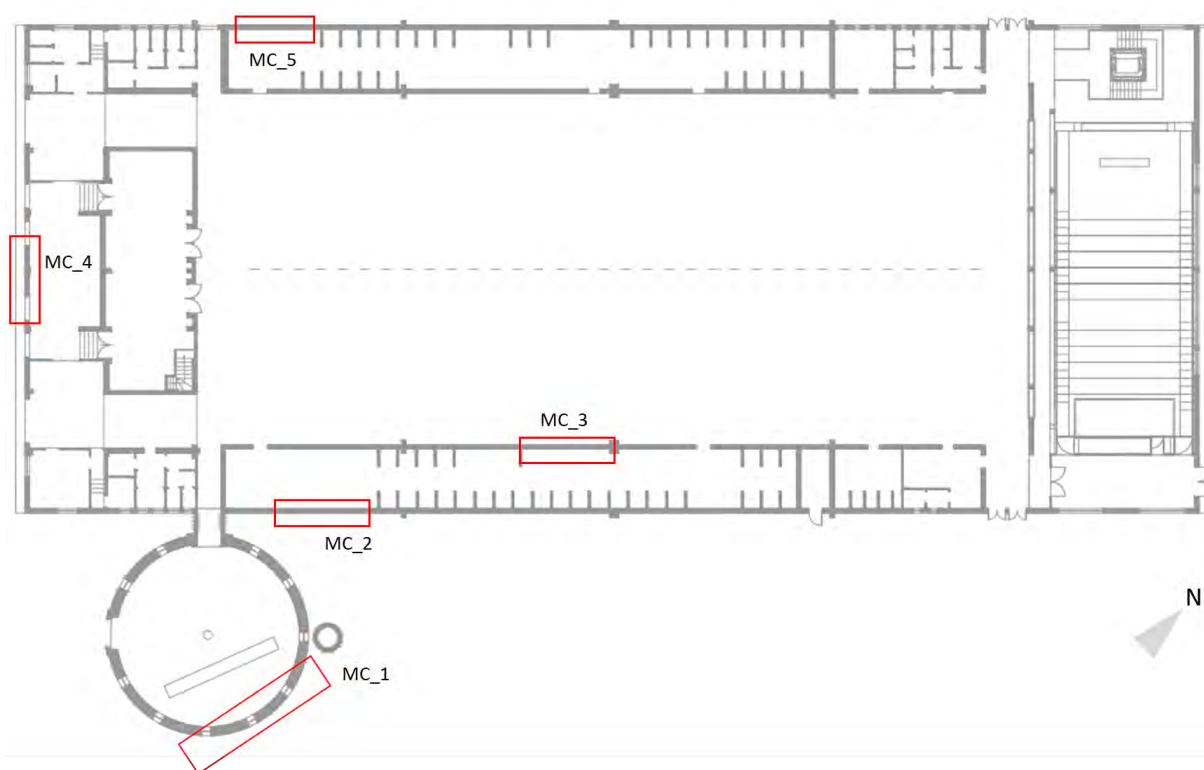


Figura 56. Planimetria del Museo del Carbone con individuazione delle murature analizzate

Rilievo della parete della biglietteria – MC_1

Le misurazioni effettuate con la sonda TS 660 (dielettrico) su parti presumibilmente asciutte, ossia su zone oltre i 2m dal pavimento e prive di segni di degrado (20 misurazioni), mostrano valori mediamente compresi tra i 45 – 55 Digit, ma talvolta anche inferiori a 40. Le parti sensibilmente bagnate al tatto e con evidente stato di degrado mostrano valori superiori ai 120 Digit, per i valori intermedi si sono definite due classi di materiale umido in funzione del livello di degrado osservato (tabella 32).

La stessa definizione di classi di umidità è stata definita osservando i valori ottenuti dal sensore a microonde TS 610, tuttavia a causa della loro minore variabilità si sono utilizzate solo le tre classi principali (tabella 32): asciutto, umido, bagnato.

Tabella 32. Valori qualitativi di riferimento

Calibrazione muratura lapieda intonacata			Calibrazione muratura lapieda intonacata		
sensore TS 660 (dielettrico)			sensore TS 610 (Microonde)		
[digit]	giudizio	degrado connesso	[digit]	giudizio	degrado connesso
minore di 55	asciutto	degrado assente	minore di 30	asciutto	degrado assente
tra 55 e 90	umido	non evidenti segni di degrado	tra 30 e 50	umido	lievi segni di degrado
tra 90 e 120	molto umido	lievi segni di degrado	maggiore di 50	bagnato	evidenti segni di degrado
maggiore di 120	bagnato	evidenti segni di degrado e umido al tatto			

La parete ha evidenti segni di degrado per umidità di risalita e per infiltrazioni di acqua meteorica dagli infissi. Le misurazioni (figura 58) mostrano risultati coerenti con lo stato della parete, gli strumenti ricavano valori piuttosto differenti in assoluto ma individuano gradienti di umidità simili nella parete. La parete può dirsi bagnata in superficie ed in profondità fino a circa un metro dal pavimento, solo verso la quota di 2m si possono trovare valori compatibili con una situazione di asciutto con entrambi i metodi di misura. La superficie della muratura mostra un gradiente molto netto dalla situazione bagnato a quelle intermedie – asciutte, mentre l'indagine più profonda mostra una maggiore gradazione del grado di umidità anche orizzontale. Probabilmente l'umidità degli strati superficiali è più alta a causa delle infiltrazioni meteoriche provenienti dalla finestra.

Rilievo della parete perimetrale (Sud-Est/ Nord-Ovest) (MC_2 / MC_5)

Il paramento interno delle pareti è placcato con piastrelle ceramiche fino ad un'altezza di circa 2m che non mostrano segni di degrado per umidità di risalita, essi, tuttavia, sono ben visibili negli intonaci esterni. Le indagini (figura 58, 61) hanno mostrato la presenza di un gradiente umido ascendente abbastanza riconoscibile: fino a circa 0,5m la muratura può dirsi bagnata sia superficialmente che in profondità, poi si degrada a valori su valori intermedi (molto umido, umido) senza raggiungere quasi mai le condizioni di asciutto per le indagini più superficiali. Ciò probabilmente è causato dalla difficoltà a smaltire l'umidità in eccesso causata dalla presenza delle mattonelle, che porterebbe ad un accumulo di acqua sulla parete interna meno traspirante della esterna. La condizione è molto simile su entrambe le pareti analizzate, confermando la presenza di umidità ascendente.

Rilievo della parete perimetrale (Sud-Ovest) (MC_4)

Questa parete si trova nel locale BAR, essa è intonacata su entrambi i lati ma mostra segni di degrado superficiale solo esterni. Le misurazioni (figura 60) hanno mostrato un gradiente di umidità principalmente collegato alle infiltrazioni dalle finestre: solo la parte più bassa della muratura può dirsi in parte bagnata (meno di 50cm) mentre si possono notare i segni delle infiltrazioni meteoriche al di sotto delle finestre. La condizione di questa muratura è differente dalle altre in quanto è la prosecuzione di una parete del seminterrato perciò in larga parte non è a contatto con il terreno, ciò spiega la minore presenza di fenomeni di risalita all'interno, mentre all'esterno essi sono ben visibili ad occhio nudo.

Rilievo della parete interna (MC_3)

La parete si trova all'interno della zona termica ed è placcata da entrambi i lati fino da una altezza di circa 2m: da una parte con piastrelle ceramiche, dall'altra con elementi in marmo (da 2cm di spessore). Il rilievo (figura 59) ha mostrato livelli di umidità nel materiale molto inferiori alle altre pareti: non vi sono parti considerabili bagnate, ma i livelli di umidità intermedi arrivano fino quasi alla fine della placcatura. La parte alta della muratura a circa 3m dalla pavimentazione è soggetta a forti infiltrazioni meteoriche, perciò l'umidità registrata potrebbe essere un residuo di quella accumulata durante le piogge, che filtra nel materiale e non riesce ad essere smaltita a causa della placcatura.

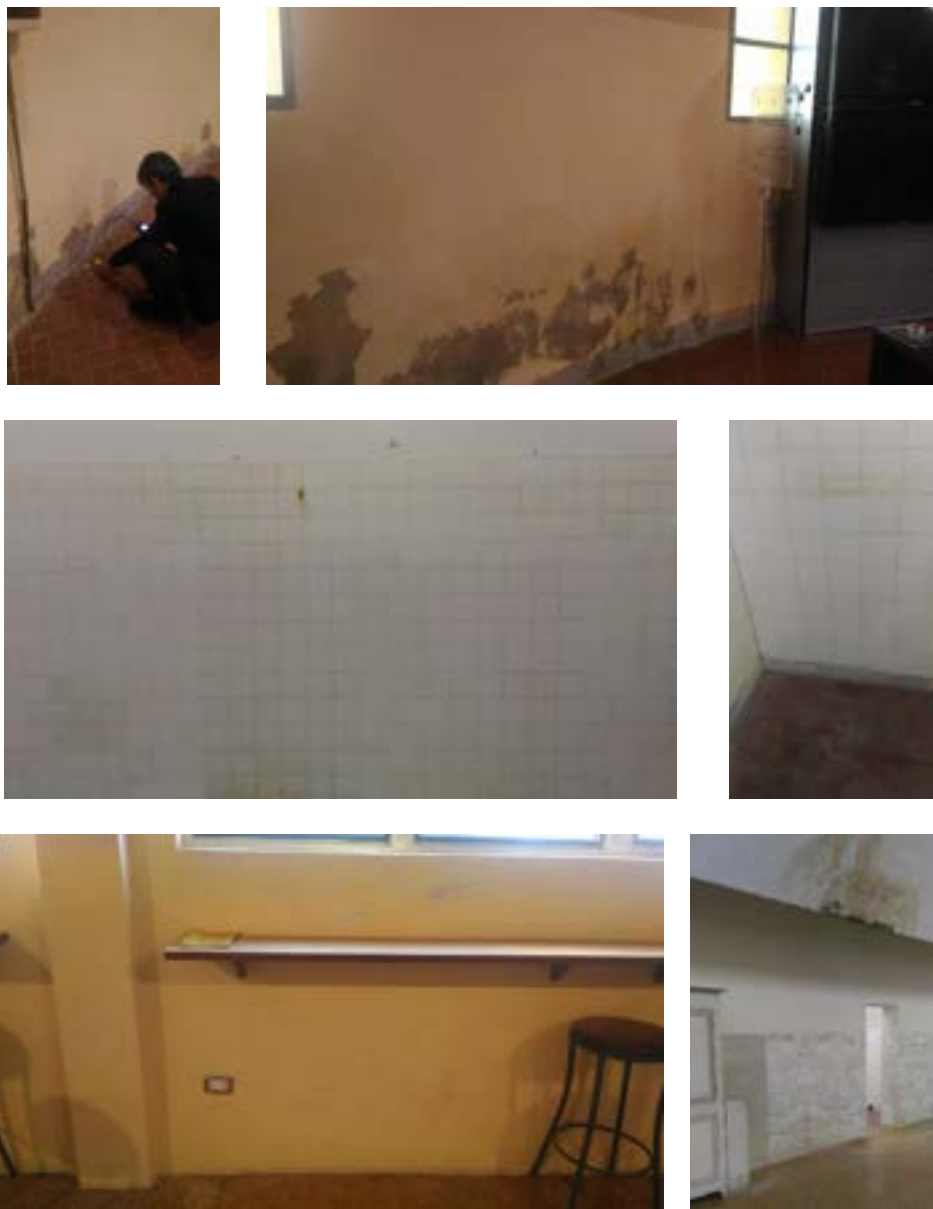


Figura 57. Pareti misurate: MC_1, placcata con piastrelle (MC_5, MC_2), pareti BAR (MC_4), interna (MC_3)

		Museo del Carbone Biglietteria - sensore TS 660 (Dielettrico)																			
		Larghezza [m]																			
h [m]	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
2,0		42	45	44	45	50	54	54	50	50	55	66	66	76	72	finestra		75	80	71	75
1,5		54	57	74	76	81	81	91	90	71	72	82	87	84	88	156	154	99	101	120	119
1,0		124	126	151	150	152	155	171	166	166	169	179	176	165	168	130	128	95	93	126	130
0,5		130	127	130	126	100	105	183	179	185	181	184	181	163	167	135	132	142	147	137	137
0,1		124	128	129	129	102	105	190	189	193	193	173	175	150	148	129	128	135	130	126	128
		Museo del Carbone Biglietteria - sensore TS 610 (Microonde)																			
		Larghezza [m]																			
h [m]	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
2,00		23	25	28	28	32	31	32	31	36	37	33	31	39	38	finestra		34	32	45	43
1,50		43	42	36	36	35	35	34	34	34	34	47	45	41	41	56	55	36	36	45	43
1,00		53	51	45	45	47	48	54	53	49	51	51	49	51	50	40	40	35	35	50	49
0,50		47	47	44	46	46	45	51	52	50	52	56	58	61	63	38	37	43	41	54	55
0,10		56	55	45	45	47	48	77	78	90	88	72	74	68	66	56	54	43	45	56	55

Figura 57. Griglie di rilievo della parete della biglietteria (MC_1)

Museo del Carbone Muro portante perimetrale (Sud-Est) - sensore TS 660 (Dielettrico)																	
Larghezza [m]																	
	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
2,00		94	90	83	85	78	75	82	78	86	82	86	88	83	88	84	79
1,50		97	101	94	99	95	92	89	88	78	75	93	93	118	119	90	88
1,00		85	85	111	110	102	100	94	95	100	99	127	125	86	81	117	120
0,50		116	120	126	130	125	121	107	111	105	110	129	128	129	128	115	111
0,10		129	124	137	138	120	123	138	136	115	110	128	128	130	134	104	100
Museo del Carbone Muro portante perimetrale (Sud-Est) - sensore TS 610 (Microonde)																	
Larghezza [m]																	
	0	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
2,00		19	21	37	36	31	29	24	25	20	20	21	36	19	22	22	31
1,50		28	29	39	40	39	38	30	28	28	28	30	43	27	37	28	42
1,00		46	46	44	42	46	45	39	39	42	44	44	48	45	33	44	26
0,50		45	43	48	50	40	38	36	35	38	39	43	49	45	37	41	26
0,10		53	51	52	53	46	47	58	57	54	55	52	45	53	61	47	29

Figura 58. Griglie di rilievo parete perimetrale (Sud-Est) (MC_2)

		Museo del Carbone Muro portante interno - sensore TS 660 (Dielettrico)																
		Larghezza [m]																
h[m]		0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
2,00			43	45	47	50	43	48	39	41	30	33	58	55	47	51	31	34
1,50			64	63	85	84	65	70	74	72	56	58	68	70	70	71	65	62
1,00			61	65	88	83	79	77	88	83	63	65	67	65	80	75	63	64
0,50			70	67	92	89	73	70	83	85	57	57	75	75	77	76	65	67
0,10			94	97	82	86	70	73	96	101	64	67	72	68	89	93	100	102
		Museo del Carbone Muro portante interno - sensore TS 610 (Microonde)																
		Larghezza [m]																
h[m]		0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
2,00			22	23	25	25	27	28	26	28	30	29	27	28	23	22	22	22
1,50			31	29	22	23	33	32	31	29	33	32	36	37	32	34	32	31
1,00			22	22	23	25	39	40	39	38	44	45	21	20	39	37	37	35
0,50			31	32	32	34	33	31	39	38	12	10	25	24	26	25	49	48
0,10			47	47	41	42	41	41	42	43	24	22	33	35	35	33	45	46

Figura 59. Griglie di rilievo parete interna (MC_3)

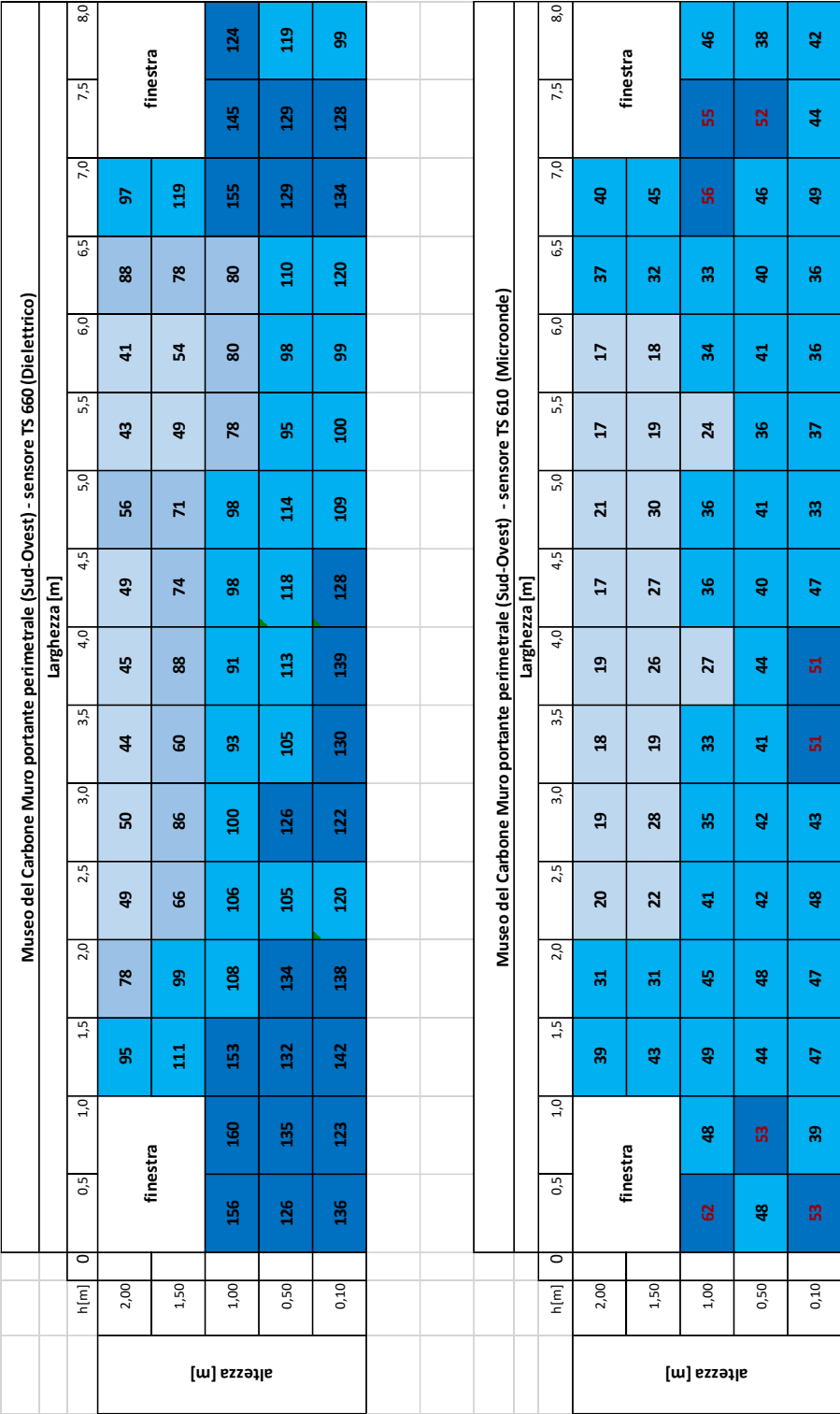


Figura 60. Griglie di rilievo parete perimetrale Sud - Ovest (MC_4)

Museo del Carbone Muro portante perimetrale (Nord-Ovest) - sensore TS 660 (Dielettrico)																			
		h[m]	Larghezza [m]																
			0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
altezza [m]		2,00		68	69	78	90	82	78	81	86	95	84	95	90	66	87	78	86
		1,50		76	92	100	107	104	101	90	77	76	85	96	98	88	89	98	91
		1,00		100	98	117	119	109	101	97	103	110	108	125	126	91	96	99	100
		0,50		125	125	138	133	126	124	122	114	111	119	135	131	133	135	118	117
		0,10		126	134	142	139	120	131	141	139	118	117	135	135	145	135	125	121
Museo del Carbone Muro portante perimetrale (Nord - Ovest) - sensore TS 610 (Microonde)																			
		h[m]	Larghezza [m]																
			0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
altezza [m]		2,00		26	23	41	40	28	32	28	28	25	26	23	21	25	26	24	28
		1,50		28	35	43	44	37	40	34	30	30	29	31	48	33	42	33	43
		1,00		46	51	47	48	49	49	47	42	49	49	48	54	51	36	45	56
		0,50		46	47	50	53	52	41	37	41	41	41	46	53	48	41	43	54
		0,10		56	52	54	57	49	51	57	60	61	61	53	51	59	65	59	49

Figura 61. Griglie di rilievo parete perimetrale Nord - Ovest (MC_5)

8.4 Risultati Museo PAS

Il museo PAS presenta sporadici segni di degrado causato dalla umidità ascendente, riconducibili principalmente ad efflorescenza salina nelle parti basse della placcatura lapidea esterna. Inoltre sono visibili localizzati distacchi di intonaco interno principalmente in corrispondenza delle aperture.

Le pareti del perimetro esterno sono differenti da quelle valutate nel museo del carbone in quanto rispetto alla muratura lapidea originaria (trachite rossa 35 cm spessore) sono stati aggiunti degli strati sia interni che esterni:

- strato interno: strato di mattoni forati (spessore 8 cm) intonacato;
- strato esterno: placcaggio in conci irregolari di trachite rossa (spessore 15 cm) faccia a vista;

Inoltre tutti i locali hanno avuto modifiche alla chiusura di base che possono contribuire a proteggere le strutture dalla umidità ascendente. In particolare lo strato interno della muratura (mattoni forati) non è a diretto contatto con il terreno in quanto si poggia sul solaio della nuova pavimentazione.

Le indagini sul Museo PAS (figura 62) sono state effettuate su diverse parti della muratura perimetrale e su una parte di un muro portante interno alla zona termica (figura 62). Le misure sulle pareti perimetrali hanno richiesto una nuova calibrazione dello strumento, in quanto lo strumento è stato a contatto con il mattone forato e non con il materiale lapideo.

Le murature portanti interne invece, mantengono la struttura originale di semplici pareti lapidee in *trachite rossa* intonacata su due lati (spessore 53 cm), perciò si sono utilizzati gli stessi settaggi del museo del carbone.

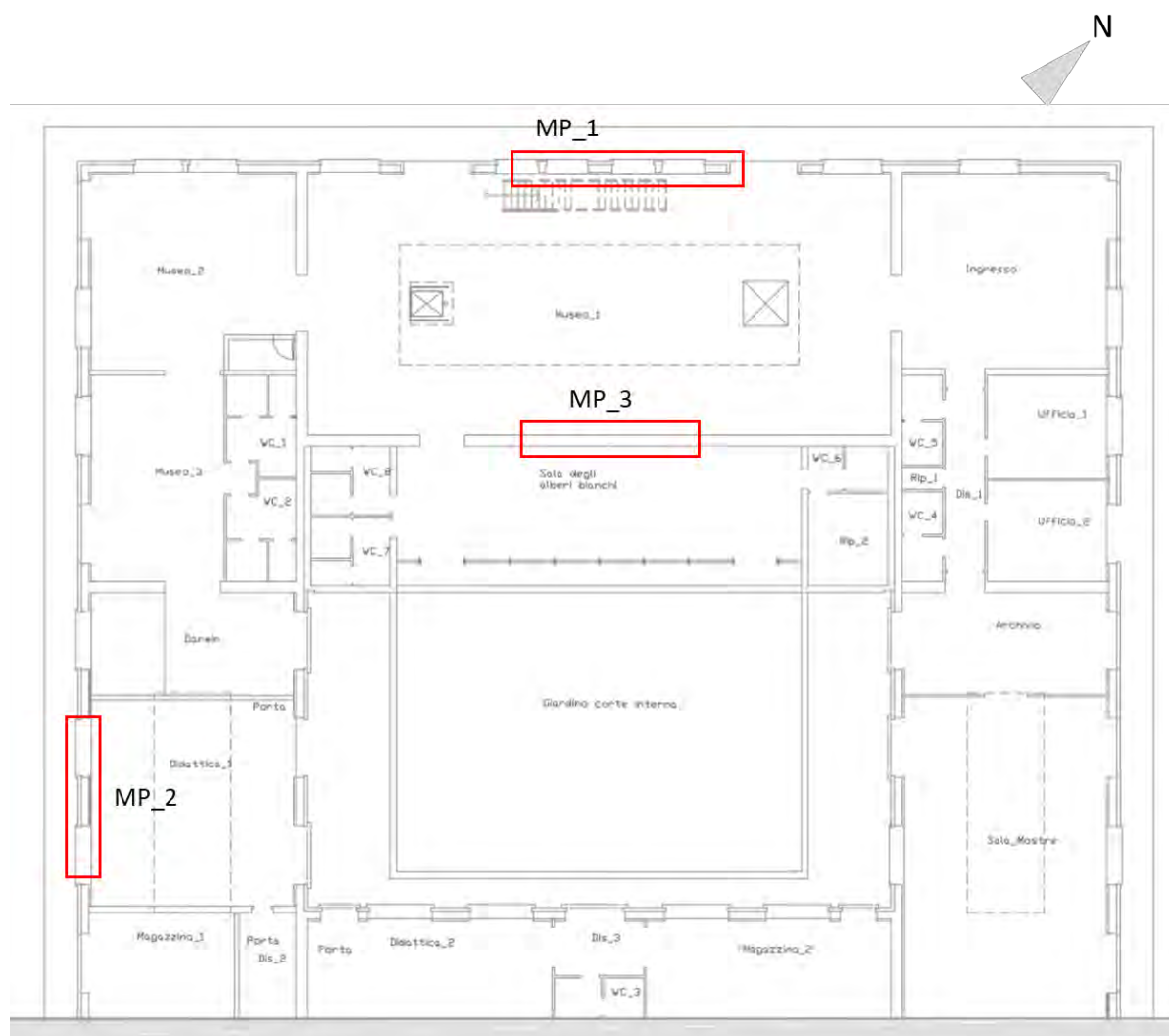


Figura 62. Planimetria del Museo PAS con individuazione delle murature analizzate

Rilievo della parete perimetrale (Nord-Ovest/ Sud - Ovest) (MP_1 / MP_2)

La parete MP_1 si trova nel locale espositivo principale, è una delle poche del museo a mostrare alcuni distacchi dell'intonaci interni causati principalmente dalle infiltrazioni attraverso gli infissi. Tali parti sono state utilizzate per settare i limiti per i giudizi qualitativi per le misure effettuate a contatto con la parete interna di mattoni forati.

Tabella 33. Valori qualitativi di riferimento

Calibrazione muratura lapidea intonacata		
sensore TS 660 (dielettrico)		
[digit]	giudizio	degrado connesso
minore di 60	asciutto	degrado assente
tra 60 e 100	umido	degrado non visibile
tra 100 e 140	molto umido	lievi segni di degrado
maggiore di 140	bagnato	segni di degrado ed umido al tatto

Calibrazione muratura lapidea intonacata		
sensore TS 610 (Microonde)		
[digit]	giudizio	degrado connesso
minore di 35	asciutto	degrado assente
tra 30 e 50	umido	degrado non visibile
maggiore di 50	bagnato	segni di degrado

Le misurazioni effettuate sulle due pareti perimetrali (MP_1, MP_2) mostrano risultati simili per valori registrati e distribuzione degli stessi (figure 63, 64). La parte della muratura immediatamente sopra il livello del pavimento mostra una umidità maggiore, probabilmente legata alla umidità ascendente, tuttavia essa sembra esaurirsi entro i 50 cm. L'umidità misurata nello stato superficiale interno sembra più che altro legata alle infiltrazioni dagli infissi, che mostrano valori molto alti nei pressi delle aperture (soprattutto la porta). La valutazione più profonda invece mostra valori più uniformi che però raramente arrivano all'asciutto.

Rilievo della parete interna (MP_3)

La parete MP_3 si trova nel locale espositivo principale, essa è intonaca da entrambi i lati e non mostra segni di degrado compatibili con umidità ascendente. Nella sua parte alta (oltre i 2 m della griglia di rilievo), la parete è interessata da diffusi fenomeni di infiltrazione meteorica. I valori rilevati (figura 65) non arrivano mai al valore bagnato, quelli delle misure superficiali sembrano essere per la maggioranza su asciutto mentre le misure della massa interna mostrano valori leggermente peggiori.

	Museo PAS Muro portante perimetrale (Nord-ovest) - sensore TS 610 (Microonde)																							
	Larghezza [m]																							
h[m]	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0			
1,60		finestre																				39	54	porta
1,20	43	41	45	45	44	42	49	51	42	43	58	59	50	48	38	38	38	44	45	60				
0,80	44	45	37	37	45	45	38	38	29	33	35	34	48	46	41	42	39	38	57					
0,40	52	51	43	45	45	43	43	42	40	39	46	47	53	51	43	44	54	55	61					
0,10	43	42	45	47	34	36	57	55	50	49	51	51	52	53	61	59	57	57	64					
	Museo del Carbone Muro portante perimetrale (Nord-Ovest) - sensore TS 660 (dielettrico)																							
	Larghezza [m]																							
h[m]	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0			
1,60		finestre																				123	153	porta
1,20	81	85	91	88	102	100	85	121	63	59	44	49	197	193	95	100	192	188	178					
0,80	75	75	87	84	71	75	74	67	54	51	52	53	85	89	60	60	56	58	169					
0,40	97	102	133	128	136	131	99	80	58	60	54	59	128	129	104	107	126	129	183					
0,10	130	127	125	127	88	90	125	108	131	135	141	136	122	117	187	191	178	179	189					

Figura 63. Griglie di rilievo parete perimetrale Nord - Ovest (MP_1)

Museo PAS Muro portante perimetrale (Sud - Ovest) - sensore TS 610 (Microonde)																						
Larghezza [m]																						
h[m]	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	
1,60	finestre										55	49	60	59	finestra							
1,20	44	41	43	45	42	42	42	53	51	65	43	58	59	48	48	39	38	45	45	34	41	
0,80	34	28	26	37	47	45	45	38	38	48	33	50	49	29	25	33	32	31	38	28	25	
0,40	30	27	22	28	31	29	29	39	42	39	39	45	47	34	34	33	44	42	41	35	42	
0,10	43	42	49	47	36	36	36	56	55	52	51	52	51	51	53	57	59	58	57	64	64	
Museo del Carbone Muro portante perimetrale (Sud-ovest) - sensore TS 660 (dielettrico)																						
Larghezza [m]																						
h[m]	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	
1,60	finestre										129	58	143	139	finestra							
1,20	86	88	66	87	99	95	95	80	142	189	60	99	158	80	78	65	73	69	67	52	77	
0,80	79	73	45	54	53	42	42	76	72	125	49	49	178	83	88	57	56	57	59	45	65	
0,40	94	102	85	87	54	45	45	103	82	115	60	88	189	88	76	106	112	102	87	99	45	
0,10	115	125	121	122	85	92	92	126	112	130	138	141	199	125	116	119	123	111	132	120	100	

[illegible]

Figura 65. Griglie di rilievo parete interna (MP_3)

8.5 *Discussione e future ricerche*

Lo studio sul Museo del Carbone ha mostrato la presenza di umidità ascendente su tutti i muri perimetrali, la parte bagnata è generalmente compresa nei 50 cm mentre quella considerevole umida può raggiungere i 60-80cm dal piano di campagna. I lati maggiormente colpiti, oltre all'edificio che ospita la biglietteria, sono quelli rivolti a nord -est e nord ovest che, essendo soggetti a minore irraggiamento solare, hanno un minore tasso di evaporazione. L'edificio che occupa la biglietteria è invece quello largamente più soggetto al fenomeno, probabilmente in quanto la muratura di fondazione è direttamente a contatto con il terreno e non è protetta dai camminamenti laterali presenti nell'edificio principale.

I muri portanti interni analizzati mostrano invece valori più prossimi al materiale asciutto, perciò in generale si può ipotizzare che l'umidità ascendente sia prettamente da imputare a cause accidentali.

Nello specifico le pavimentazioni dei camminamenti intorno all'edificio sono in cattivo stato, mostrano pendenze non adeguate che portano l'acqua piovana verso il corpo di fabbrica. Questo potrebbe favorire l'infiltrazione di acqua meteorica nel terreno a contatto con la muratura perimetrale non adeguatamente protetta, poi la capillarità del materiale lapideo e della malta fa il resto. La scarsa tenuta all'azione battente dell'acqua piovana degli infissi, ma anche delle opere murarie annesse (mazzette, davanzale, ...), genera infiltrazioni localmente non trascurabili che agiscono in maniera combinata alla umidità ascendente. Tale effetto è ben visibile nella biglietteria ma i segni sono presenti in tutto il perimetro esterno, dove nei pressi delle aperture il valore di Digit misurato è sempre molto maggiore. In genere tutto il materiale murario al di sotto della base delle aperture è considerevole umido in quanto l'azione della umidità ascendente si unisce con quella meteorica di infiltrazione.



Figura 66. Degrado delle pavimentazioni e segni di degrado per umidità ascendente Museo Carbone



Figura 67. Segni di Infiltrazioni dagli infissi

Il fenomeno della umidità di risalita è molto meno presente nel Museo PAS: nella parte interna delle murature perimetrali è quasi assente, solo la parte bassa (circa 20-50 cm dal piano di campagna) della placcatura esterna sembra essere soggetta da un qualche fenomeno di degrado (espulsione dei Sali) probabilmente dovuto ad infiltrazioni di acqua tra il terreno e le fondazioni dell'edificio (figura 68). Tali osservazioni sono confermate dallo studio strumentale che ha invece evidenziato l'importanza delle infiltrazioni dagli infissi, che rendono umida gran parte della massa muraria prossima alle aperture (figura 68).



Figura 68. Segni di Infiltrazioni dagli infissi Museo PAS

Lo studio della umidità dei materiali è stato svolto utilizzando due tipologie di sensori, uno dielettrico a campo magnetico (TS 660) e l'altro a microonde (TS610). I risultati ottenuti sono generalmente coerenti tra loro, tuttavia lo strumento dedicato alla misura superficiale mostra un range molto più ampio dei valori misurati rispetto allo strumento per le analisi profonde. La mancanza di curve affidabili di calibrazione può essere un limite nella definizione dello stato del degrado del materiale, dando all'indagine un valore puramente qualitativo. Gli strumenti utilizzati hanno però permesso di studiare la presenza di umidità anche in murature che non avevano segni evidenti interni di degrado e che non si riusciva ad indagare tramite la sola indagine termografica a causa della impossibilità di riscaldare l'ambiente per una termografia attiva.

Il confronto tra le due misure nella parete di calibrazione (MC_1) ha mostrato una relazione tra i valori misurati dai due strumenti, che sembrerebbe evidenziare una prevalenza di umidità superficiale rispetto a quella profonda (figura 69). I valori misurati dallo strumento dielettrico (TS 660) sono sempre maggiori di quello a microonde (TS 610), ed il loro rapporto diminuisce con l'aumento della umidità superficiale diventando prossimo alla unità in caso di materiale asciutto. Tale relazione però si perde nelle altre pareti dove i valori misurati sembrano essere più indipendenti tra loro mostrando una distribuzione della umidità più uniforme nella massa muraria (figure 71, 70). In una ottica di studio del degrado tipico delle murature storiche locali potrebbe essere di interesse effettuare delle prove di laboratorio su campioni controllati di muratura al fine di avere valori di riferimento testati per entrambi gli strumenti, da riutilizzare per simili rilevamenti su altri edifici.

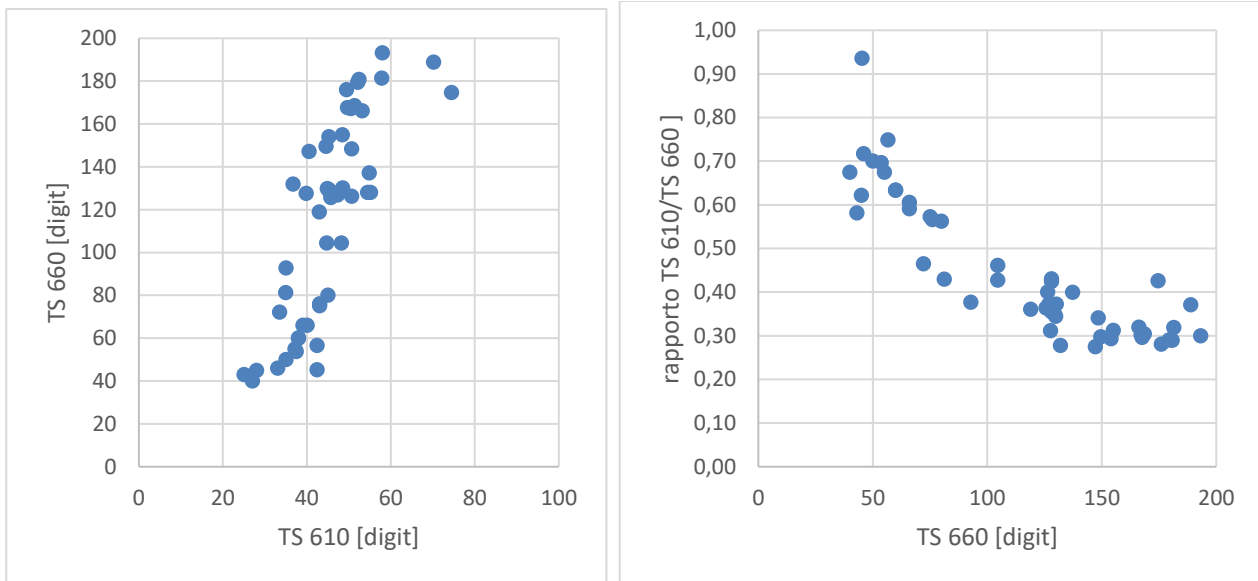


Figura 69. Relazione tra valori misurati dai sensori (MC_1)

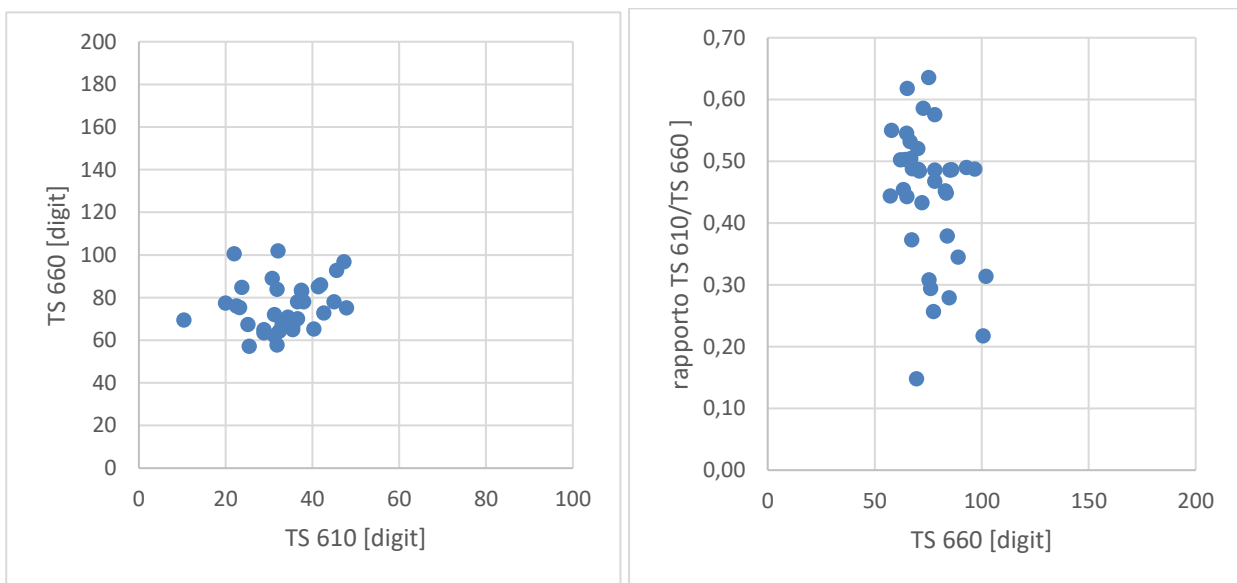


Figura 70. Relazione tra valori misurati dai sensori (MC_2)

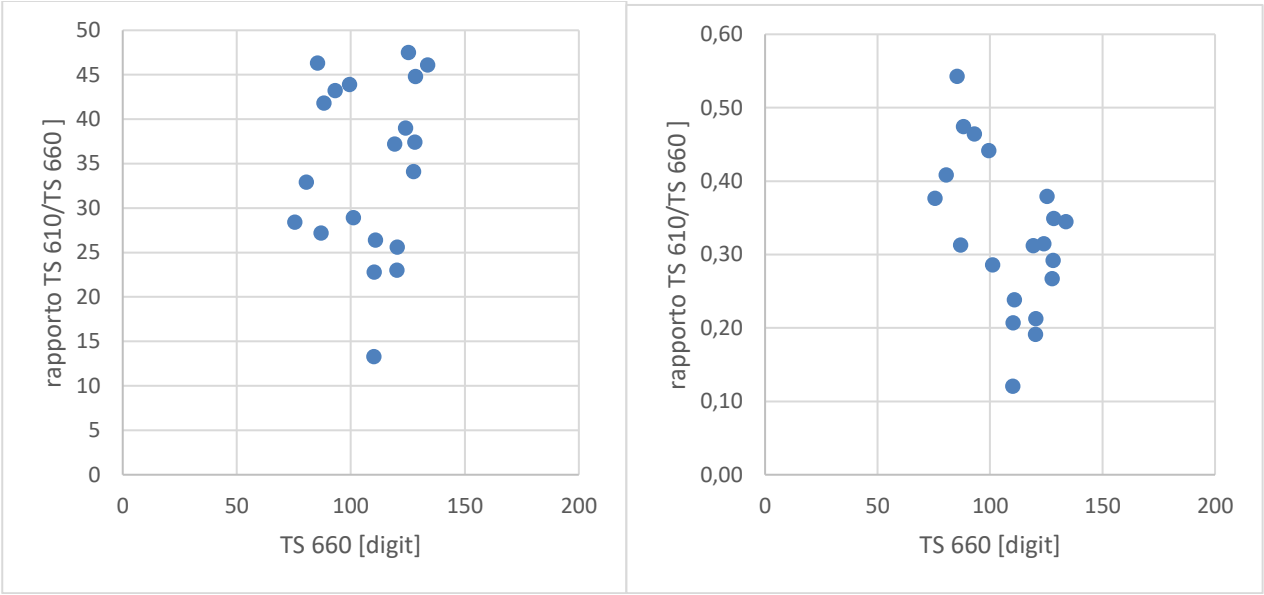


Figura 71. Relazione tra valori misurati dai sensori (MC_3)