

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE**

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ENERGETICA, NUCLEARE E DEL  
CONTROLLO AMBIENTALE — DIENCA*

**TESI DI LAUREA**

in

**IMPIANTI TECNICI**

**CALCOLO DINAMICO DELLE PRESTAZIONI  
ENERGETICHE DI UN EDIFICIO  
SECONDO LE PRESCRIZIONI DEL PROTOCOLLO LEED:  
IL MUSEO MAGI '900 DI PIEVE DI CENTO**

**CANDIDATO:**

Licia Venturini

**RELATORE:**

Chiar.mo Prof. Giovanni Semprini

**CORRELATORI:**

Ing. Emanuele Pifferi

Ing. Luca Venturi

Anno Accademico 2011/2012

Sessione I

---

## Indice

Introduzione .....	4
Scopo.....	4
Articolazione del lavoro.....	4
Capitolo 1 - Dati statistici relativi allo sviluppo sostenibile: cambiamenti climatici e politiche energetiche.....	6
1.1 Il principale indicatore: emissioni di gas a effetto serra .....	7
1.2 Cambiamenti climatici: gas serra e temperatura media globale.....	9
1.3 Politiche energetiche: Europa 2020 .....	10
1.4 Lo stato dell'arte del settore delle costruzioni e gli obiettivi di sviluppo.....	13
Capitolo 2 - Valutazione della sostenibilità edilizia: il sistema LEED® .....	16
2.1 La certificazione LEED e il ruolo di GBC Italia.....	17
2.2 LEED AP, professionista accreditato.....	18
2.3 I protocolli LEED.....	19
2.4 Categorie, prerequisiti e crediti del sistema di valutazione LEED ....	20
2.5 Il sistema di punteggio .....	24
2.6 Vantaggi di un edificio certificato LEED .....	25
Capitolo 3 - Calcolo dinamico .....	26
3.1 Il ruolo del calcolo dinamico nella certificazione LEED.....	27

---

3.1.1 la categoria Energia e Atmosfera (EA).....	27
3.2 Standard di riferimento .....	32
3.2.1 UNI/TS 11300-1 e 2 .....	32
3.2.2 ANSI/ASHRAE Standard 90.1-2007 .....	33
3.2.3 UNI EN ISO 13790:2008 .....	35
3.2.4 UNI EN 15265:2008.....	39
3.3 Modelli di calcolo dinamico.....	41
3.3.1 EnergyPlus .....	43
3.3.2 DesignBuilder .....	47
Capitolo 4 – Il caso studio: ampliamento del museo M.A.G.I '900.....	49
4.1 Il contesto in cui sorge il museo: Pieve di Cento.....	49
4.2 Il museo M.A.G.I '900 .....	50
4.2.1 Il fondatore.....	50
4.2.2 Le collezioni .....	52
4.2.3 Il progetto di ampliamento.....	53
Capitolo 5 – Applicazione del calcolo dinamico al caso studio.....	57
5.1 Modellazione edificio con Design Builder .....	57
5.1.1 Dati modello .....	57
5.1.2 Attività .....	58
5.1.3 Costruzione .....	60
5.1.4 Aperture .....	62
5.1.5 Illuminazione .....	64

---

5.1.6 HVAC .....	66
5.2 Simulazione e output del software .....	67
5.2.1 Report grafico .....	67
Capitolo 6 – Confronto tra il progetto e soluzioni differenti .....	70
6.1 Caso 1: pareti leggere.....	71
6.2 Caso 2: schermature .....	72
6.3 Caso 3: progetto .....	72
6.4 Confronti tra i risultati.....	73
6. 4.1 Fabbisogno $Q_h$ e $Q_c$ .....	73
6. 4.2 Comportamento pareti esterne, solai e vetrate.....	75
6. 4.3 Apporti interni.....	77
6. 4.4 Considerazioni finali.....	80
Capitolo 7 - Ottenimento del credito.....	81
7.1 Edificio di riferimento.....	81
7.2 Confronto dei risultati .....	87
7.3 Confronto delle simulazioni.....	92
Conclusioni .....	101
Bibliografia .....	104
Normativa tecnica .....	104
Webgrafia.....	105

---

## **Introduzione**

### **Scopo**

Lo scopo della presente tesi è quello di studiare il comportamento termoeconomico di un edificio con l'obiettivo di ridurre al massimo la prestazione energetica e ottenere un punteggio elevato ai fini della certificazione LEED®.

Si è individuato un caso di studio reale, in fase di progettazione a cura dello studio di ingegneria e architettura dell'ing. Luca Venturi: l'ampliamento del museo MAGI '900 di Pieve di Cento.

Per raggiungere l'obiettivo prefissato si è impostato un calcolo dinamico dell'edificio in esame, condotto presso lo studio associato Gruppo EDEN, specializzato in efficienza energetica. Si è scelto di studiare il comportamento del sistema edificio-impianto con Design Builder, la più diffusa interfaccia grafica del motore di calcolo EnergyPlus.

Una volta impostato il modello sono state valutate molteplici scelte progettuali, sia lato involucro sia lato impianto, per quantificarne l'incidenza sulle prestazioni dell'intero sistema e per individuare la soluzione ottimale sulla quale calcolare il punteggio LEED ottenibile.

### **Articolazione del lavoro**

Prima di inoltrarsi nello studio del caso in questione si è fatto un breve inquadramento della situazione attuale europea in materia di sostenibilità energetica e ambientale, per delineare le necessità cui l'uomo di oggi deve far fronte nell'ottica della salvaguardia delle risorse primarie.

Si è poi studiato lo standard di valutazione della sostenibilità edilizia LEED, nato negli Stati Uniti negli anni '90 proprio per affrontare in modo

---

sistematico queste problematiche, ormai ampiamente diffuso anche in Europa. Questo standard stabilisce precisi criteri di progettazione e realizzazione di edifici salubri, energeticamente efficienti e ad impatto ambientale contenuto. In particolare si è approfondito il credito relativo al controllo delle prestazioni energetiche degli edifici, sezione *Energia e Atmosfera*, in particolare il Credito 1: Ottimizzazione delle prestazioni energetiche.

Una volta effettuata la modellazione dell'edificio individuato come caso di studio, il museo MAGI '900 di Pieve di Cento, sono state eseguite diverse simulazioni dinamiche col software Design Builder, che implementa il motore di calcolo EnergyPlus, fino ad arrivare alla definizione nel dettaglio delle caratteristiche ottimali dell'edificio di progetto.

Infine è stata valutata la prestazione dell'edificio ai fini dell'ottenimento del credito LEED sopra citato; per farlo si è eseguito il confronto tra l'edificio di progetto e un edificio di riferimento, le cui caratteristiche sono definite in maniera molto precisa all'interno del protocollo LEED Nuove Costruzioni e Ristrutturazioni. L'edificio di progetto deve necessariamente avere una prestazione migliore di quello di riferimento; all'aumentare della percentuale di miglioramento sui consumi di energia primaria si raggiunge un punteggio via via maggiore, che incide fortemente sul punteggio LEED complessivo dell'edificio.

Di seguito sono riportati le principali fasi in cui si è articolato il lavoro:

- studio situazione ambientale
- studio di LEED
- studio teorico dei principi di base di un calcolo dinamico
- inquadramento del sito e dell'edificio oggetto dell'analisi
- modellazione ed analisi delle caratteristiche dell'edificio
- simulazioni con diverse soluzioni progettuali
- confronto tra l'edificio di progetto e quello di riferimento

---

## **Capitolo 1 - Dati statistici relativi allo sviluppo sostenibile: cambiamenti climatici e politiche energetiche**

Dato il 36% del consumo globale imputabile al settore costruzione (US Green Building Council 2011), la preoccupazione energetico e ambientale diventa sempre più urgente.

I dati statistici relativi allo sviluppo sostenibile nei settori del cambiamento climatico e dell'energia si basano sul set di indicatori di sviluppo sostenibile l'Unione europea (UE) concordati per monitorare la sua strategia di sviluppo sostenibile.

Insieme agli indicatori per altre zone, costituiscono 'il rapporto Sviluppo sostenibile nell'Unione europea - 2011 relazione di monitoraggio della strategia europea di sviluppo sostenibile', che Eurostat elabora ogni due anni per fornire un quadro statistico oggettivo dei progressi verso i punti e gli obiettivi fissati dalla strategia di sviluppo sostenibile dell'UE e che vanno a sostenere i report di attuazione della Commissione europea.

Per la maggior parte degli indicatori del cambiamento climatico e dell'energia i progressi dal 2000 sono stati buoni, soprattutto nella seconda metà del decennio, mentre le tendenze sfavorevoli continuano solo per un numero limitato di indicatori. Anche se la trasformazione verso un'economia a basse emissioni di carbonio è già riflesso in alcuni indicatori, l'economia della UE rimane ad alto consumo di energia e di carbonio e la maggior parte degli indicatori in questo tema sono strettamente legati alla crescita economica.

---

## **1.1 Il principale indicatore: emissioni di gas a effetto serra**

L'UE ha fissato un obiettivo a medio termine per ridurre le emissioni di almeno il 20% rispetto ai livelli del 1990 entro il 2020. Il 2020 viene valutato l'obiettivo principale.

Tra il 2000 e il 2009 nell'UE-27 le emissioni di gas a effetto serra sono diminuite e tale riduzione pone l'UE al di sotto del percorso di destinazione del 2020 (*Figura 1*).

Le emissioni dell'UE-27 nel 2009 erano al di sotto del 17,4% rispetto ai livelli del 1990 - una riduzione netta di 974 milioni di tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente, 355 milioni di tonnellate, di cui erano nel 2009. Riduzioni maggiori sono state raggiunte nel 1990 quando le emissioni sono calate ad un tasso medio annuo del 0,9%. Le emissioni hanno ricominciato a crescere nella prima metà degli anni 2000, ma questa tendenza si è invertita nel 2004. Tra il 2004 e il 2009, le emissioni di gas a effetto serra sono diminuite, in media, più veloce nel corso degli anni 1990.

Le riduzioni conseguite tra il 2000 e il 2008 sono il risultato di un uso più efficiente dell'energia e riflettono anche il passaggio a carburanti con basso contenuto di carbonio. Minore intensità di carbonio ha permesso alle emissioni di diminuire, nonostante il consumo e volumi di trasporto di energia in aumento.

Riduzioni significative sono state ottenute anche nei settori dei rifiuti e agricoltura, che sono responsabili della maggior parte delle emissioni di gas serra diversi dal CO<sub>2</sub> di gas quali il metano e il protossido di azoto.

Un aumento del consumo di energia rinnovabile e la recessione economica sono i fattori principali alla base della forte riduzione delle emissioni di gas a effetto serra nell'UE nel 2009.



Tuttavia, gran parte di queste riduzioni è dovuta agli impatti della crisi economica che ha fortemente colpito i settori ad alta intensità energetica, quali la produzione di acciaio o cemento.

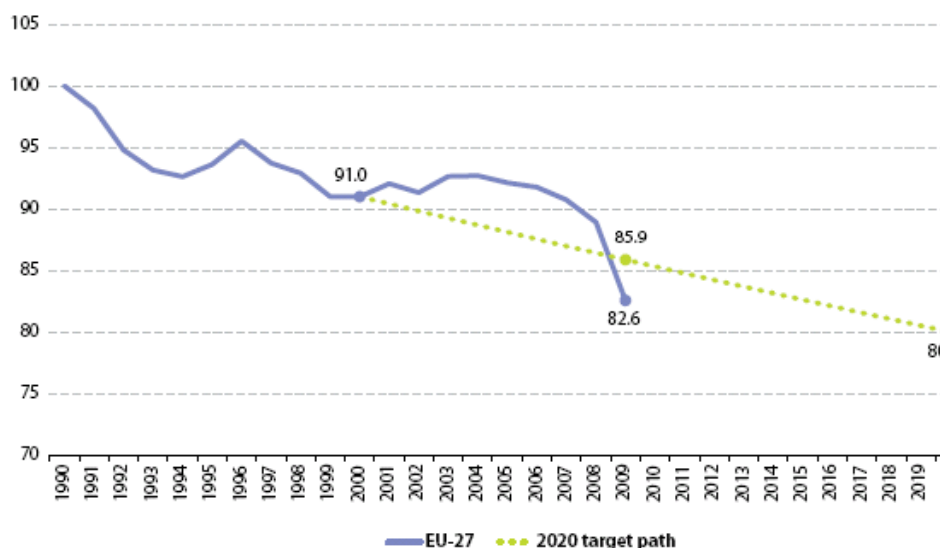


Figura 1: Emissioni di gas serra, UE-27 (indice 1990 = 100) - Source: European Environment Agency, Eurostat online data code (tsdcc100)

Nel 2009, tra i maggiori emettitori, Germania (quota del 20% del totale delle emissioni dell'UE-27), il Regno Unito (12%) e Francia (11%) hanno diminuito le proprie emissioni del 25%, 27% e 10% rispettivamente rispetto all' anno di riferimento, mentre Italia (11% del totale) le ha aumentate del 5%.

Tra il 1990 e il 2009, le emissioni di gas a effetto serra nell'UE-15 è diminuito del 12,7%, mettendo il gruppo sulla buona strada verso l'obiettivo di riduzione dell'8% per il periodo 2008-2012, indicato nel protocollo di Kyoto.

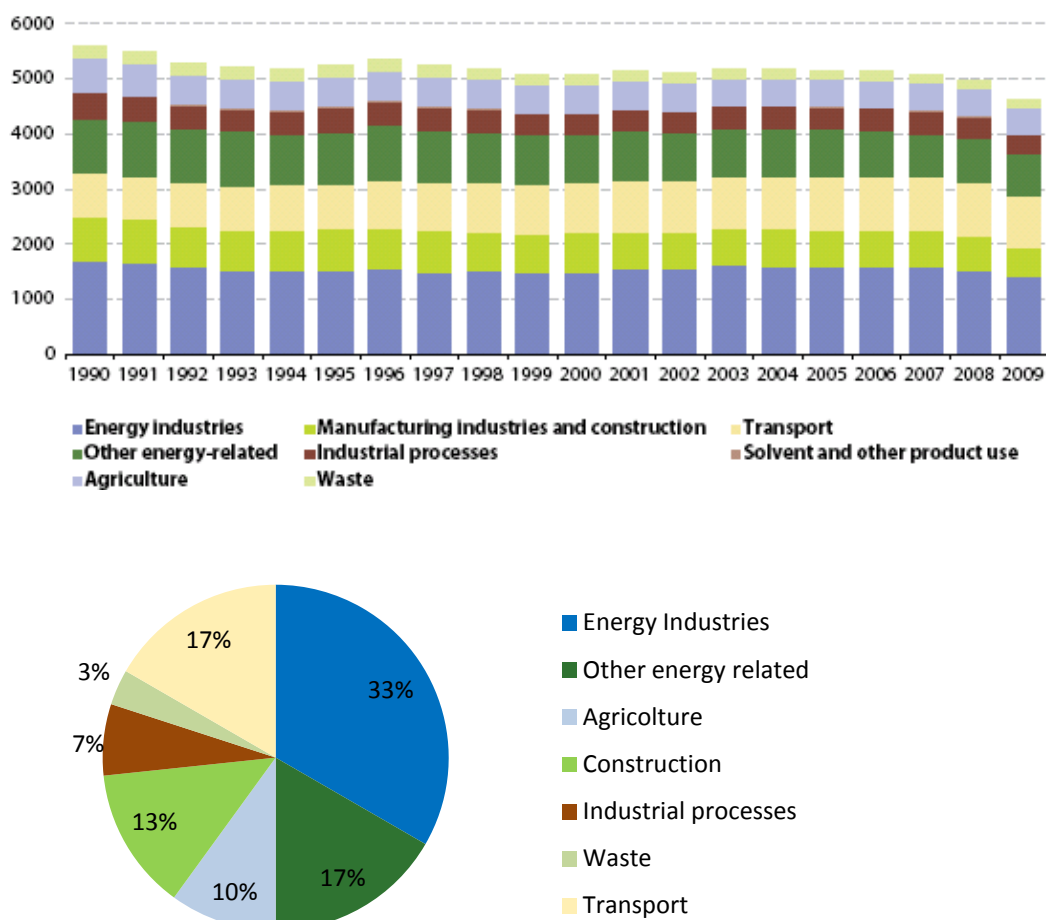


Figura 2: Emissioni di gas serra per settore, EU-27 (million tonnes CO<sub>2</sub> equivalent)- Source: European Environment Agency, Eurostat online data code (tsdcc210)

## 1.2 Cambiamenti climatici: gas serra e temperatura media globale

L'intensità di gas a effetto serra del consumo energetico dell'UE è costantemente diminuita tra il 2000 e il 2009, principalmente a causa del passaggio da combustibili solidi a gas e, in misura minore, alle energie rinnovabili. Tuttavia, la diminuzione media nel 2000 è stata comunque più lenta rispetto al 1990, quando l'intensità di emissione del consumo di energia è sceso ad un tasso medio annuo del 1,1%.

---

Per quanto riguarda invece la *temperatura media globale della superficie*, gli anni 2010, 2005 e 1998, sono stati classificati come i più caldi mai registrati. Per quanto riguarda i decenni invece, quello più caldo mai registrato è stato il 2001-2010, quando la temperatura media superficiale globale è stata di 0,46°C al di sopra della media 1961-1990.

Questo segue il trend di temperatura in cui i 2000 erano più caldi rispetto agli anni 1990, che erano più caldi rispetto agli anni 1980 e precedenti decenni.

Secondo la World Meteorological Organization (WMO), ‘i dati del 2010 confermano che la Terra è soggetta ad una significativa tendenza al riscaldamento a lungo termine’. Dall’inizio del 20° secolo, la temperatura superficiale globale media è aumentata di 0,74°C. Tuttavia, il tasso di aumento non è continuo, ma accelerato nella seconda metà del secolo.

L'aumento di temperatura è ineguale anche attraverso lo spazio. Il riscaldamento è molto più forte sulla terra che sopra l'oceano e, di conseguenza, l'aumento di temperatura è più alta nell'emisfero settentrionale (dove si trova la maggior parte della superficie della Terra), che per l'emisfero meridionale.

### **1.3 Politiche energetiche: Europa 2020**

Partendo dalle premesse sopra riportate è naturale comprendere l’inserimento della strategia Europa 2020 che intende concretizzare una crescita che è:

- sostenibile, grazie ad una mossa decisiva verso un'economia a basse emissioni di carbonio;
- intelligente, attraverso un più efficace investimento nell'istruzione, nella ricerca e nell'innovazione;

- 
- inclusiva, con una forte enfasi sulla creazione di posti di lavoro e riduzione della povertà.

La strategia è incentrata su cinque obiettivi ambiziosi in materia di occupazione, innovazione, istruzione, riduzione della povertà e clima/energia.

Ai fini del presente studio interessano solamente due voci ma sono riportate tutte per completezza nella definizione di Europa 2020.

Affinché la strategia Europa 2020 sia portata a termine, è stata istituita una governance delle politiche economiche per coordinare le azioni politiche tra l'UE e il livello nazionale.

## Obiettivi Europa 2020<sup>1</sup>

Obiettivi UE/Stati membri	Tasso di occupazione (in %)	R&S in % del PIL	Obiettivi di riduzione del tasso di CO <sub>2</sub> <sup>2</sup>	Energie rinnovabili	Efficienza - Riduzione del consumo di energia in Mtep	Abbandono scolastico in %	Istruzione terziaria in %	Riduzione della popolazione a rischio di povertà o esclusione sociale in numero di persone
Obiettivo principale dell'UE	75 %	3 %	-20 % (rispetto ai livelli del 1990)	20 %	20 % di aumento dell'efficienza energetica pari a 368 Mtep	10 %	40 %	20 000 000
Stima per l'UE <sup>3</sup>	73,70-74 %	2,65-2,72 %	-20 % (rispetto ai livelli del 1990)	20 %	206,9 Mtep	10,30-10,50 %	37,50-38,0 %	Il risultato non può essere calcolato a causa di differenze nelle metodologie nazionali
AT	77-78 %	3,76 %	-16 %	34 %	7,16	9,5 %	38 %	235 000
BE	73,2 %	3,0 %	-15 %	13 %	9,80	9,5 %	47 %	380 000
BG	76 %	1,5 %	20 %	16 %	3,20	11 %	36 %	260 000
CY	75-77 %	0,5 %	-5 %	13 %	0,46	10 %	46 %	27 000
CZ	75 %	1 % (settore pubblico e in generale)	9 %	13 %	n.d.	5,5 %	32 %	Mantenimento del numero di persone a rischio di povertà o esclusione sociale al livello del 2008 (15,3 % della popolazione totale) con l'impegno di ridurre di 30 000 unità
FR	75 %	3 %	-14 %	23 %	34,00	9,5 %	50 %	Riduzione del tasso di rischio di povertà di un terzo per il periodo 2007-2012 ovvero di 1 600 000 persone
HU	75 %	1,8 %	10 %	14,65 %	2,96	10 %	30,3 %	450 000
IE	69-71 %	appross. 2 % (2,5% PNL)	-20 %	16 %	2,75	8 %	60 %	186 000 entro il 2011
IT	67-69 %	1,53 %	-13 %	17 %	27,90	15-16 %	26-27 %	2 200 000
LT	72,8 %	1,9 %	15 %	23 %	1,14	<9%	40 %	170 000

<sup>1</sup> Secondo quanto stabilito dagli Stati membri nei Programmi nazionali di riforma dell'aprile 2011.

<sup>2</sup> Gli obiettivi nazionali in termini di riduzione delle emissioni definiti nella decisione 2009/406/CE (detta "decisione sulla condivisione dello sforzo") riguardano le emissioni non contemplate dal sistema di scambi di emissioni: queste ultime saranno ridotte del 21 % rispetto ai livelli del 2005. La riduzione complessiva di emissioni corrispondente sarà del 20 % rispetto ai livelli del 1990.

<sup>3</sup> Aggiunta degli obiettivi nazionali.

---

## 1.4 Lo stato dell'arte del settore delle costruzioni e gli obiettivi di sviluppo

Dal 1998 la produzione di costruzioni in Europa è aumentata in maniera piuttosto costante, ma con la crisi economica e finanziaria del 2007 la produzione ha cominciato a declinare drammaticamente. Entro 3 anni il livello di costruzione totale nell'UE-27 è sceso al livello che aveva raggiunto nel 1999 - 8 anni prima della crisi. Solo nel 2011 l'attività di costruzione si è stabilizzata e negli ultimi mesi è addirittura leggermente aumentata.

Lo sviluppo complessivo delle costruzioni è molto simile per l'UE-27 e la zona euro (EA-17). Tuttavia, vi sono alcune differenze notevoli tra lo sviluppo delle costruzioni di edifici (residenziali e non residenziali), che rappresenta circa il 78% della costruzione totale, e lo sviluppo della costruzione di opere di ingegneria civile (ferrovie, strade, ponti, piste aeroportuali, dighe) che rappresenta circa il 22% del totale delle costruzioni.

Come si può vedere bene dal grafico sotto riportato la crisi nel settore delle costruzioni ha colpito tutti i paesi dell'UE-27 sia pure in misura diversa.

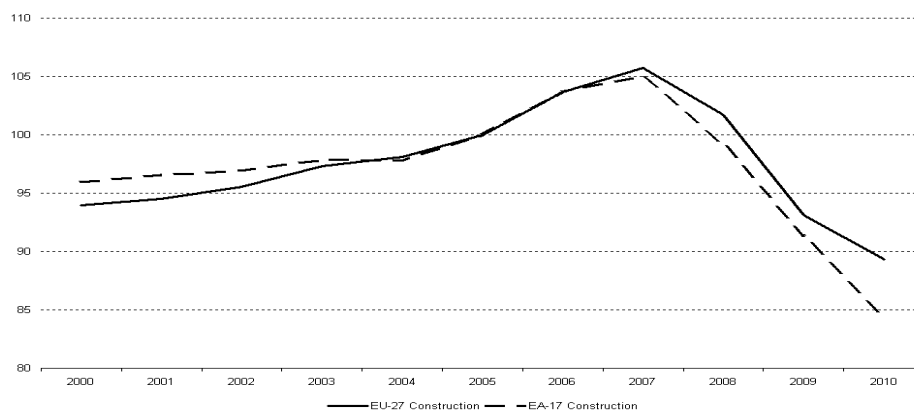


Figura 3: EU-27 & EA-17 Construction output, 2000-2010, annual data, 2005=100, Source: Eurostat (sts\_copr\_a)

Di seguito sono riportati gli indici di crescita nelle costruzioni dell'unione Europea e dettagliati per Paesi, dal 2005 al 2010.

	Index of production <sup>(1)</sup>					Construction costs index <sup>(2)</sup>				
	2005	2006	2007	2008	2009	2005	2006	2007	2008	2009
<b>EU-27</b>	1.7	3.6	2.2	-3.7	-8.9	3.9	4.7	4.4	3.3	-1.5
<b>Euro area (EA-16)</b>	1.9	3.7	1.3	-5.3	-8.2	3.4	4.7	4.2	3.9	0.1
Belgium	-3.4	3.3	2.3	-1.2	-6.7	2.9	4.9	4.5	2.5	-1.1
Bulgaria	31.9	24.1	27.7	26.5	-34.8	8.3	5.6	7.7	12.3	10.9
Czech Republic	5.4	6.4	7.0	-0.5	-0.4	3.8	2.1	4.8	3.5	-0.3
Denmark	3.0	4.3	3.4	-5.5	-16.8	2.4	4.7	6.4	2.9	-0.4
Germany	-5.3	6.3	2.9	-0.7	0.1	1.7	2.4	3.3	3.2	0.1
Estonia	22.4	26.9	13.5	-13.3	-28.4	6.2	10.5	12.7	3.5	-8.5
Ireland	9.9	2.9	-13.2	-29.6	-36.4	8.7	9.6	1.7	-7.7	-9.9
Greece	-38.7	3.6	14.3	7.7	-20.4	3.4	4.3	4.6	5.1	-0.3
Spain	10.1	2.2	-4.3	-16.3	-11.0	4.6	6.9	5.0	4.7	1.0
France	2.8	4.2	2.4	-3.7	-5.9	2.3	5.3	4.6	5.5	0.4
<b>Italy</b>	<b>1.2</b>	<b>3.9</b>	<b>6.5</b>	<b>-0.3</b>	<b>-11.5</b>	<b>4.0</b>	<b>2.8</b>	<b>3.7</b>	<b>3.8</b>	<b>:</b>
Cyprus	2.9	4.1	6.8	2.3	-10.7	4.5	5.0	5.0	8.0	0.8
Latvia	15.5	13.3	13.6	-3.1	-34.9	11.8	19.5	31.6	15.6	-6.2
Lithuania	9.9	21.7	22.2	4.1	-48.5	8.3	10.7	16.1	9.5	-14.5
Luxembourg	-0.9	2.5	2.6	-1.9	1.0	3.0	2.9	2.9	3.2	1.4
Hungary	15.7	-0.7	-14.0	-5.2	-4.4	3.3	6.2	7.2	7.5	3.0
Malta	4.3	8.3	1.8	2.3	-2.0	:	:	:	:	:
Netherlands	3.4	2.6	6.3	3.7	-5.9	1.4	3.2	4.0	4.3	0.3
Austria	4.9	5.9	3.9	-0.9	-1.9	2.1	4.6	4.5	5.2	0.6
Poland	9.4	15.5	16.3	10.1	4.5	3.0	1.5	6.7	6.8	0.2
Portugal	-4.5	-6.3	-4.0	-1.2	-6.6	2.0	3.0	3.4	5.2	-0.7
Romania	6.5	15.6	33.1	26.7	-15.2	14.3	11.1	10.2	16.2	1.5
Slovenia	2.0	15.7	18.5	15.5	-20.9	4.5	6.5	6.3	6.4	-2.8
Slovakia	14.5	15.7	5.3	11.6	-11.2	4.9	4.0	4.1	5.8	2.1
Finland	5.2	7.8	10.2	4.1	-13.0	3.4	3.8	5.9	3.9	-1.1
Sweden	3.0	8.0	6.2	4.2	-3.5	3.9	5.1	6.1	4.9	2.0
United Kingdom	-0.5	1.4	2.3	-1.3	-11.6	5.4	4.6	4.2	0.2	-7.5
Norway	9.1	6.1	5.7	2.7	-0.3	3.4	3.8	7.4	5.7	2.3
Switzerland	3.4	3.6	0.5	0.5	2.1	:	:	:	:	:
Croatia	-0.4	9.5	2.8	12.0	-7.0	:	:	:	:	:
Turkey	:	18.4	5.5	-7.6	-16.3	9.9	16.0	8.4	13.6	-4.3

<sup>(1)</sup> Working day adjusted.

<sup>(2)</sup> Gross series for new residential buildings.

Source: Eurostat (sts\_coprgr\_a and sts\_copigr\_a)

---

Da tutto ciò se ne evince l'urgenza di un'attenzione particolare anche a questo settore che, sebbene non sia il primo responsabile del problema ambientale, ne costituisce comunque una fetta importante.

Non a caso infatti sono state definiti obiettivi ben precisi per il breve termine per lo stato italiano:

- il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione dovranno essere a energia quasi zero.
- il 31 dicembre 2018 è il termine anticipato per edifici in uso e di proprietà di enti pubblici.



---

## **Capitolo 2 - Valutazione della sostenibilità edilizia: il sistema LEED®**

I cambiamenti climatici e l'alto livello di inquinamento rendono necessario, ormai a livello mondiale, l'adozione di soluzioni che favoriscano una crescita sostenibile. Il settore dell'edilizia produce circa il 40% delle emissioni di CO<sub>2</sub> a livello europeo. Al fine di ridurre le emissioni in atmosfera del 10% rispetto ai livelli del 2005 entro il 2020, l'Unione Europea ha riservato particolare importanza al miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici esistenti. A questo proposito è stata introdotta la certificazione energetica attraverso la direttiva europea 2002/91/CE, recepita dall'Italia con il D.Lgs. 192/05.

Lo scopo della certificazione energetica è quello di informare con chiarezza il futuro acquirente di un immobile sui consumi energetici dell'edificio che va ad acquistare.

A livello nazionale devono essere dotati di attestato di certificazione gli edifici di nuova costruzione, gli edifici di grandi dimensioni, se totalmente ristrutturati, e gli immobili venduti o affittati.

L'attestato di certificazione energetica deve contenere l'indicazione della quantità di energia necessaria per climatizzare l'immobile in estate e in inverno, per ventilarlo, illuminarlo e produrre acqua calda. Inoltre l'attestato deve contenere anche l'indicazione dei valori limite previsti dalla legge e una serie di raccomandazioni su come possano essere ridotti i fabbisogni energetici.

Parallelamente nascono strumenti di certificazione volontaria che consentono ad ogni progettista, architetto, ingegnere, pubblica amministrazione di promuovere i principi della progettazione sostenibile. Tra questi riveste una particolare importanza la certificazione LEED.

---

## **2.1 La certificazione LEED e il ruolo di GBC Italia**

La certificazione LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) è stata sviluppata ed introdotta negli Stati Uniti nel 1999 dall'US Green Building Council, organizzazione no-profit formata dai rappresentanti del settore dell'edilizia, della ricerca e degli enti governativi nordamericani, con lo scopo di fornire a tutti gli operatori del settore uno strumento utile per la certificazione della sostenibilità edilizia. Attualmente vede certificati oltre 137 mila edifici, per un totale di oltre 9 miliardi di mq certificati, mentre ogni giorno si certificano oltre 1.6 milioni di mq complessivi.

Oggi i Green Building Council sono presenti in più di 80 paesi al mondo, tra cui anche l'Italia.

GBC Italia viene costituito il 28 gennaio 2008, su iniziativa del Distretto Tecnologico Trentino S.c.a.r.l. insieme a 47 soci fondatori, allo scopo di favorire una cultura dell'edilizia sostenibile nell'opinione pubblica e di fornire informazioni chiare agli operatori del settore, sull'esempio dell'US Green Building Council.

GBC Italia può vantare in questo quadro alcuni risultati di tutto rilievo: esso infatti ha adattato alla realtà e alle normative italiane ed europee il sistema di rating LEED® per le nuove costruzioni, e tale lavoro ha ricevuto il riconoscimento ufficiale di USGBC (detentore del know-how del brand LEED).

LEED è uno standard volontario, che tuttavia viene sempre di più scelto da operatori privati o grandi progetti (come le Olimpiadi).

Il suo scopo è fornire al mercato edilizio una classificazione condivisa basata su un linguaggio comune e facilmente comprensibile anche ai non addetti ai lavori, paragonabile alle etichette informative dei prodotti alimentari.

---

## **2.2 LEED AP, professionista accreditato**

Il LEED AP è un professionista accreditato LEED, una figura esperta del sistema di certificazione LEED che è in grado di accompagnare, nei vari step progettuali, tutto l'iter di certificazione fornendo supporto e suggerimenti al team di progetto.

Col rapido espandersi anche sul territorio italiano dei progetti in fase di certificazione LEED, questa figura viene sempre più richiesta ed il loro numero anche in Italia è in rapido aumento. Per diventare LEED AP è necessario sostenere un esame che consiste in 80 domande, la scala di punteggio va da 125 a 200 e la soglia minima per il superamento dell'esame è di 170 punti ottenuti. Ci sono varie versioni dell'esame che corrispondono alle varie versioni della certificazione LEED.

Al momento attivi sono il LEED AP O+M (Operation & Maintenance) e il LEED AP HOME (specifico per il settore abitativo ad alte performance). Verranno attivati invece entro fine 2012 il LEED AP BD+C (Building Design & Construction), che va a sostituire l'esame LEED AP NC (New Construction) e che riguarda tutta la sfera di progettazione dei nuovi edifici ad alte performance, e il LEED AP ID+C (Interior Design & Construction) che sarà un esame specifico per la preparazione di professionisti in grado di gestire la fase di progettazione e costruzione di interni commerciali e produttivi con standard ad elevate performance. Nel 2013 è prevista inoltre l'attivazione dell'esame LEED AP ND (Neighborhood Development), figura specializzata nella progettazione del territorio urbano in una sua visione globale.

La figura del LEED AP non necessariamente viene direttamente coinvolta nel processo progettuale, essa tuttavia, se presente, facilita il conseguimento della certificazione e apporta un bonus di punteggio, altrimenti non ottenibile.

---

## 2.3 I protocolli LEED

A seconda della tipologia edilizia dell'edificio al quale si andrà ad applicare la certificazione, si dovrà scegliere la versione corrispondente del sistema di rating LEED. Lo stesso sistema si articola infatti in diversi protocolli, ognuno pensato per l'oggetto specifico dell'analisi; non cambiano i livelli di certificazione ottenibili, mentre può variare il sistema di punteggio. Si riportano di seguito i protocolli sviluppati ad oggi:

- *LEED for New Construction*, che riguarda la realizzazione di edifici di nuova costruzione commerciali o istituzionali ad alte prestazioni, dalla fase progettuale alla messa in opera, e ristrutturazioni rilevanti delle strutture esistenti;
- *LEED for Existing Buildings*, che fornisce dei criteri di sostenibilità per la certificazione di edifici già esistenti;
- *LEED for Schools*, che si occupa nello specifico di edifici scolastici e ne indirizza la progettazione degli spazi;
- *LEED for Commercial Interiors*, che si occupa della certificazione di interni commerciali indirizzandone la progettazione degli spazi e l'allestimento;
- *LEED for Homes*, rivolto agli edifici abitativi di piccole dimensioni;
- *LEED for Neighborhood Development*, indirizzato alla certificazione di aree residenziali e quartieri, fornendo supporto per una progettazione urbanistica sostenibile.

Per l'analisi dell'edificio oggetto di questa tesi si utilizza il protocollo LEED 2009 Italia per Nuove Costruzioni e Ristrutturazioni, che è la trasposizione ed adattamento alla realtà italiana del corrispettivo protocollo americano *LEED for New Construction*.

---

## 2.4 Categorie, prerequisiti e crediti del sistema di valutazione LEED

La certificazione LEED prevede l'attribuzione di un punteggio all'edificio riconosciuto sulla base della verificata conformità dello stesso a tutta una serie di pre-requisiti e crediti fissati. I *pre-requisiti* ed i *crediti* da soddisfare per l'ottenimento del punteggio LEED complessivo sono articolati in sette categorie: Sostenibilità del Sito (SS), Gestione delle Acque (GA), Energia ed Atmosfera (EA), Materiali e Risorse (MR), Qualità ambientale Interna (QI), Innovazione nella Progettazione (IP) e Priorità Regionale (PR).

Per ogni area sono indicati dei pre-requisiti obbligatori che devono essere soddisfatti per poter concorrere al raggiungimento del punteggio nei vari crediti. Il non raggiungimento anche di uno solo dei pre-requisiti inficia la bontà dei relativi crediti, che, pur potenzialmente raggiungibili, non possono però essere conteggiati.

Una volta soddisfatti i prerequisiti si valuta il punteggio ottenibile per ciascun credito; il totale di questi punteggi darà il punteggio LEED complessivo dell'edificio.

Le categorie, nella loro globalità, riescono a toccare ogni aspetto del costruire garantendo così un controllo accurato in ogni fase progettuale, dal concept iniziale fino alla messa in opera.

Si riporta una descrizione più dettagliata, categoria per categoria, del sistema dei crediti LEED:

- *Sostenibilità del Sito (SS)*: la manutenzione e il mantenimento delle infrastrutture dell'area di un edificio sono una componente essenziale per una gestione completa e sostenibile. Inoltre l'impatto del costruito sull'ambiente circostante può avere effetti devastanti sull'ecosistema dell'area; proprio per questo i crediti SS vertono sul controllo delle acque, sui sistemi di irrigazione, sul riuso delle acque piovane, sull'adozione di fertilizzanti e pesticidi non tossici, sulla

---

regolamentazione dell'intensità luminosa generata in modo da non creare inquinamento luminoso, sulla diminuzione delle isole di calore, sull'incentivo all'uso di veicoli o carburanti ecologici, ecc.

- *Gestione delle Acque (GA)*: la richiesta di forniture d'acqua pro capite nei paesi industrializzati è in continuo aumento, questo non solo ha effetti dannosi sull'ambiente, ma dal punto di vista economico si ripercuote sui costi di gestione e manutenzione dell'edificio. Questa serie di crediti si pone quindi l'obiettivo di limitare gli sprechi di acqua potabile, premiando un suo uso più razionale, incentivando sistemi di conservazione e riuso, sollecitando l'inserimento nei progetti di impianti chimici per il trattamento e l'uso delle cosiddette "acque grigie" da destinarsi agli scarichi sanitari, ecc.  
Tutto questo sistema di accorgimenti, ad esempio per edifici direzionali adibiti ad uffici, può ridurre il consumo di acqua potabile mediamente del 30% con conseguenti benefici sui costi di gestione della struttura.
- *Energia ed Atmosfera (EA)*: gran parte dell'energia elettrica prodotta serve per riscaldare, raffreddare, illuminare, alimentare apparecchiature elettriche di edifici commerciali. Tutta questa richiesta di energia ha un'incidenza notevole da una parte sui costi di gestione dell'edificio, dall'altra sull'ambiente da cui questa energia viene prodotta. Bruciare combustibili fossili per creare energia ad esempio ha una ripercussione nociva sull'ecosistema generando inquinamento dell'aria, delle acque e un degrado generale della qualità ecologica dell'ambiente. L'intento dei crediti dedicati a quest'area è quello, da una parte, di abbattere i costi energetici dell'edificio attraverso un' oculata gestione delle risorse (aumentare l'efficienza degli impianti, diminuire gli sprechi, incentivare l'uso di "energia verde", disincentivare l'uso di risorse inquinanti, ecc.) e

---

dall'altra di ridurre l'impatto ambientale che l'edificio ha sull'ambiente.

- *Materiali e Risorse (MR)*: un edificio genera una quantità enorme di rifiuti e scarti, durante tutta la sua vita, a partire dalla sua costruzione fino alla sua demolizione e smaltimento. I crediti di quest'area indirizzano da una parte ad una politica di acquisti che miri a ridurre l'impatto ambientale (acquisti di beni derivati da materiali riciclati, prodotti nelle vicinanze del sito, assemblati con materiali locali o biodegradabili e non tossici, ecc.) e dall'altra ad una politica di gestione dei rifiuti che miri a ridurre la produzione e ad incentivarne il riciclo attraverso uno smaltimento "ecologico", distraendo quanto più materiale possibile dagli inceneritori. Riassumendo quindi la strategia del credito si muove in 2 direzioni: la riduzione della produzione di rifiuti e il riciclo dei materiali.
- *Qualità ambientale Interna (QI)*: nei paesi industrializzati le persone passano in media l'85-90% della loro vita all'interno di edifici o abitazioni. Quindi la qualità di questi ambienti interni influisce in maniera significativa sul grado di benessere della loro vita e sulla loro produttività. Per garantire un'adeguata qualità degli ambienti interni, il credito invita ad agire sul controllo della qualità dell'aria, sull'ottimizzazione della ventilazione, sul controllo dei contaminanti e delle muffe, sulla verifica e manutenzione periodica degli impianti, sull'uso di un sistema di sensori in grado di regolare autonomamente e in qualsiasi momento la miscela di aria entrante (con la rilevazione in tempo reale dell'umidità, della temperatura, del livello di CO<sub>2</sub>, ecc.), sul comfort acustico, sull'illuminazione, sull'accesso a finestre o aperture, ecc.
- *Innovazione nella Progettazione (IP)*: le strategie per l'accrescimento della sostenibilità degli edifici sono in costante e

---

continua evoluzione; grazie alla ricerca scientifica nuove tecnologie sono frequentemente immesse sul mercato e vanno ad influire sulla progettazione, la costruzione e la funzionalità degli edifici. Questa serie di crediti è studiata quindi per garantire che l'edificio finale sia quanto più possibile dotato di accorgimenti e tecnologie atte a garantire un'alta efficienza e sostenibilità della struttura in accordo con tutti i crediti delle aree precedentemente descritte.

- *Priorità Regionale (PR)*: con l'obiettivo di incentivare i gruppi di progettazione a focalizzare l'attenzione su caratteristiche ambientali del tutto uniche e peculiari della località in cui è situato il progetto.

Per garantire tutti questi requisiti è necessaria una progettazione integrata ed inoltre che, già dalle primissime fasi progettuali, si costituisca un pool di tecnici con competenze specifiche differenziate che si possa interfacciare: questo porta a selezionare le soluzioni tecnico architettoniche in linea con lo scopo ultimo che è sempre la soddisfazione e il comfort del cliente.

La flessibilità del sistema di rating rende possibile da parte del costruttore di decidere verso quale fascia di certificazione indirizzarsi e su quali aspetti puntare per incrementare il punteggio.



## 2.5 Il sistema di punteggio

Il punteggio LEED ottenibile da un edificio viene calcolato come somma dei punteggi parziali raggiunti in ciascuna delle categorie sopra riportate. Questi punteggi possono variare da protocollo a protocollo: di seguito è riportata la tabella riassuntiva per il *LEED 2009 Italia per Nuove Costruzioni e Ristrutturazioni*, utilizzato per il presente lavoro.

Aree	Punteggio massimo
Sostenibilità del Sito (SS)	26
Gestione delle Acque (GA)	10
Energia e Atmosfera (EA)	35
Materiali e Risorse (MR)	14
Qualità ambientale Interna (QI)	15
Innovazione nella Progettazione (IP)	6
Priorità regionale (PR)	4
<b>Punteggio massimo conseguibile</b>	<b>110</b>

Il punteggio conseguito va a definire il livello di certificazione LEED raggiunto, che può variare da Base, il minimo conseguibile, a Platino, come riportato nella tabella successiva.



Livello di certificazione	Punteggio
Base	40 - 49
Argento	50 - 59
Oro	60 - 79
Platino	80 o più

La

---

certificazione LEED viene rilasciata dal *Green Building Council* previa presentazione della domanda e relativa documentazione che attesti il superamento dei vari crediti. Tale documentazione viene vagliata e, se regolare, comporta il rilascio della certificazione e del suo corrispettivo grado di qualità.

## **2.6 Vantaggi di un edificio certificato LEED**

I benefici per chi acquista un'abitazione progettata secondo gli standard LEED sono molteplici: innanzitutto occorre considerare che un immobile certificato LEED presenta spazi più sani dove vivere o lavorare, i quali contribuiscono a una maggiore produttività, salute, comfort e sicurezza per i suoi occupanti. Ad esempio, la luce naturale incrementa la produttività, nelle scuole il rendimento degli studenti aumenta in media dal 7% al 18% , negli uffici si riduce l'assenteismo e l'assenza per malattia, viene incrementata la concentrazione e quindi la produttività. La qualità dell'aria è migliore rispetto agli edifici standard, caratteristica particolarmente apprezzata da chi soffre di allergie e problemi respiratori. Inoltre, da un lato si riducono sostanzialmente i consumi d'acqua e l'accumulo di rifiuti non riciclabili e, dall'altro, i costi operativi e di manutenzione sono decisamente inferiori.

Infine dal punto di vista economico un edificio ad alte prestazioni viene venduto molto più velocemente di un edificio tradizionale e rimane occupato molto a lungo.

---

## Capitolo 3 - Calcolo dinamico

La simulazione numerica delle prestazioni degli edifici (building performance simulation) è una disciplina che, nata negli anni '80 nelle sedi accademiche, ha avuto nell'ultimo decennio importanti sviluppi. Disponendo di un programma di simulazione termo energetica è oggi possibile valutare gli effetti dell'orientamento dell'edificio e/o della distribuzione delle sue masse termiche, i vantaggi ottenibili adottando involucri edilizi a prestazioni variabili in termini di isolamento termico e di schermatura solare, gli esiti dell'installazione di un impianto a tutt'aria piuttosto che di un impianto misto con aria primaria e pannelli radianti, le prestazioni di sistemi energetici alimentati da fonti energetiche rinnovabili, ecc.

Con un programma di questo tipo si riescono ad ottimizzare le prestazioni del sistema edificio-impianti valutando oggettivamente l'impatto di ogni singola scelta attraverso un processo iterativo; ciò può essere fatto già nelle fasi preliminari della progettazione, quando si fanno le scelte che avranno maggiore ricaduta sulle prestazioni dell'edificio e sui costi di investimento e di esercizio. In particolare il progettista deve poter prevedere il comportamento del sistema edificio-impianti al variare delle condizioni al contorno quali il clima, la disponibilità e il costo delle fonti energetiche, il comportamento degli occupanti, le modalità di gestione degli impianti.

L'obiettivo del calcolo dinamico è quello di studiare il reale comportamento termo-energetico di un edificio, andando a determinare il fabbisogno di energia dell'edificio mediante metodi dettagliati di simulazione con step temporali riferiti all'ora, a differenza del calcolo stazionario che esegue una media annuale/mensile. Le valutazioni possono riguardare riscaldamento, raffrescamento, deumidificazione, illuminazione e tutte le attività e consumi attinenti all'edificio, con lo scopo di ottimizzare le operazioni degli impianti e apparecchiature basate sulla richiesta degli occupanti reali.

---

Il calcolo dinamico riesce a simulare il comportamento reale dell'edificio molto meglio del calcolo stazionario, comunemente utilizzato per la certificazione energetica. Tuttavia negli edifici il confronto tra il consumo energetico reale e quello calcolato non è mai scontato, data la presenza di innumerevoli variabili che rendono complessa la valutazione. Queste variabili dipendono dalla geometria dell'edificio e materiali, dal clima locale e variazioni stagionali, dalle abitudini degli utenti, dal consumo di acqua calda, dall'uso di illuminazione, e così via, tutte variabili difficilmente comparabili e standardizzabili.

### **3.1 Il ruolo del calcolo dinamico nella certificazione LEED**

#### **3.1.1 la categoria Energia e Atmosfera (EA)**

I Prerequisiti e i Crediti della sezione Energia e Atmosfera (EA) promuovono il controllo delle prestazioni energetiche degli edifici in tre fasi: progettazione, commissioning e monitoraggio.

Di seguito è riportato solo il credito oggetto del presente studio, il credito 1. Tutta la sezione infatti è composta da tre Prerequisiti: Commissioning di Base dei Sistemi Energetici dell'Edificio, Prestazioni Energetiche Minime e Gestione di Base dei Fluidi Refrigeranti; e da cinque Crediti: Ottimizzazione delle Prestazioni Energetiche, Produzione in sito di Energie Rinnovabili, Gestione Avanzata dei Fluidi Refrigeranti e Misure e Collaudi.

---

*EA CREDITO 1: Ottimizzazione delle Prestazioni Energetiche*

Il range di punti ottenibili in questo credito va da 1 punto a 19 punti: è l'unico credito ad avere un punteggio massimo così elevato. In media gli altri crediti variano tra i 2 e 5 punti.

Col presente credito si vogliono raggiungere livelli crescenti di prestazioni energetiche per gli edifici e gli impianti proposti, superiori ai valori minimi richiesti dalla normativa, al fine di ridurre gli impianti economico-ambientali associati all'uso eccessivo di energia.

Col raggiungimento di tale credito si soddisfa automaticamente EA Prerequisito 2.

Vi sono due opzioni distinte per il conseguimento del credito, ma il punteggio ottenibile è diverso.

*Opzione 1: Procedura semplificata per la determinazione della prestazione energetica dell'edificio (1-3 punti)*

Al fine del presente calcolo, intende per prestazione energetica dell'edificio, la somma dei fabbisogni di energia primaria per la climatizzazione invernale ed estiva, per la produzione di acqua calda sanitaria, per l'alimentazione degli impianti di illuminazione, e per l'alimentazione di processo.

Di seguito sono riportate le soglie di punteggio con le relative percentuali minime di energia risparmiata:

---

EDIFICIO NUOVO	EDIFICIO ESISTENTE	PUNTI
10%	5%	Prerequisito
15%	10%	1
20%	15%	2
≥25%	≥20%	3

*Opzione 2: Simulazione energetica in regime dinamico dell'intero edificio (1-19 punti)*

È chiesto di dimostrare un miglioramento percentuale dell'indice di prestazione energetica dell'edificio di progetto rispetto alla stima dei consumi di energia primaria del corrispondente edificio di riferimento, ovvero quello imposto da LEED attraverso il Building Performance Rating Method dell'Appendice G dell'ASHRAE 90.1-2007 con alcune modifiche per l'adattamento alla realtà italiana.

---

EDIFICIO NUOVO	EDIFICIO ESISTENTE	PUNTI
10%	5%	Prerequisito
12%	8%	1
14%	10%	2
16%	12%	3
18%	14%	4
20%	16%	5
22%	18%	6
24%	20%	7
26%	22%	8
28%	24%	9
30%	26%	10
32%	28%	11
34%	30%	12
36%	32%	13
38%	34%	14
40%	36%	15
42%	38%	16
44%	40%	17
46%	42%	18
48%	44%	19

---

Come si può notare quindi, per valutare le prestazioni energetiche dell'edificio, sono proposte due vie: sia quella che prevede il calcolo stazionario, conseguendo al massimo 3 punti, sia quella del dinamico, nel quale si possono acquisire fino a 19 punti.

Ai fini della rispondenza di EA Credito 1 è necessario seguire la procedura descritta all'interno della norma ANSI/ASHRAE 90.1-2007 Appendice G: Performance Rating Method. L'applicazione di questo metodo ai fini del sistema di certificazione LEED non si sostituisce in alcun modo alle richieste poste dalla legge nazionale in materia di prestazione energetica degli edifici. Per tale ragione rimangono validi i riferimenti alle metodologie di calcolo in regime quasi stazionario contenute all'interno del pacchetto di norme UNI TS 11300:2008 ai fini delle valutazioni di carattere legislativo ed autorizzativo ma non per il conseguimento del credito in oggetto.

È stato quindi effettuato anche il calcolo stazionario per poter verificare l'edificio con la norma vigente italiana.



---

## **3.2 Standard di riferimento**

Come già accennato in precedenza la valutazione delle prestazioni energetiche dell'edificio attraverso un calcolo dinamico guidato dallo standard LEED richiede il rispetto di più norme, sia nazionali (in questo caso quindi italiane), sia americane.

Si riportano di seguito le norme che disciplinano la materia.

### **3.2.1 UNI/TS 11300-1 e 2**

È utilizzata ai fini del conseguimento del credito secondo l'Opzione 1, per la quale questa norma è valevole se si considera il calcolo in condizioni standard.

La UNI/TS 11300-1:2008 “Prestazione energetiche degli edifici – Determinazione del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione estiva ed invernale” definisce le modalità per l'applicazione nazionale della UNI EN ISO 13790:2008 con riferimento, per il calcolo dei fabbisogni di energia termica per riscaldamento e raffrescamento, al metodo mensile.

La UNI/TS 11300-2:2008 “Prestazione energetiche degli edifici – Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria” invece fornisce dati e metodi per la determinazione del fabbisogno di energia utile per acqua calda sanitaria, dei rendimenti e dei fabbisogni di energia elettrica degli ausiliari dei sistemi di riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria e dei fabbisogni di energia primaria per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.

---

### 3.2.2 ANSI/ASHRAE Standard 90.1-2007

Lo standard ANSI/ASHRAE 90.1-2007 è stato formulato dalla ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), con un processo di accreditamento dell'ANSI. Essa stabilisce requisiti minimi per la progettazione di edifici energeticamente efficienti (Energy Standard for Buildings except Low-Rise Residential Buildings), con l'eccezione di edifici monofamiliari e multifamiliari con meno di quattro piani abitabili fuori terra, agli edifici prefabbricati (mobili e modulari), agli edifici che non usano né elettricità né combustibili fossili, o alle apparecchiature o a parti dell'edificio che utilizzano l'energia principalmente per processi industriali, manifatturieri o commerciali.

I progetti che seguono l'Opzione 2 di EA Prerequisito 2 e di EA Credito 1 necessitano della documentazione comprovante la percentuale di energia risparmiata determinata con l'appendice G della ASHRAE 90.1-2007 (Performance Rating Method). L'appendice G costituisce un documento informativo da utilizzarsi per valutare l'efficienza energetica degli edifici progettati. Le procedure descritte in questa appendice non vanno considerate come una parte ulteriore dei requisiti minimi richiesti per il soddisfacimento della norma ma, al contrario, possono essere utilizzate per “quantificare le prestazioni che superano sostanzialmente i requisiti dello Standard 90.1”(G1.1).

Il *Performance Rating Method* è uno strumento atto a dimostrare l'incremento di prestazione rispetto all'ASHRAE/IESNA 90.1-2007 attraverso un modello interattivo che permetta la comparazione dei consumi di energia primaria del progetto proposto rispetto a quelli del progetto di riferimento. Per esigenze di modellazione, il metodo impone una serie di vincoli sul processo di modellazione, quali ad esempio l'utilizzo di dati climatici semplificati e il fatto di includere l'impianto meccanico e i carichi di processo sia nel progetto proposto che in quello di riferimento.

Di seguito è stato riportato uno stralcio della tabella che riassume i requisiti e linee guida della modellazione energetica imposta da LEED (si veda il paragrafo 7.1), estrapolati dall'Appendice G della ASHRAE 90.1-2007, per progetti standard. Tale tabella è la trasposizione italiana di quella che si trova nel manuale americano.

EDIFICIO DI RIFERIMENTO	EDIFICIO DI PROGETTO
<b>Profili di utilizzo</b>	
<p>Uguali a quelli di progetto            Eccezione: I profili di utilizzo possono essere diversi da quelli di progetto nel caso in cui l'edificio di progetto preveda misure di efficienza non standard</p>	<p>Utilizzare i profili di funzionamento realmente previsti nell'edificio di progetto.            Eccezione: i profili di utilizzo possono essere modificati nel caso in cui sia necessario per modellare misure di efficienza non standard come il controllo delle luci, la ventilazione naturale, il controllo della domanda di ventilazione, oppure la riduzione dei carichi per la produzione di acqua calda sanitaria (tabella G3.1.4).            Gli orari di funzionamento diversi fra il modello dell'edificio proposto e quello di riferimento devono essere chiaramente descritti.</p>
<b>Orientazione</b>	
<p>Sono necessarie 4 simulazioni dell'edificio di riferimento per calcolarne le prestazioni.            I quattro modelli delle simulazioni dell'edificio di riferimento sono identici eccetto che per l'orientazione dell'edificio, che varia per ciascun modello come descritto nella tabella G3.5.1(a), e per i valori di SHGC (Solar Heat Gain Coefficient = Coefficiente degli apporti solari guadagnati) che sono rivisti, al fine di rispecchiare i requisiti minimi ASHRAE per l'orientazione dell'edificio considerata.            Per i valori minimi di SHGC (Solar Heat Gain Coefficient) si fa riferimento ai limiti fissati dalla norma ASHRAE 90.1-2007 in funzione della zona climatica americana. Le zone climatiche definite secondo la norma ASHRAE 90.1-2007 per alcune città internazionali possono essere determinate dalla tabella B-3 dello Std. 90.1-2007. Per il calcolo delle zone climatiche corrispondenti alle città italiane, in alternativa al metodo d'assegnazione proposto nell'appendice B della ASHRAE 90.1-2007, si può assumere:            Nord Italia: (Piemonte, Valle d'Aosta, Lombardia, Liguria, Veneto, Trentino Alto Adige, Friuli Venezia Giulia) → Zona 4A;            Centro – Sud: (Emilia Romagna, Toscana, Marche, Molise, Umbria, Abruzzo, Lazio, Campania, Basilicata, Puglia, Calabria, Sicilia, Sardegna) → Zona 3A. (nota: la norma ASHRAE 90.1 assegnerebbe tutte le città Italiane alla zona 4, tuttavia, utilizzando, a favore di sicurezza, il riferimento delle zone americane solo per quanto riguarda i limiti estivi (SHGC), si utilizza la classe 3 per il centro e sud Italia)</p>	<p>Modellare l'edificio proposto così come è stato progettato (con qualche piccola eccezione).</p>

---

### 3.2.3 UNI EN ISO 13790:2008

La norma UNI EN ISO 13790:2008, “Prestazione energetica degli edifici – Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento”, fornisce metodi di calcolo per la valutazione del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti di edifici residenziali e non, o di una parte degli stessi. Si riportano di seguito stralci della suddetta.

Il presente metodo comprende il calcolo delle seguenti grandezze:

- a) lo scambio termico per trasmissione e ventilazione della zona dell'edificio quando è riscaldata o raffrescata ad una temperatura interna costante;
- b) il contributo degli apporti termici interni e solari al bilancio termico dell'edificio;
- c) i fabbisogni annuali di energia termica per il riscaldamento e il raffrescamento, al fine di mantenere le temperature di regolazione specificate all'interno dell'edificio - non si include il calore latente;
- d) il fabbisogno annuale di energia per il riscaldamento e il raffrescamento dell'edificio, utilizzando come dati di ingresso quelli ricavabili dalle norme impiantistiche pertinenti (...).

[...]

## 5 DESCRIZIONE DEI PROCEDIMENTI DI CALCOLO

### 5.1 Bilancio di energia dell'edificio e degli impianti

#### 5.1.1 Introduzione

A seconda della situazione, l'edificio è suddiviso in molteplici zone oppure considerato come una singola zona.

Il bilancio di energia termica è scorporato nel bilancio termico o di energia a livello dell'edificio e nel bilancio di energia a livello dell'impianto.

I fabbisogni di energia termica dell'edificio per il riscaldamento e il raffrescamento sensibili dell'edificio sono calcolati sulla base del bilancio termico della(e) zona(e) dell'edificio.

Questi fabbisogni di energia termica per il riscaldamento e il raffrescamento sono i dati di ingresso nel bilancio energetico degli impianti di riscaldamento e di raffrescamento e degli impianti di ventilazione.

---

### 5.1.2 Bilancio di energia a livello dell'edificio

Il bilancio di energia (termica) a livello della zona dell'edificio comprende i seguenti termini (si considera solo il calore sensibile):

- scambio termico per trasmissione tra l'ambiente climatizzato e l'ambiente esterno, retto dalla differenza tra la temperatura della zona climatizzata e la temperatura esterna;
- scambio termico per ventilazione (mediante ventilazione naturale oppure mediante un impianto di ventilazione meccanica), retto dalla differenza tra la temperatura della zona climatizzata e la temperatura dell'aria immessa;
- scambio termico per trasmissione e ventilazione tra zone adiacenti, retto dalla differenza tra la temperatura della zona climatizzata e la temperatura interna all'ambiente adiacente;
- apporti termici interni (inclusi gli apporti negativi dai pozzi termici), per esempio dalle persone, dalle apparecchiature, dall'illuminazione e dal calore dissipato o assorbito dagli impianti di riscaldamento, raffrescamento, acqua calda o ventilazione;
- apporti termici solari ;
- accumulo di calore nella massa dell'edificio, o rilascio del calore accumulato dalla massa;
- fabbisogno di energia termica per il riscaldamento: se la zona è riscaldata, un impianto di riscaldamento fornisce calore al fine di elevare la temperatura interna al livello minimo richiesto (il valore di regolazione per il riscaldamento);
- fabbisogno di energia termica per il raffrescamento: se la zona è raffrescata, un impianto di raffrescamento sottrae calore al fine di abbassare la temperatura interna al livello massimo richiesto (il valore di regolazione per il raffrescamento).

[...]

### 5.1.3 Bilancio di energia a livello degli impianti tecnici

Il fabbisogno di energia termica dell'edificio per il riscaldamento e il raffrescamento è soddisfatto dall'energia fornita dagli impianti di riscaldamento e di raffrescamento.

---

A livello dell'impianto, il bilancio di energia per il riscaldamento e il raffrescamento, se applicabile, comprende:

- il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento e il raffrescamento della zona dell'edificio;
- l'energia proveniente dagli impianti ad energia rinnovabile;
- le perdite di generazione, di accumulo, di distribuzione, di emissione e di regolazione degli impianti di riscaldamento e raffrescamento ambiente;
- l'energia assorbita dagli impianti di riscaldamento e raffrescamento ambiente;
- l'energia assorbita dal pre-riscaldamento e dal pre-raffrescamento centralizzato dell'aria di ventilazione, incluso il trasporto, le perdite termiche e la regolazione;
- particolare: l'energia erogata dagli impianti di riscaldamento e raffrescamento ambiente (per esempio l'energia elettrica esportata da un'installazione che genera in maniera combinata energia termica ed elettrica).

Il bilancio di energia dell'impianto può anche comprendere l'energia recuperata nell'impianto da varie sorgenti.

[...]

## 5.2 Struttura principale del procedimento di calcolo

La struttura principale del procedimento di calcolo è riportata sinteticamente di seguito.

- a) Scegliere il tipo di metodo di calcolo, in conformità al punto 5.3.
- b) Definire i confini dell'insieme degli ambienti climatizzati e degli ambienti non climatizzati, in conformità al punto 6.2.
- c) Se richiesto, definire i confini delle diverse zone di calcolo, in conformità al punto 6.3.
- d) Definire le condizioni interne per il calcolo (punto 13), il clima esterno (appendice F) e gli altri dati d'ingresso di tipo ambientale.
- e) Calcolare, per ciascun passo di tempo e ciascuna zona termica, il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento,  $Q_{H,nd}$ , e il fabbisogno di energia termica per il raffrescamento,  $Q_{C,nd}$ .

---

f) Accorpare i risultati per i diversi passi di tempo e le diverse zone servite dagli stessi impianti e calcolare il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento e per il raffrescamento tenendo conto del calore dissipato dagli impianti di riscaldamento e di raffrescamento, in conformità al punto 14.

g) Accorpare i risultati per le diverse zone dell'edificio con impianti differenti.

h) Calcolare la durata d'esercizio della stagione di riscaldamento e di raffrescamento, in conformità al punto 7.4.

i) Può essere deciso a livello nazionale, a seconda dell'applicazione e del tipo di edificio, di richiedere che il calcolo del fabbisogno di energia termica per il riscaldamento e il raffrescamento sia effettuato in passi multipli, per esempio per tenere conto delle interazioni tra l'edificio e l'impianto, o tra zone adiacenti. I procedimenti sono forniti nel punto 7.3.

[...]

### 5.3 Diversi tipi di metodi di calcolo

Esistono due tipi di metodi fondamentali:

- metodi quasi stazionari, con il calcolo del bilancio termico su un tempo sufficientemente lungo (tipicamente, un mese o un'intera stagione), che consente di tener conto degli effetti dinamici attraverso un fattore di utilizzazione degli apporti e/o delle dispersioni determinato empiricamente;

- metodi dinamici, con il calcolo del bilancio termico con passi di tempo brevi (tipicamente un'ora) che tengono conto del calore accumulato, e rilasciato, dalla massa dell'edificio.

La presente norma internazionale tratta tre differenti tipi di metodo:

- un metodo di calcolo quasi stazionario mensile completamente prescritto;

- un metodo di calcolo dinamico orario semplificato completamente prescritto;

- procedure di calcolo per metodi di simulazione dinamica (per esempio oraria) dettagliata.

Il calcolo mensile fornisce risultati corretti su base annuale, ma i risultati per i singoli mesi che sono vicini all'inizio e alla fine della stagione di riscaldamento e di raffrescamento possono presentare grandi errori relativi.

---

Il metodo semplificato alternativo per calcoli orari è stato aggiunto per facilitare il calcolo utilizzando programmi orari di utilizzo (come temperature di regolazione, modalità di ventilazione, programmi di funzionamento delle schermature solari mobili e/o opzioni di regolazione oraria basate sulle condizioni climatiche esterne o interne). Questo metodo genera risultati orari, ma i risultati per le singole ore non sono validati e i singoli valori orari possono presentare grandi errori relativi.

#### 5.4 Principali caratteristiche dei diversi metodi

##### 5.4.1 Metodi dinamici

Nei metodi dinamici, un eccesso istantaneo di calore durante il periodo di riscaldamento produce l'effetto di un aumento della temperatura interna al di sopra del valore di regolazione, con conseguente rimozione del calore in eccesso mediante extra trasmissione, ventilazione e accumulo, in assenza di raffrescamento meccanico. Inoltre, un termostato di attenuazione o lo spegnimento potrebbero non portare direttamente ad una diminuzione della temperatura interna, a causa dell'inerzia dell'edificio (calore rilasciato dalla massa dell'edificio). Una situazione simile si verifica per il raffrescamento.

Un metodo dinamico realizza il modello della trasmissione termica, del flusso termico per ventilazione, dell'accumulo termico e degli apporti termici interni e solari all'interno della zona dell'edificio. Numerosi metodi rendono possibile questo, crescendo in complessità da metodi semplici a molto dettagliati.

Le procedure per l'utilizzo di metodi di simulazione più dettagliata assicurano compatibilità e coerenza tra le applicazioni di diversi tipi di metodo.”

#### **3.2.4 UNI EN 15265:2008**

La norma UNI EN 15265:2008 “Prestazione energetica degli edifici – Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti mediante metodi dinamici – criteri generali e procedimenti di validazione” definisce una serie di assunti, requisiti e prove di validazione per le procedure utilizzate per il calcolo del fabbisogno annuale di energia per il riscaldamento e il raffrescamento di un ambiente in un edificio, dove i



---

calcoli sono eseguiti su base oraria o con un intervallo temporale inferiore. La norma non impone alcuna tecnica numerica specifica per il calcolo del fabbisogno di riscaldamento o raffrescamento e delle temperature interne di un ambiente. Lo scopo della norma è infatti validare i metodi di calcolo utilizzati per valutare la prestazione energetica di ogni ambiente di un edificio e fornire dati sull'energia che siano utilizzati come interfaccia con l'analisi della prestazione del sistema (riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, illuminazione, acqua calda domestica,...).

---

### 3.3 Modelli di calcolo dinamico

Il modello di calcolo che sta alla base dei software di simulazione energetica più correnti è basato sulla conoscenza delle leggi fisiche che regolano il sistema oggetto di analisi; inserendo gli opportuni dati di ingresso e le condizioni al contorno, si ottengono i dati di uscita richiesti. Quanto agli algoritmi che si utilizzano per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, è possibile distinguere essenzialmente modelli di calcolo basati sulle funzioni di trasferimento e modelli ai volumi finiti.

L'edilizia senza dubbio è uno dei più importanti settori industriali ed economici che influenzano la qualità della vita e dell'ambiente. Eppure, durante il processo di progettazione e costruzione spesso i progettisti e gli operatori economici prestano poca attenzione ai costi di manutenzione e di esercizio relativi a tutto il ciclo di vita dell'edificio.

La *Building Simulation* offre la possibilità di affrontare in maniera adeguata i problemi relativi alla prestazione dell'edificio in esercizio, così come del processo costruttivo. Sempre più spesso, i modelli numerici sono impiegati come supporto nei processi decisionali relativi al progetto, all'esercizio o alla gestione. Per tale motivo sono di crescente importanza lo sviluppo, la valutazione, l'uso nella pratica e la standardizzazione dei modelli e dei programmi.

Nonostante le procedure per l'analisi energetica degli edifici varino notevolmente nel loro grado di complessità, esse hanno tutti alcuni elementi comuni:

- il calcolo del carico termico dell'ambiente costruito, legato alla prestazione del fabbricato;
- il calcolo del carico termico degli apparecchi secondari;
- il calcolo degli apparecchi del carico termico (generatori termici);
- l'eventuale analisi economica.

---

Il primo passo nell'analisi energetica di un edificio comprende la determinazione del carico termico dell'ambiente costruito, vale a dire la quantità di energia che deve essere raggiunta o sottratta da un ambiente per mantenere le condizioni prefissate di temperatura e umidità relativa. Le procedure più semplici assumono che l'energia richiesta per mantenere il comfort sia solo funzione della temperatura esterna di bulbo secco. I metodi più dettagliati considerano gli effetti della radiazione solare, degli apporti termici interni, dell'accumulo di calore nelle pareti perimetrali e nelle partizioni interne e gli effetti del vento sia sullo scambio termico dell'involucro sia sull'infiltrazione.

Per la modellazione energetica dell'edificio oggetto del presente studio è stato considerato il fabbricato con gli impianti e i dispositivi tecnologici che si trovano al suo interno; il livello di dettaglio comprende l'intero edificio e come variazione temporale delle condizioni al contorno è stato preso il regime variabile, o dinamico, in cui tutte le grandezze (temperature, flussi termici, clima esterno, profilo di utilizzo, etc.) sono variabili nel tempo.

Con riferimento al dettaglio nell'analisi dei carichi termici dell'ambiente, la principale distinzione è tra:

- metodi che risolvono l'equazione di bilancio termico convettivo dell'aria in ambiente e le equazioni di bilancio termico conduttivo, convettivo e radiante di tutte le superfici a contatto con l'aria interna (AHT, air heat transfer);
- metodi che assumono il carico termico globale come somma dei carichi termici prodotti separatamente dalle diverse sollecitazioni subite dall'ambiente.

Il primo metodo è quello più diffuso ed utilizzato anche nel calcolo dell'edificio di studio. Verrà pertanto approfondito nel seguito.

### 3.3.1 EnergyPlus

EnergyPlus è un software di simulazione termo energetica. A differenza di BLAST e DOE-2, software a simulazione sequenziale dai quali deriva, EnergyPlus nasce come programma innovativo in quanto è basato sulla simulazione integrata dell'ambiente e dell'impianto di climatizzazione. Ciò significa che tutte e tre le parti principali, costruzione, sistema e impianto, devono essere risolte simultaneamente, infatti l'informazione relativa al carico che l'impianto è effettivamente in grado di bilanciare viene utilizzata per determinare le condizioni di temperatura dell'aria in ambiente, seguendo con ciò un processo iterativo.

Dal punto di vista della comprensione dell'architettura del software, è possibile distinguere il Surface Heat Balance Manager, l'Air Heat Balance Manager e il Building Systems Simulation Manager, come mostrato in Figura 4.

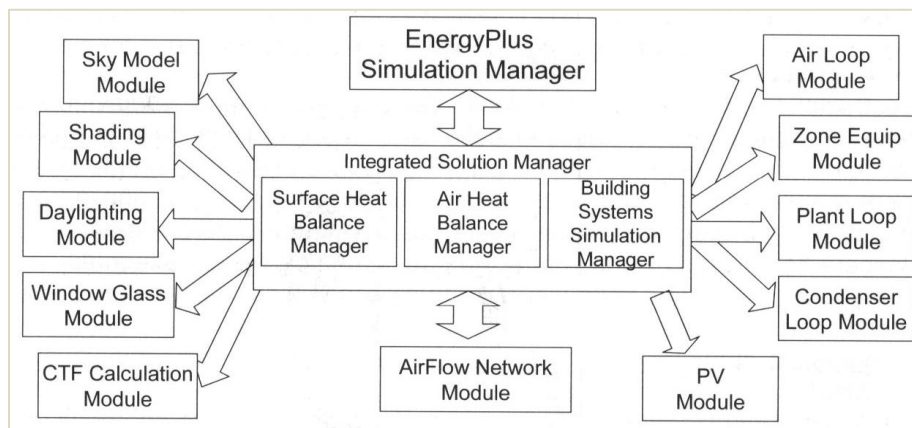


Figura 4 : schema delle relazioni tra i vari moduli del software

Il Surface Heat Balance Manager risolve il bilancio termico in corrispondenza della superficie di ciascuna parete, l'Air Heat Balance

Manager risolve il bilancio dell'ambiente attraverso la simulazione simultanea degli scambi termici radianti e convettivi, e il Building Systems Simulation Manager conduce la simulazione dei componenti impiantistici. Questi moduli principali interagiscono con altri secondari e sono contenuti all'interno dell'Integrated Solution Manager, che fa sì che i tre moduli siano risolti simultaneamente, e non in cascata, per ottenere una simulazione il più possibile realistica. In EnergyPlus si distinguono due time step; uno è quello per l'analisi dell'interazione tra le zone termiche e l'ambiente esterno, che viene definito dall'utente (ad es. 15 min); l'altro, variabile e non direttamente modificabile dall'utente è quello per l'analisi degli impianti di climatizzazione (System time step).

### 3.3.1.1 Il simulatore dell'edificio

La costruzione del modello di calcolo dell'edificio avviene suddividendo l'edificio in zone termiche, ciascuna delle quali viene definita dalle superfici che la delimitano come indicato in Figura 5. Ad ogni superficie viene assegnata una stratigrafia, la quale a sua volta viene costruita assemblando strati di materiale diversi, con eventuali strati d'intercapedine d'aria. Tra gli elementi che compongono la stratigrafia vi sono anche schermature di vario tipo.

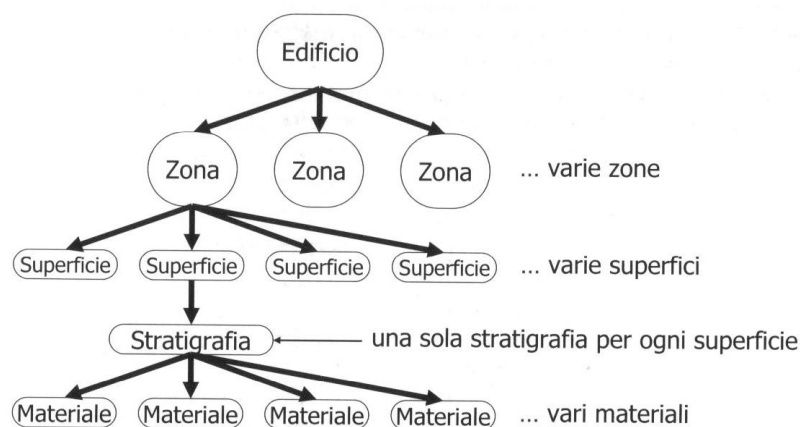


Figura 5: schema della costruzione del modello di edificio

Dal punto di vista della modellazione fisica diretta del bilancio termico dell'edificio è di ausilio lo schema sotto riportato (Figura 6): nella parte superiore dello schema è possibile notare che per ogni parete vengono valutati il bilancio sul nodo superficiale esterno della parete e quello sul nodo superficiale interno della parete e che, tra il nodo esterno e quello interno, viene valutato il flusso termico per conduzione trasmesso all'interno della parete. L'*Air Heat Balance Engine* considera il bilancio termico sull'aria ambiente. Le principali assunzioni su cui si basa il metodo sono:

- temperatura dell'aria ambiente uniforme;
- temperatura uniforme su ciascuna superficie;
- irraggiamento uniforme ad alta e a bassa lunghezza d'onda;
- superfici uniformemente diffondenti;
- trasmissione del calore per conduzione monodimensionale.

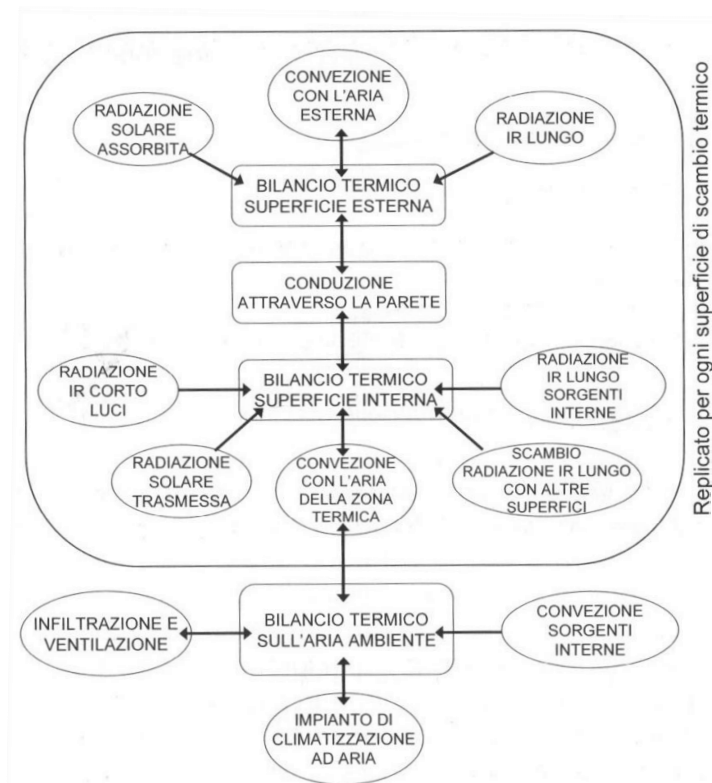


Figura 6: schema del modello termico di un ambiente. Da (Splitter, 2009)

Trascurando il flusso termico disperso per infiltrazione e per ventilazione tra le zone adiacenti, l' *Air Heat Balance* può essere espresso dall'equazione:

$$C_Z \frac{dt_Z}{d\tau} = \sum_{i=1}^N \dot{Q}_{i,c} + \sum_{i=1}^{N_{sup}} \dot{Q}_{i,s} + \dot{Q}_V + \dot{Q}_N =$$

$$\sum_{i=1}^N \dot{Q}_{i,c} + \sum_{i=1}^{N_{sup}} h_i A_i (t_{s,i} - t_Z) + \dot{m}_V c_p (t_\infty - t_Z) + \dot{Q}_N$$

dove:

$C_Z$  = capacità termica dell'aria della zona e delle masse termiche in equilibrio con l'aria ambiente (J/°C);

$N$  = numero delle sorgenti interne convettive;

$\dot{Q}_{i,c}$  = flusso termico disperso da ciascuna delle  $N$  sorgenti di calore convettive (W);

$N_{sup}$  = numero delle superfici della zona a temperatura  $t_s$  ;

$\dot{Q}_{i,s}$  = flusso termico disperso da ciascuna delle  $N_{sup}$  superfici della zona termica (W);

$\dot{Q}_V$  = carico di ventilazione (W);

$\dot{Q}_N$  = carico dell'impianto (W);

$h_i$  = coefficiente di scambio termico convettivo superficie-aria interna (W/m<sup>2</sup>·K);

$A_i$  = area della superficie (m<sup>2</sup>);

$t_{s,i}$  = temperatura superficiale della  $i$ -esima parete (°C);

$\dot{m}_V$  = portata di aria di ventilazione (kg/s);

$c_p$  = calore specifico dell'aria (J/ kg·°C);

$t_\infty$  = temperatura dell'aria di ventilazione (°C);

---

Connesso all'*Air Heat Balance Manager* è il *Surface Heat Balance Manager* che comprende i moduli per la determinazione delle temperature superficiali e dei flussi termici in corrispondenza delle facce interna ed esterna di ogni parete. I flussi termici scambiati attraverso i componenti di involucro sono determinati utilizzando una funzione di trasferimento, algoritmo in grado di legare la sollecitazione indotta sul sistema fisico parete con la risposta del sistema.

### **3.3.1.2 Il simulatore degli impianti**

Il building system simulation manager può simulare i più diffusi componenti impiantistici, ed è basato sulla scomposizione dei componenti di un impianto in tre sotto-sistemi: l'air loop, il plant loop e il condenser loop. L'air loop serve a modellare le reti aerauliche, dalle unità di trattamento dell'aria ai terminali di impianto in ambiente. I plant loop e i condenser loop modellano le reti idroniche e i circuiti di condensazione; al loro interno si distinguono componenti relativi alla domanda (batterie di scambio termico) e componenti relativi all'offerta (generatori di calore, torri evaporative).

Di ausilio alla creazione dei modelli impiantistici vi sono i cosiddetti HVAC Template, moduli che consentono di modellare una serie di configurazioni impiantistiche tipo con un numero di dati di input molto limitato, e che, a seguito di una prima simulazione, danno luogo ad un sistema complesso e completo attraverso l'inserimento di una serie di dati di default.

### **3.3.2 DesignBuilder**

DesignBuilder è un ambiente di modellazione user-friendly in cui è possibile lavorare con modelli di edifici virtuali. Esso fornisce una serie di dati sulle prestazioni ambientali quali: consumo di energia, le emissioni di



---

carbonio, condizioni di comfort, illuminamento luce del giorno, le temperature estive massime e dimensioni dei componenti HVAC. DesignBuilder è l'interfaccia utente più completa per il software di calcolo EnergyPlus.

La base di conoscenza DesignBuilder è organizzata in diverse categorie: modello di importazione di modelli CAD, componenti; materiale database; modello ventilazione naturale, ecc.

Si rimanda al capitolo 5 per la trattazione approfondita degli input ed output di questo software con il quale si è scelto di modellare il caso di studio.

---

## **Capitolo 4 – Il caso studio: ampliamento del museo M.A.G.I '900**

Il caso studio oggetto della presente tesi riguarda il progetto di ampliamento dell'esistente Museo M.A.G.I '900 che sorge a Pieve di Cento (BO).

### **4.1 Il contesto in cui sorge il museo: Pieve di Cento**

Pieve di Cento, una volta conosciuta come "piccola Bologna" per i suoi lunghi portici, ha mantenuto ben leggibile l'impianto urbanistico del "castrum" romano, con l'aggiunta della pieve del IX sec., poi della città medievale e quindi rinascimentale e barocca. La sua posizione strategica ne ha fatto fin dalle origini un punto di riferimento avanzato del Vescovado e del Comune di Bologna, che non mancò di entrare nelle mire degli Estensi di Ferrara. Di qui la costruzione di edifici difensivi come la Rocca del 1387 progettata da Antonio di Vincenzo, l'architetto di San Petronio a Bologna, e le quattro porte di accesso al paese, nel Trecento ricostruite in muratura.

La storia di Pieve di Cento è strettamente legata alla sua gemella, Cento, che dista pochi metri aldilà del Reno. È il 1185 quando il Vescovo di Bologna allarga la sua giurisdizione su queste terre, ancora dominate dalle acque. Sono gli anni delle prime bonifiche e dell'introduzione dell'enfiteusi, istituto che prevedeva l'assegnazione di terre in cambio della loro colonizzazione. Si arriva così nel 1253 alla nascita delle Partecipanze agrarie, ancora oggi esistenti e attive. Col venir meno dell'autorità vescovile le terre sono passate ai Centopievesi, uniti in un'unica comunità, che aveva il compito di ridistribuirle tra le famiglie partecipanti, con rotazioni ventennali.

A suggellare materialmente la separazione tra le due cittadine fu la disastrosa rotta del Reno del 1459, che modificò il corso del fiume spostandolo da ovest a est di Cento. Nel 1502, intanto, il centopievese entrò

---

nell'orbita ferrarese, portato in dote da Lucrezia Borgia al Duca d'Este. Il territorio, tuttavia, ha continuato a mantenere una sua identità autonoma, storicamente legata a Bologna. A questo si deve la decisione di Pieve di tornare nel 1929 sotto Bologna.

Il Palazzo Comunale (secc. XVII-XVIII) ospita l'antico Archivio Notarile e il Teatro Zeppilli, i cui ridotti ospitano un piccolo Museo della Musica, con testimonianze della vita di Alice Zeppilli, nonché documenti e strumenti musicali provenienti dalla Scuola di Liuteria.

Tre sono i Musei pievesi, che offrono la possibilità di compiere un viaggio nell'arte e nella storia del territorio e non solo, dal Medioevo alle ultime generazioni dell'arte contemporanea: il Museo Civico, il Museo d'Arte delle Generazioni Italiane del '900 (MAGI '900) e la Pinacoteca Civica.

Ad oggi purtroppo, causa il recente terremoto (maggio-giugno 2012) sono stati dichiarati inagibili molti monumenti sopracitati, come la Rocca, Porta Cento e Porta Bologna, quattro chiese ed anche le scuole elementari e l'asilo nido.

## **4.2 Il museo M.A.G.I '900**

Nato dalla passione del collezionista Giulio Bargellini, il Museo d'Arte delle Generazioni Italiane del '900 "Giulio Bargellini" (M.A.G.I '900) è ospitato in un vecchio silos degli anni '30, in via Rusticana A/1. Con la ristrutturazione dell'architetto Giuseppe Davanzo viene inaugurato nel 2000 come Museo d'Arte delle Generazioni Italiane del '900 G. Bargellini, oggi MAGI'900- Museo delle Eccellenze.

### **4.2.1 Il fondatore**

Giulio Bargellini nasce a Pieve di Cento nel 1932. Dopo diverse esperienze nel settore delle materie plastiche fonda, nel 1963,

---

la G. Bargellini & C. che utilizza il marchio OVA. La società diventa ben presto leader nel settore della produzione di sistemi per l'illuminazione di emergenza. Bargellini realizza per primo un prototipo di lampade con batterie ricaricabili che apre la strada a innovative soluzioni. Per almeno una decina di anni è il solo costruttore di sistemi all'avanguardia in Italia. Nel 1997 La G. Bargellini & C. S.P.A. viene insignita del Key Award, importantissimo riconoscimento professionale nella comunicazione pubblicitaria, per lo spot "Il Maratoneta" andato in onda sulle televisioni nazionali. Sempre nel '97, così come nell'anno successivo alla società viene conferito il "Gran Premio IMQ (Istituto Italiano del Marchio di Qualità)" per il contributo offerto alla sicurezza dei prodotti e del mercato, una sicura garanzia soprattutto per l'utente- consumatore.

Nel 1999 Bargellini si aggiudica il primo premio nel settore "Quality of Life" nell'ambito de "L'imprenditore dell'anno", di cui aveva già ricevuto, l'anno prima, il secondo premio.

Dopo il diploma ad honorem dell'Accademia di Belle Arti di Bologna, egli viene insignito nel 2008 dall'Università degli Studi di Ferrara della medaglia e del diploma quale "imprenditore, filantropo e mecenate dell'arte".

Giulio Bargellini, da sempre convinto assertore del binomio impresa-cultura, comincia a collezionare opere d'arte, con una particolare attenzione alla contemporaneità. Dapprima la sua collezione trova la sua migliore collocazione nella casa che viene progettata e allestita allo scopo di condividere con artisti e appassionati un'esperienza entusiasmante. Successivamente matura in Bargellini l'idea della creazione del primo Museo privato in Italia. È a questo punto che viene individuata un'area poco lontano dal cuore di Pieve di Cento, dove campeggia l'imponente struttura architettonica degli Anni '30.

---

#### 4.2.2 Le collezioni

Il progetto è di un Museo come work in progress, che si articola tra due blocchi di quattro piani ciascuno su un' area di oltre 7000 m<sup>2</sup>, con un ristorante bar, sale per conferenze e dibattiti, book shop e sale destinate alla collezione permanente e alle mostre temporanee. Il giardino delle sculture (con opere plastiche di grandi dimensioni e diversi materiali e linguaggi) è frutto del sostegno personale di Bargellini a molti artisti che hanno realizzato opere monumentali nell'intento di creare un collegamento ideale tra il Museo e il territorio circostante. Espone una raccolta di arte italiana del Novecento, con sale dedicate ai "maestri storici" (Modigliani, de Chirico, Depero) e alle successive generazioni dei protagonisti dell'ultimo secolo, dal primo decennio agli anni Trenta.

Oltre alla collezione permanente è presente il Museo delle Eccellenze artistiche e storiche: dedicato all' arte del XX secolo italiano. Oltre, infatti, alle già inaugurate sale delle Sculture italo africane e dei cimeli del Ventennio, si possono visitare: la sala delle sculture (riorganizzata e ridefinita), la collezione Zavattini, i grandi maestri storici, la sala dedicata ad opere futuriste con un'inedita collezione di bozzetti dei suoi più grandi protagonisti, uno spazio dedicato all'esperienza recente della performance e mostra del maestro Shimamoto con proiezione del video realizzato proprio al Magi.

Si può visitare anche l'area dedicata al fondatore del Magi, Giulio Bargellini, attraverso un percorso che lo ha visto da molti anni impegnato, come imprenditore, in numerose azioni a carattere filantropico (grazie all'esperienza in Africa) e ambientalista (la salvaguardia del fiume Reno), prima che di ambiente si cominciasse a parlare diffusamente.

Oggi il MAGI'900 si configura come Museo a carattere internazionale.

---

### 4.2.3 Il progetto di ampliamento

Il M.A.G.I '900 è ospitato in un vecchio silos degli anni '30, in via Rusticana A/1. Con la ristrutturazione dell'architetto Giuseppe Davanzo viene inaugurato nel 2000 come Museo d'Arte delle Generazioni Italiane del '900 G. Bargellini, oggi MAGI'900- Museo delle Eccellenze.



*Figura 7: ortofoto del sito del progetto – Google Maps*



*Figura 8: veduta del museo da via Circonvallazione Ponente; la tribuna del campo da calcio che deve essere dismessa per la costruzione del caso studio*



Figura 9: veduta del museo da via Rusticana

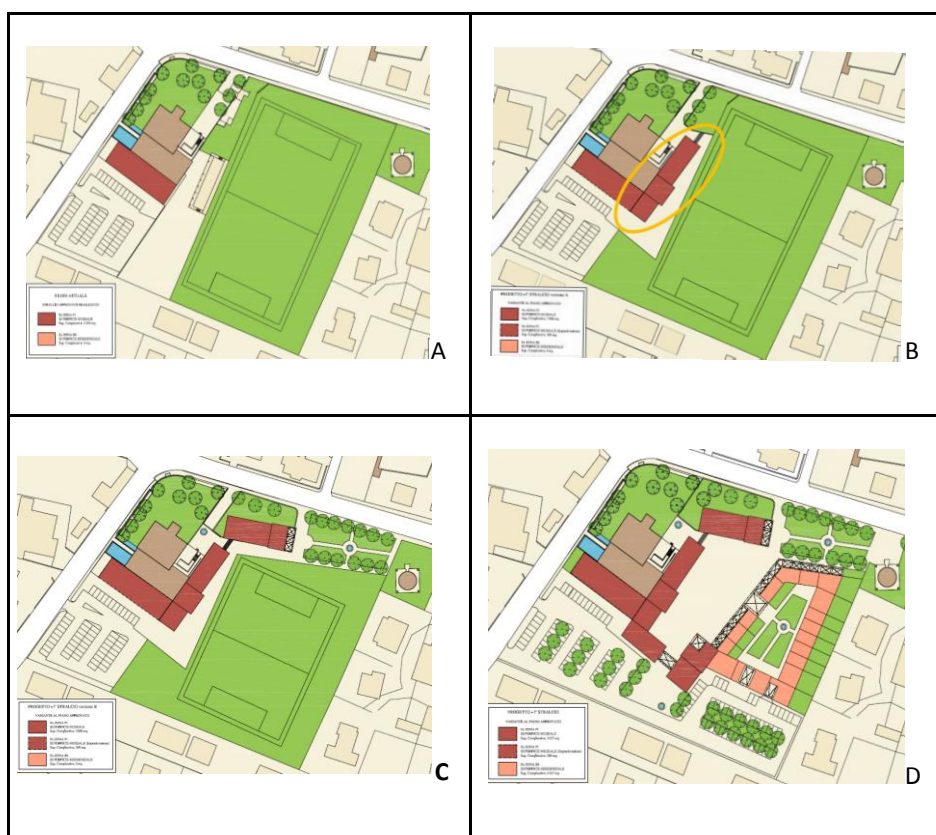


Figura 10: programma di intervento. A: attuale; B: primo ampliamento (caso studio); C e D: futuri ampliamenti

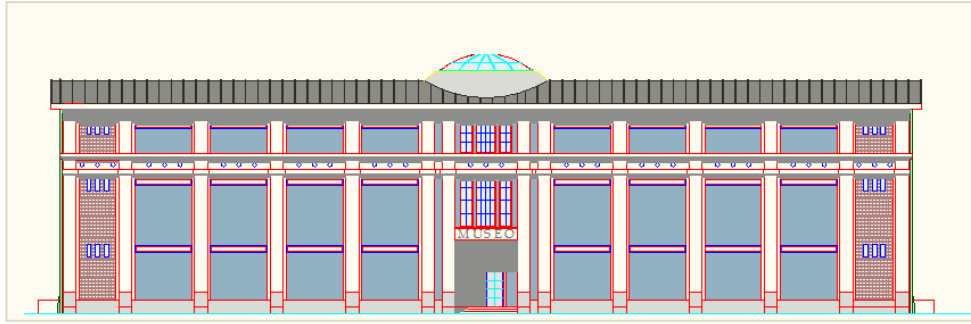
Il progetto di ampliamento dell'esistente Museo Magi '900, elaborato dallo studio di ingegneria e architettura dell'ing. Luca Venturi, si colloca all'interno di un progetto più vasto che prevede la creazione di un vero e proprio "Borgo degli artisti".

---

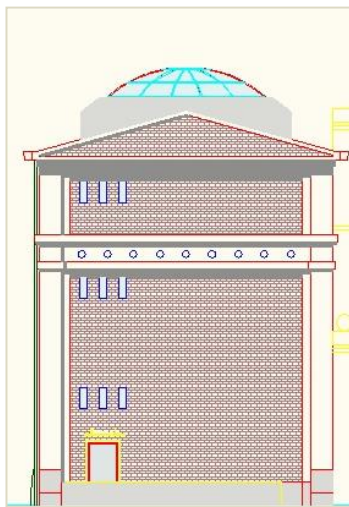
L'edificio che verrà analizzato nel seguito della tesi ha una superficie di 2230 m<sup>2</sup> circa e si sviluppa su tre piani per un'altezza di 15 m. L'intero edificio si compone di un'unica zona centrale e due laterali, una adibita ai servizi e l'altra, opposta, a vano scala. Il piano terra sarà adibito a biblioteca comunale, divisa in due zone dall'ingresso principale; il primo e secondo piano sono sale adibite ad esposizione o a congressi.

Il sistema costruttivo è definito 'a secco'. Tutti gli elementi sono prefabbricati: la struttura in cemento armato precompresso, sia i solai, di interpiano e di copertura, sia travi e pilastri; tutto l'involucro, anch'esso prefabbricato, è creato con un sistema a pannelli della casa produttrice Knauf. Questa scelta rende le pareti leggere, poco massive. Le pareti esterne delle zone laterali si differenziano dalla centrale per i mattoni a faccia vista. Sono riportati di seguito profili e sezioni creati in AutoCad del progetto: alcuni dettagli, come gli infissi del piano terra, non sono quelli definitivi in quanto essendo il progetto in fase preliminare è soggetto a modifiche importanti anche in brevi archi temporali.

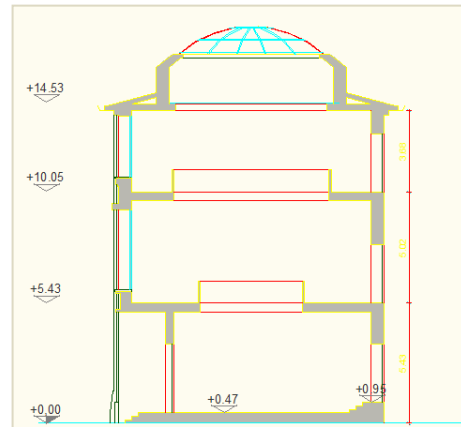




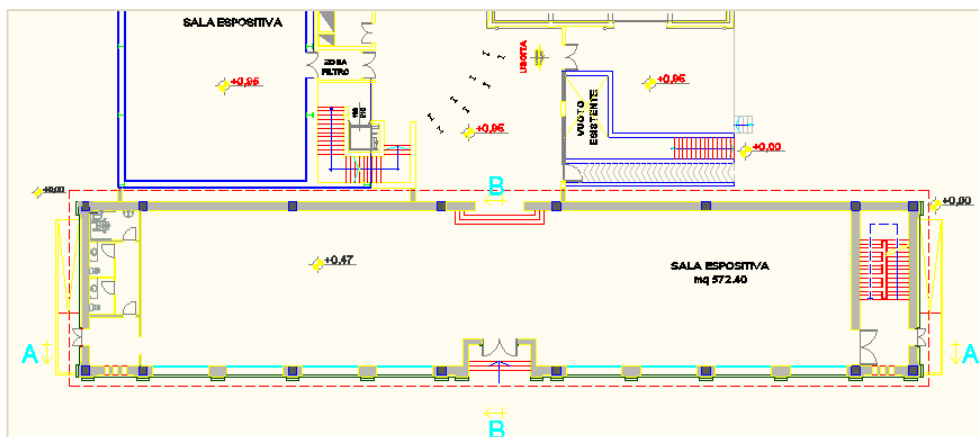
prospetto SUD-EST - scala 1:150



prospetto NORD-EST - scala 1:150



sezione B-B - scala 1:150



piano tipo adiacente all'esistente - scala 1:150

---

## Capitolo 5 – Applicazione del calcolo dinamico al caso studio

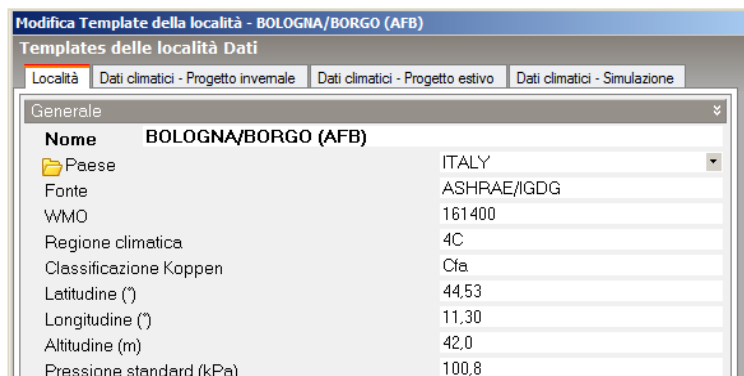
### 5.1 Modellazione edificio con Design Builder

La modellazione del caso di studio è stata effettuata con il software DesignBuilder; come anticipato al paragrafo 3.2.2 si tratta di un'interfaccia per il motore di calcolo EnergyPlus. È possibile creare modelli di edifici virtuali sui quali verranno poi eseguiti i calcoli con Energy Plus. La base di conoscenza DesignBuilder è organizzata in diverse categorie: modello di importazione di modelli CAD, componenti; materiale database; modello ventilazione naturale, ecc. Si riportano di seguito i principali dati di input inseriti nel modello analizzato.

#### 5.1.1 Dati modello

I dati climatici del luogo di progetto, Pieve di Cento, sono stati presi per analogia dai dati meteorologici dell'anno tipo contenuti nel database di EnergyPlus per Bologna. Il terreno circostante è stato considerato piano, senza ostacoli alla radiazione solare diretta ed avente un valore del coefficiente di riflessione pari a 0,2. La parete a nord-ovest, adiacente all'esistente, è stata considerata interamente adiabatica.

La zona vano scala ed il sottotetto si sono considerate come 'semiesterno non condizionato'; non rientrano perciò nei mq da condizionare. Il software utilizzato infatti considera ogni ambiente costruito come zona termica, come riportato nella descrizione del simulatore dell'edificio nel paragrafo 3.3.1.



## 5.1.2 Attività

Il regime dell'impianto di climatizzazione prevede un funzionamento per 8 ore al giorno (dalle 10:00 alle 18:00) per sei giorni alla settimana, programma che coincide con l'orario di apertura del museo.

Mese	Lunedì	Martedì	Mercoledì	Giovedì	Venerdì	Sabato	Domenica
Gen	Off	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00
Feb	Off	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00
Mar	Off	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00
Apr	Off	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00
Mag	Off	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00
Giu	Off	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00
Lug	Off	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00
Ago	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Set	Off	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00
Ott	Off	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00
Nov	Off	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00
Dic	Off	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00	10:00 - 18:00

Nella stagione estiva il set point per il raffrescamento è stato fissato a 26 °C, mentre nella stagione invernale il set point per il riscaldamento è stato fissato a 20 °C. C'è inoltre la possibilità di impostare un basso livello di raffrescamento/riscaldamento durante i periodi di non occupazione per impedire che la costruzione diventi troppo calda/fredda e per ridurre il carico di accensione per il raffrescamento/ riscaldamento la mattina seguente; è chiesto perciò di immettere la temperatura di setpoint da utilizzare la notte, il fine settimana e durante gli altri giorni festivi. Il suo significato dipende dall'opzione di calcolo della temperatura di controllo: in funzione del valore immesso per questa temperatura si decide se tenere continuamente monitorate le temperature, quindi se avere un controllo sensibile in continuo, o se slegare questo controllo dal programma prestabilito per l'impianto. Per quanto riguarda la ventilazione si è imposto un valore di aria minima di rinnovo pari a 6 l/s per persona, ai sensi della

norma UNI 10339. L'occupazione, sempre in base agli indici di affollamento della norma, è stata considerata con un valore pari a 0,18 persone a m<sup>2</sup>. I carichi riguardanti eventuali apparecchiature interne, come i computer, sono stati considerati con un valore di 1,52 W/ m<sup>2</sup>; infatti saranno presenti principalmente solo all'interno della biblioteca, in quanto le sale espositive non richiedono l'installazione di nessuna apparecchiatura.

The screenshot displays the 'Dati modello' (Model Data) window with the 'Attività' (Activity) tab selected. The interface is organized into several sections:

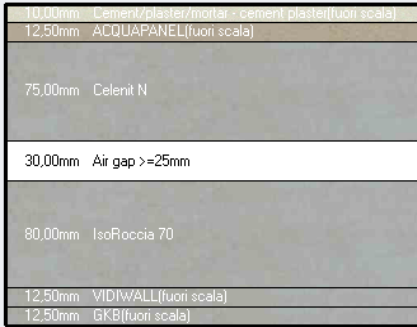

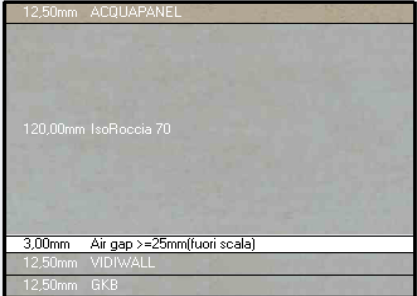



- Templates attività:** Shows the selected template 'Template Attività\_Museo Bargellini' with a 'Settore' (Sector) of 'D1 Non-residential Institutions - Libraries Museum' and a 'Moltiplicatore zona' (Zone multiplier) of 1. Checkboxes for 'Includi zona' and 'Includi zona all'interno dei calcoli dell'illuminazione naturale' are both checked.
- Superficie di pavimento totale dell'edificio:** Displays 'Superficie di pavimento occupata (mq)' as 1561,4 and 'Superficie di pavimento non occupata (mq)' as 669,8.
- Occupazione:** Features a slider for 'Densità (persone/mq)' (Density) set to 0,1800, with a scale from 0 to 4.
- Programma:** Shows 'Programma\_Museo Bargellini'.
- Controllo ambiente (Environmental Control):**
  - Setpoint di Riscaldamento (Heating):** 'Riscaldamento (°C)' is set to 20,0 on a scale from 0 to 30. The 'Temp. di attenuazione in Riscaldam...' (Attenuation temperature in heating) is set to 14,0.
  - Setpoint di Raffrescamento (Cooling):** 'Raffrescamento (°C)' is set to 26,0 on a scale from -10 to 30. The 'Temp. Di attenuazione in Raffresca...' (Attenuation temperature in cooling) is set to 30,0.
- Other sections:** 'Setpoint di Ventilazione', 'Aria minima di rinnovo', 'Illuminazione', 'Computers', and 'Strumentazioni d'ufficio' are listed with expandable arrows.

### 5.1.3 Costruzione

Sono state modellate cinque diverse pareti verticali perimetrali. Le trasmittanze rientrano tutte nei limiti imposti da normativa, in particolare ai sensi della Delibera della Regione Emilia-Romagna 156/08. La permeabilità all'aria della struttura (vol/h) non è stata considerata.



Di seguito sono riportate le stratigrafie delle pareti e solai utilizzati per il progetto. Non è stata riportata la stratigrafia della parete esterna del vano servizi, la quale è uguale a quella del vano scala (parete 2 scale) con il doppio dello strato isolante IsoRoccia 70.

<b>parete 1 facciata centrale</b> spessore = 23 cm U= 0,254	<b>parete 2 scale</b> spessore = 22 cm U= 0,550
<p style="text-align: center;">esterno</p>  <p style="text-align: center;">interno</p>	<p style="text-align: center;">esterno</p>  <p style="text-align: center;">interno</p>
<b>PI 2 divisorio coibentato</b> spessore = 19 cm U= 0,249	<b>PI 1 tramezzi</b> spessore = 10 cm U= 0,396
<p style="text-align: center;">esterno</p>  <p style="text-align: center;">interno</p>	<p style="text-align: center;">esterno</p>  <p style="text-align: center;">interno</p>
<b>SO1 solaio II piano</b> spessore = 25 cm U= 0,254	<b>SO4 solaio interpiano</b> spessore = 25 cm U= 0,254
<p style="text-align: center;">esterno</p>  <p style="text-align: center;">interno</p>	<p style="text-align: center;">esterno</p>  <p style="text-align: center;">interno</p>

*Tabella 1: stratigrafie dei solai, pareti perimetrali e divisori*

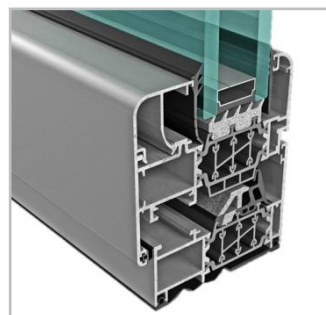
materiale	marca	conducibilità (W/m·K)	calore specifico (J/kg·K)	densità (kg/mc)
fibrocemento Aquapanel	Knauf	0,35	1000	1150
fibrogesso Vidiwall	Knauf	0,29	1000	1050
cartongesso GKB (A)	Knauf	0,2	1000	760
lamiera Coverib 1000	Ondulit	0,126	500	7900
mattoni	SantAnselmo	0,55	840	1800
vetro strutturale	-	1	750	2500
isolante EPS Expand Polystyr	-	0,04	1400	15
isolante EPS light	-	0,046	1400	10
isolante stiferite GT	Stiferite	0,024	1453	36
isolante Ekovetro P	Knauf	0,037	1030	15
isolante Celenit N	Celenit	0,065	1810	346
isolante IsoRoccia 70	Knauf	0,035	1030	70
isolante URSA XPS N III L	Ursa	0,036	1450	35

*Tabella 2: materiali usati nella modellazione*

#### 5.1.4 Aperture

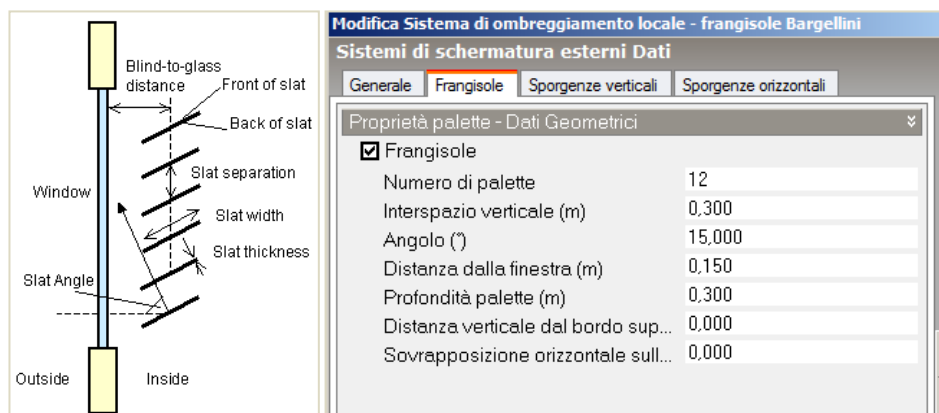
Tutti gli infissi sono stati modellati con un vetro doppio basso emissivo: la lastra esterna trattata da 6mm, un'intercapedine di 13mm di Argon e la lastra interna di vetro semplice sempre di 6mm. Il telaio in alluminio, a taglio termico. Infine sono stati posti a filo interno. La superficie vetrata è presente solo sulla parete a sud-est a parte un 2% dei m<sup>2</sup> totali presenti nei prospetti nord-est e sud-ovest. Di seguito è riportata la stratigrafia del telaio con rispettiva trasmittanza e la scheda di questa categoria.

**telaio alluminio:**  $U = 2,149$





Sono stati inoltre previsti frangisole esterni definiti dalla seguente scheda.





### 5.1.5 Illuminazione

Per il progetto dell'illuminazione è stato necessario utilizzare la norma UNI 15193 la quale fornisce i valori di riferimento e criteri di progettazione illuminotecnica. È stato preso il valore di  $P_N$  (carico di densità della potenza di illuminazione installata nell'edificio) pari a  $25 \text{ W/m}^2$ . È stata infine ipotizzata una luminescenza di 500 lux. Per l'illuminazione generale si è quindi considerata una potenza di  $5 \text{ W/m}^2 - 100 \text{ lux}$ . Si è definito anche un controllo, in funzione della luce naturale, di tipo continuato/spento come si può capire da Figura 5: all'aumentare della luce naturale la frazione di luce artificiale diminuisce. Raggiunto il minimum input power fraction dalla luce naturale, il sistema di controllo spegne l'illuminazione artificiale.

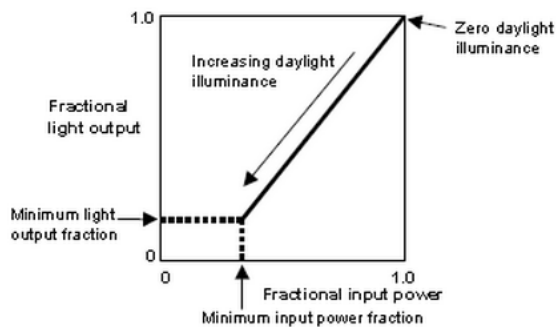


Figura 5: *Lighting Control\_ Continuous/Off Control*

È stato definito l'indice massimo permesso di luce abbagliante che per musei e biblioteche è pari a 20.

**Dati modello**

Attività | Costruzione | Aperture | **Illuminazione** | HVAC | CFD | Opzioni

Template di illuminazione

**Template** **Illuminazione Bargellini progetto**

Illuminazione generale

On

Potenza (W/mq-100 lux) **5,00**

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40

Tipo d'illuminazione **1-Sospeso**

Frazione Radiante **0,420**

Frazione Visibile **0,180**

Frazione convettiva **0,400**

Controllo di illuminazione

On

Tipo di controllo **2-Continuato/Spento**

Flusso luminoso minimo **0,100**

Frazione potenza massima **0,100**

Luce abbagliante >>

Zona di Illuminazione 1 >>

Zona di Illuminazione 2 >>

Illuminazione per attività specifiche

On

Illuminazione esterna

On

Livello di progettazione (W) **500,000**

Programma **On**

Opzione di controllo **2-Programmazione + non considerato durant**

## 5.1.6 HVAC

In questa fase preliminare di progettazione degli impianti termici si è ipotizzato di utilizzare un impianto a fancoil sia per il riscaldamento che per il raffrescamento; è stata ipotizzata una caldaia a gas metano per il riscaldamento e pompe di calore elettriche per il raffrescamento. Il calcolo tiene conto dell'energia ausiliaria per il funzionamento delle pompe per far circolare il fluido termovettore e quella dei ventilatori dei fancoil.

Inoltre è prevista la ventilazione meccanica: l'aria minima di rinnovo è stata considerata pari a 0,9 vol/h. Il programma di funzionamento dell'impianto rispecchia gli orari di apertura del museo.

The screenshot displays the 'Dati modello' (Model Data) window with the 'HVAC' tab selected. The configuration is organized into several sections:

- Template HVAC**: Includes a 'Template' dropdown set to 'impianto bargellini progetto'.
- Ventilazione meccanica**:
  - On**
  - Modalità aria esterna: 2-Area di rinnovo minima (per persona)
  - Funzionamento: Programma (Programma\_Museo Bargellini)
  - Ventilatori: >>
- Energia Ausiliaria**:
  - Energia pompe, ecc. (W/mq): 0,5000
  - Programma: Programma\_Museo Bargellini
- Riscaldamento**:
  - Riscaldato**
  - Combustibile: 2-Gas naturale
  - CoP sistema di riscaldamento: 0,830
  - Tipo: >>
  - Funzionamento: Programma (Programma\_Museo Bargellini)
- Raffrescamento**:
  - Raffrescato**
  - Combustibile: 1-Elettricità dalla rete
  - CoP sistema di raffrescamento: 1,670
  - Condizione aria immessa: >>
  - Funzionamento: Programma (Programma\_Museo Bargellini)
- Acqua Calda Sanitaria**:
  - On**
  - Template ACS: ACS Bargellini progetto
  - Tipo: 1-Same as HVAC
  - Temperature dell'acqua: >>
  - Funzionamento: >>
- Ventilazione naturale**: >>

---

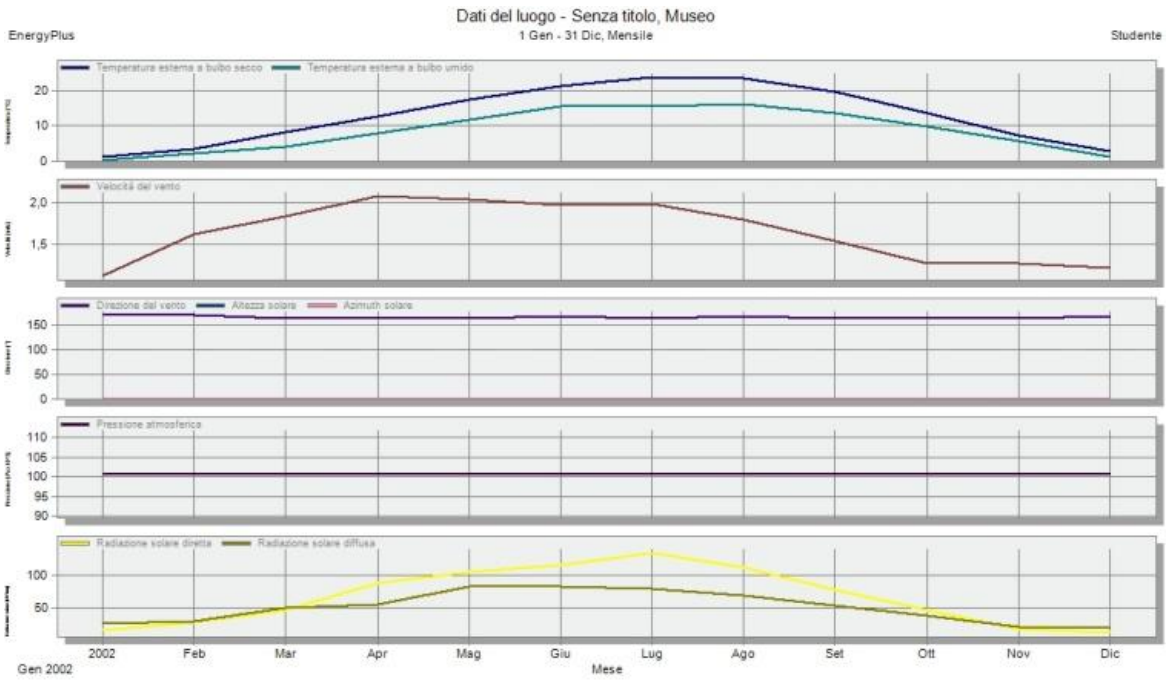
## **5.2 Simulazione e output del software**

Il lancio della simulazione consiste innanzitutto nel decidere l'arco temporale in cui si vuol simulare e visualizzare il comportamento dell'edificio dati gli input finora inseriti tramite la modellazione. Tramite l'interfaccia DesignBuilder è possibile scegliere l'intervallo di tempo della simulazione: Annuale, Mensile, Giornaliero, Orario, Sub-orario. Dalla finestra delle Impostazioni si riescono inoltre ad impostare gli algoritmi di soluzione, gli step temporali, quali output calcolare e visualizzare. Le categorie principali visualizzate in questo lavoro sono state:

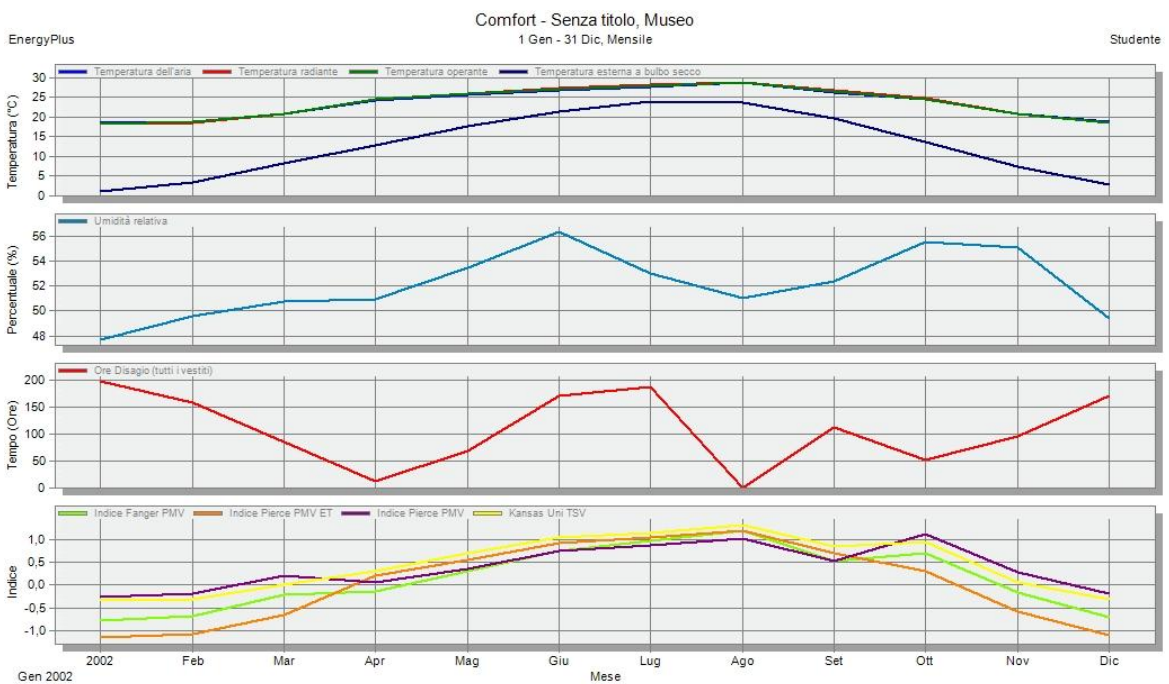
- dati del luogo
- comfort
- apporti interni
- bilancio termico e ventilazione
- consumi separati
- consumi totali
- CO2
- carichi del sistema

### **5.2.1 Report grafico**

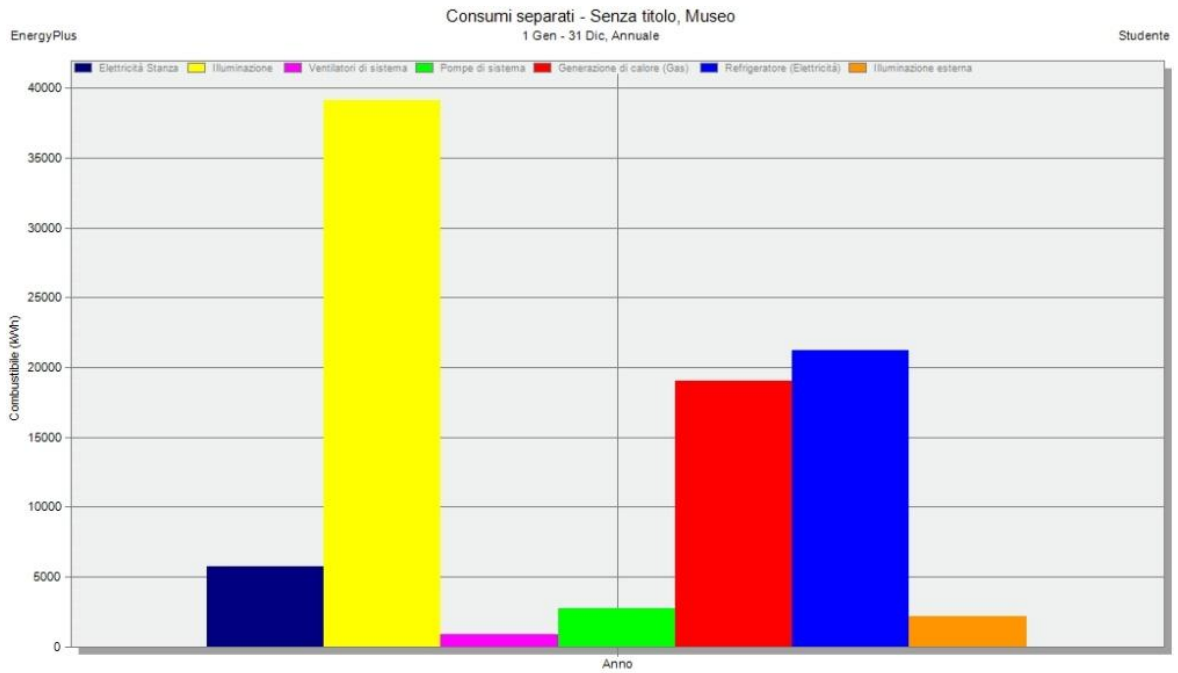
Si riportano di seguito alcuni dei grafici che il software crea e che sono quindi esportabili. Di ogni categoria sopra riportata si può vedere l'andamento annuale, mensile, giornaliero e sub-orario (se calcolati durante la simulazione).



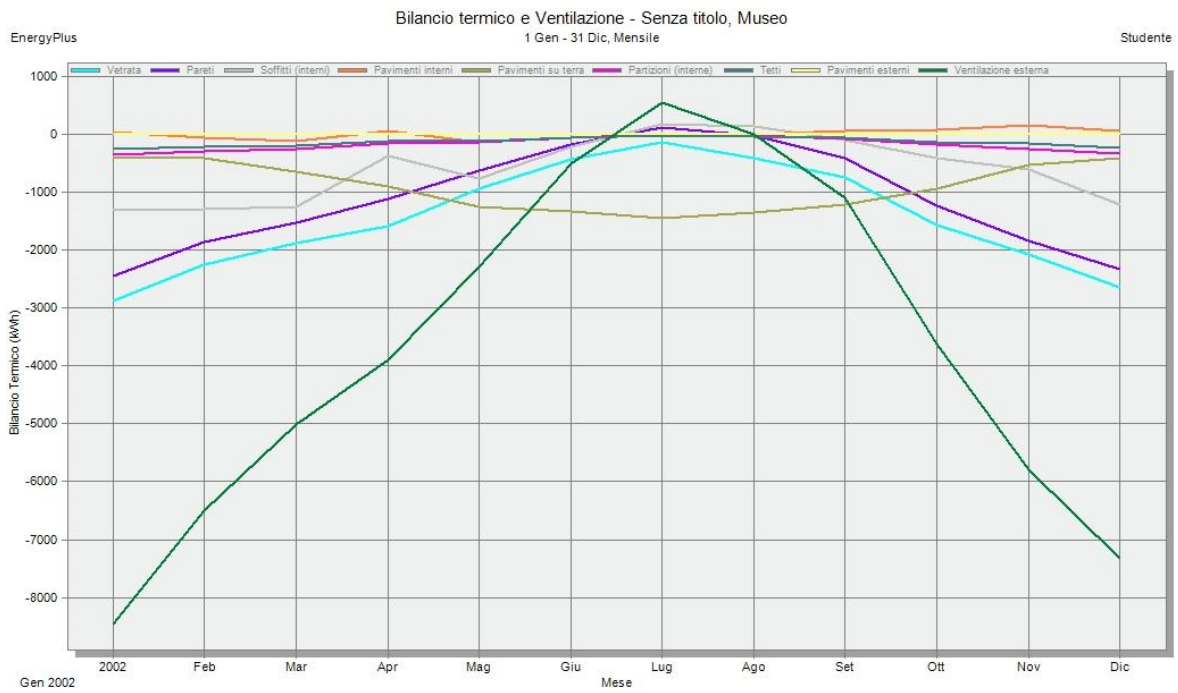
*Dati del luogo, riferimento annuale*



*Comfort annuale*



*Consumi separati annuali*



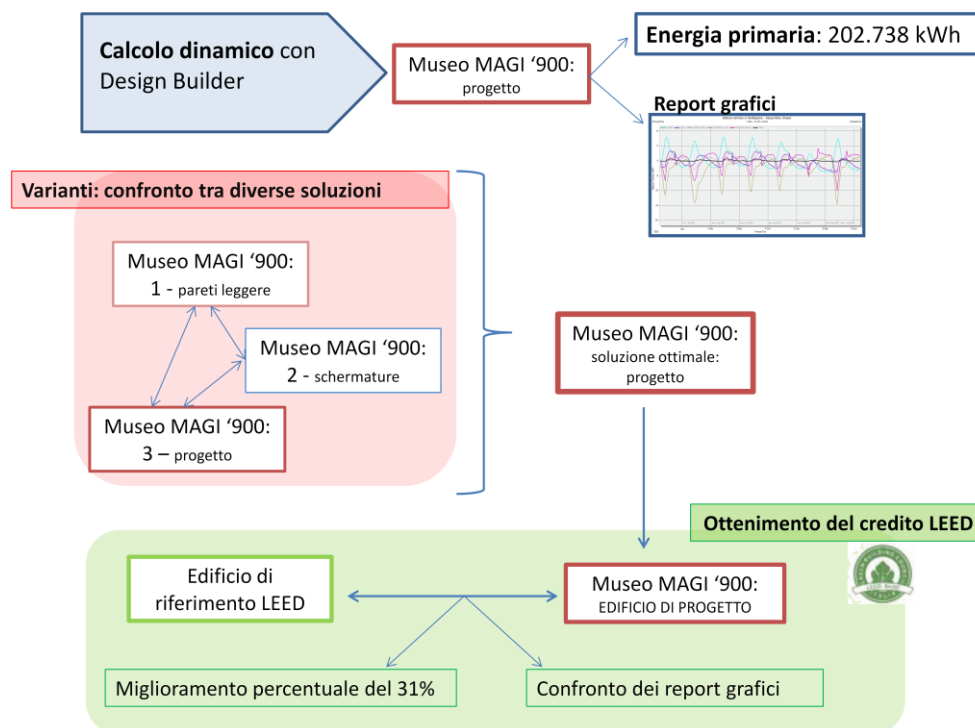
*Bilancio termico e ventilazione annuale*

## Capitolo 6 – Confronto tra il progetto e soluzioni differenti

I dati di input descritti nel capitolo 5 sono confluiti in una prima modellazione dell'edificio della quale è stata lanciata una simulazione, i cui risultati sono descritti nel paragrafo 6.3 Caso 3: progetto.

Partendo da questa soluzione di progetto sono state valutate le prestazioni dell'edificio per due soluzioni differenti che prevedessero modifiche di pacchetti murari, infissi e schermature (Caso 1 e Caso 2).

Dal confronto tra le tre simulazioni, riportato al paragrafo 6.4, si può notare che l'edificio di progetto è più performante delle varianti analizzate, ed è pertanto su questo che si è condotta l'analisi del credito LEED descritta nel capitolo 7.



---

## 6.1 Caso 1: pareti leggere

La prima soluzione, per quanto riguarda i pacchetti perimetrali, prevede oltre all'adozione dei pannelli Knauf, all'esterno Aquapanel, Vidiwall e GKB verso la superficie interna come da progetto, un'intercapedine d'aria di 50 cm ed uno strato da 12 cm di isolante Stiferite GT. Le pareti laterali esterne si differenziano solamente per lo strato più esterno che, invece di avere il pannello Aquapanel, presenta mattoni scuri a faccia vista (SantAnselmo - London).

Elemento ( <i>esterno</i> )	Spessore (cm)
AQUAPANEL	1,25
STIFERITE GT	12
AIRGAP	50
VIDIWALL	1,25
GKB	1,25

La differenza sostanziale quindi dalla soluzione di progetto sta nella scelta dell'isolante. Come si nota dalla tabella dei materiali nel Paragrafo 5.1.3 la Stiferite GT ha la conducibilità termica più bassa tra tutti gli isolanti utilizzati (0,024 W/m·K) ed una densità di 36 kg/mc.

Questo isolante risponde quindi perfettamente al bisogno di contenere al massimo i consumi invernali da un lato, e di costruire strutture leggere dall'altro.

Anche gli infissi si differenziano leggermente da quelli di progetto, con una stratigrafia 3-3-16-4-4 con lastre di vetro trattate (trasmissione pari a 2,528 W/m<sup>2</sup>·K).



---

## **6.2 Caso 2: schermature**

Questa seconda soluzione è identica alla precedente (Caso 1) con l'aggiunta di schermature esterne fisse ed interne con tendaggi ad asticelle ad alta riflettanza.

## **6.3 Caso 3: progetto**

La terza soluzione, che coincide con la modellazione del progetto descritto nei capitoli 4 e 5, si differenzia dalle precedenti per le stratigrafie delle pareti perimetrali, dei solai che danno verso ambienti non riscaldati (quello controterra e quello del secondo piano) e degli infissi, vetro e telaio. È prevista l'adozione delle schermature esterne ma non di quelle interne. Per quanto riguarda la ventilazione meccanica, in questa soluzione è stato inserito un recuperatore di calore.

---

## 6.4 Confronti tra i risultati

Si riportano di seguito i confronti più significativi tra i casi analizzati. Per rendere l'analisi più leggibile in ogni paragrafo è stato analizzato un singolo parametro (fabbisogni, apporti gratuiti, ecc.), e su questo si sono confrontati i casi ritenuti significativi.

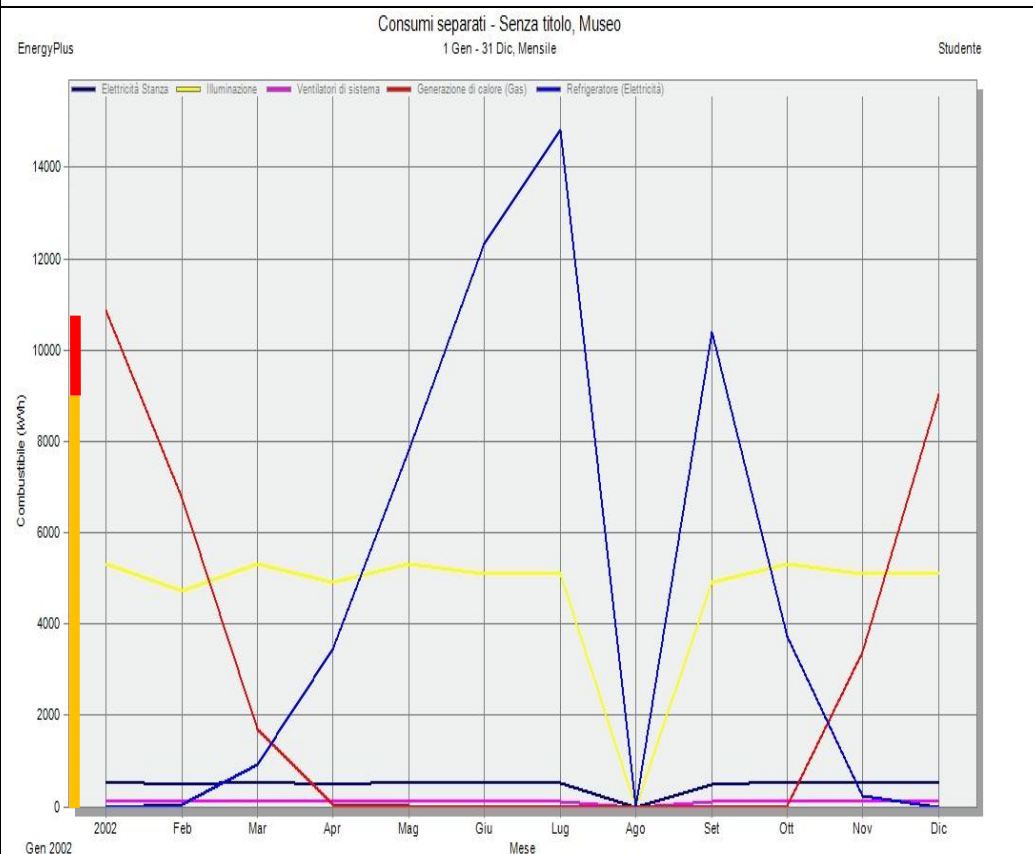
### 6.4.1 Fabbisogno $Q_h$ e $Q_c$

La tabella sottostante riassume i fabbisogni energetici dell'edificio ( $Q_h$  è il fabbisogno per il riscaldamento dove 'h' sta per heating,  $Q_c$ , cooling, quello di raffrescamento). È stato infine calcolato il confronto dei fabbisogni del Caso 1 e Caso 2 rispetto al Caso 3, che evidenzia in tutti e due i casi l'aumento percentuale dei consumi rispetto alla terza soluzione.

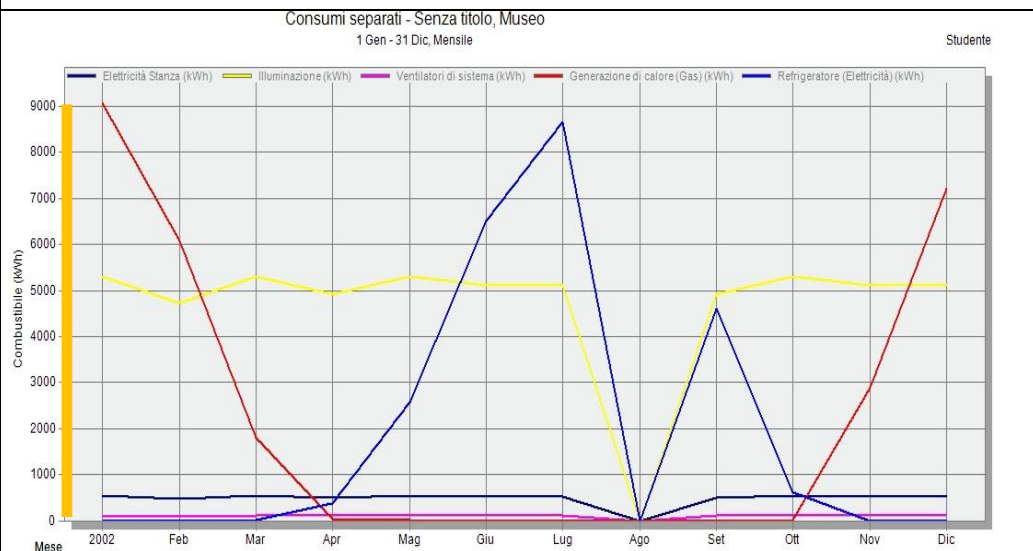
	$Q_h$ [KWh]	$Q_c$ [KWh]	confronto tra i consumi	
			$Q_h$	$Q_c$
<b>Caso 1</b>	26575	89736	17%	130%
<b>Caso 2</b>	30600	63101	35%	62%
<b>Caso 3</b>	22638	39026	-	-

I grafici sottostanti riportano la quantità (in kWh) e l'andamento, durante l'anno, del combustibile che il sistema edificio-impianto richiede per soddisfare le condizioni di set point immesse. È interessante notare il peso che ogni fonte di consumo ha sull'intero anno e la sostanziale diminuzione che si ha per il riscaldamento ed il raffrescamento nel Caso3 rispetto al Caso1.

### Caso 1

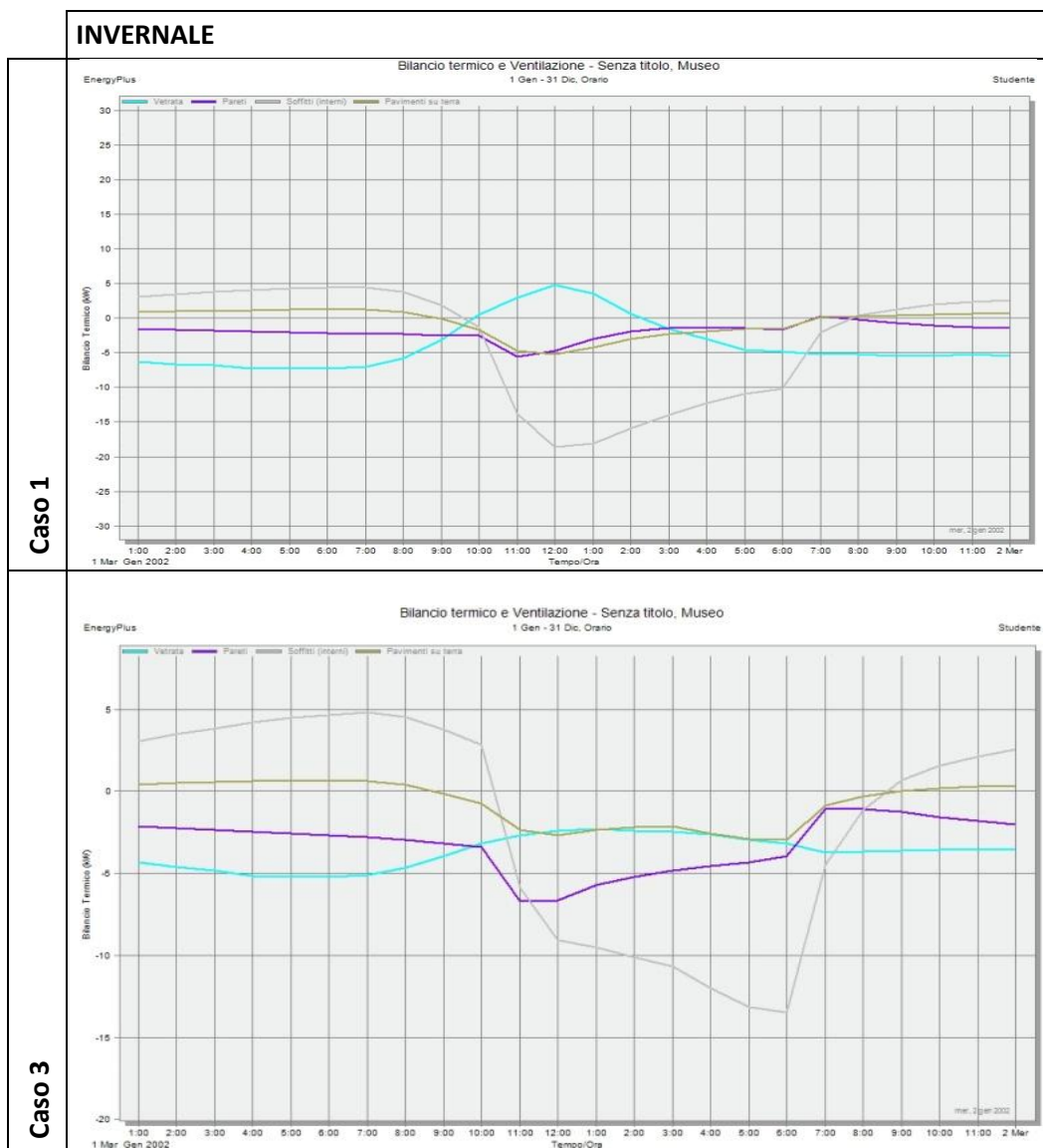


### Caso 3



## 6. 4.2 Comportamento pareti esterne, solai e vetrate

Il comportamento termico dell'edificio viene studiato facendo riferimento al sistema termodinamico costituito dall'aria all'interno dell'ambiente costruito. Il volume di controllo è quindi rappresentato dall'aria confinante con la superficie interna dell'involucro edilizio e con le superfici degli elementi interni (arredi, persone, impianti), le quali rappresentano la superficie di controllo (o superficie di frontiera) del sistema.



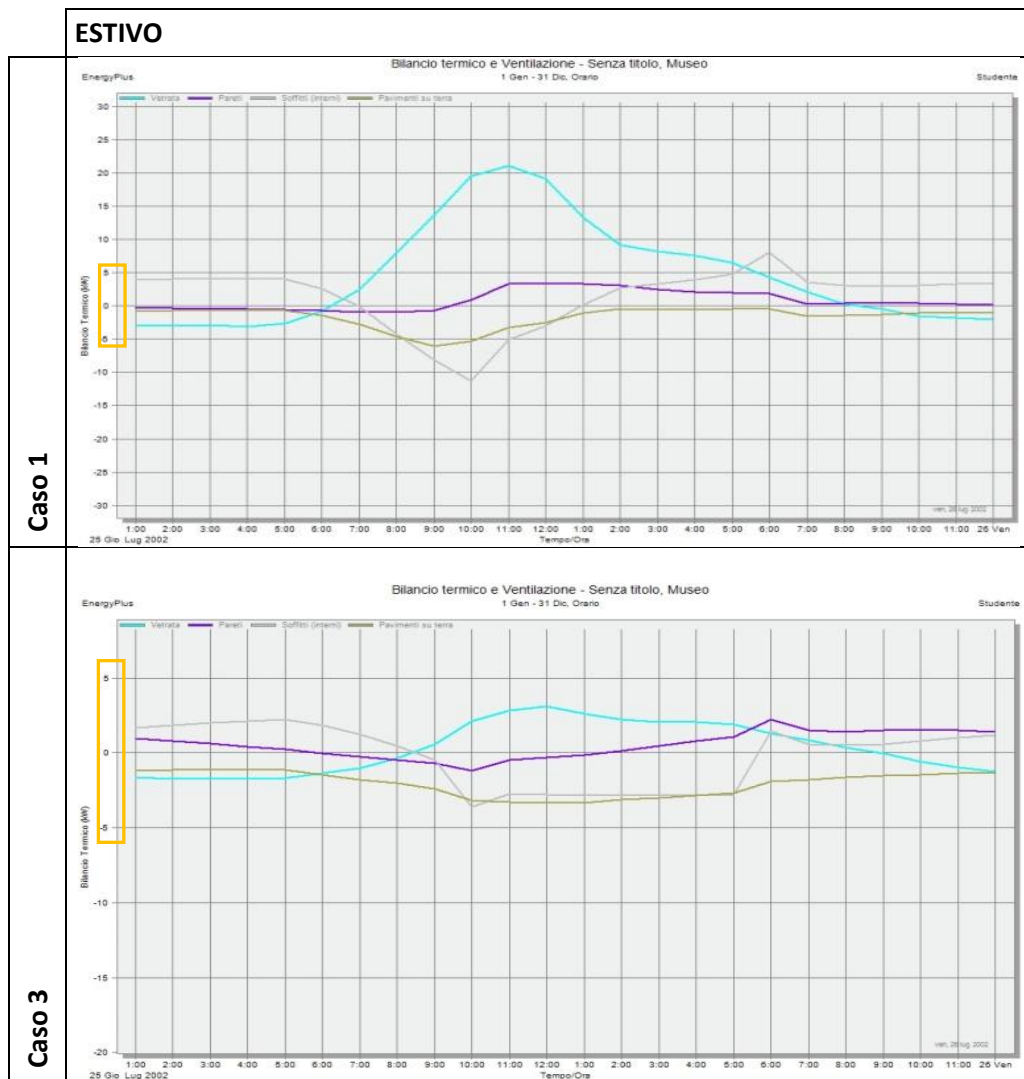
---

Per quanto riguarda la situazione invernale si può notare che:

- nella fase di preaccensione impianto (prima delle ore 10:00) l'andamento è uguale per ogni elemento; la vetrata, non essendo schermata, nel Caso 1 fornisce all'ambiente un contributo maggiore di apporti solari gratuiti;
- durante l'orario di funzionamento dell'impianto (10:00 - 18:00) gli elementi continuano ad avere un andamento uguale, ovvero disperdono calore verso l'esterno; si nota che nel Caso 3 il solaio verso il non scaldato *Soffitti (interni)* aumenta la sua dispersione. Ciò è dovuto alla sua massa che è maggiore rispetto al Caso 1;
- la vetrata schermata del Caso 3 non riesce ad apportare mai calore all'ambiente interno.

Durante i mesi estivi invece si scorgono importanti differenze per quanto riguarda l'intervallo di funzionamento dell'impianto:

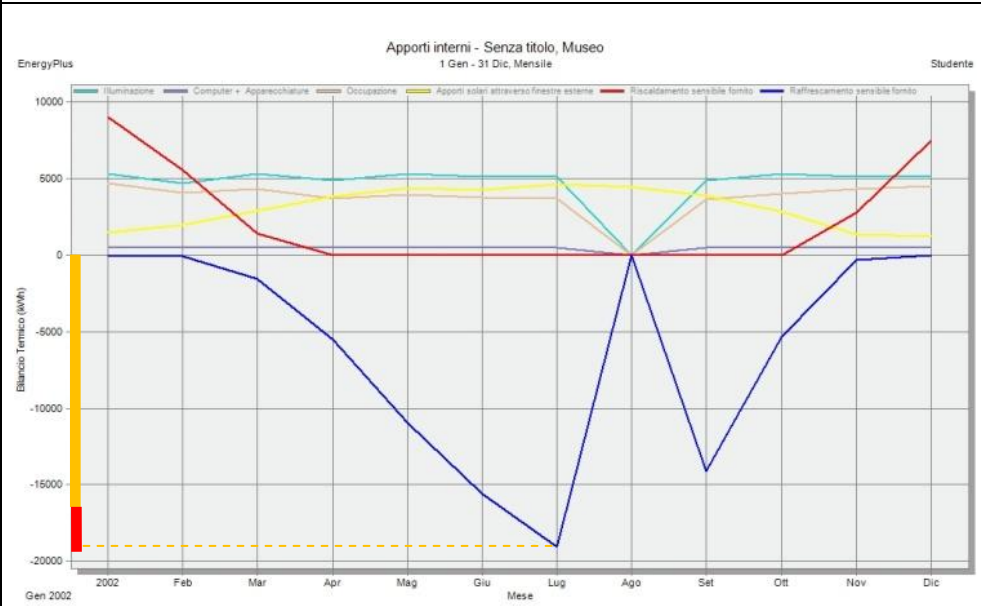
- nel primo caso le pareti ed il solaio rilasciano calore all'interno dell'ambiente già dalle ore 10:00. Questa situazione è estremamente gravosa per le prestazioni dell'impianto. Nel Caso 3 invece tutte le strutture hanno uno sfasamento decisamente migliore: il picco di apporto di calore delle pareti perimetrali avviene alle 18:00; il soffitto invece fino all'orario di spegnimento dell'impianto non cede mai calore all'ambiente interno, a differenza del primo caso;
- le superfici vetrate nel secondo caso (Caso 3) diminuiscono i loro apporti solari di quasi il 90%; questo forte miglioramento è dovuto all'inserimento delle schermature, che penalizzano leggermente il comportamento invernale ma si rendono fondamentali per l'estivo.



### 6. 4.3 Apporti interni

Si guardano ora gli apporti interni ed in particolare il ruolo che giocano le schermature degli infissi. Vengono confrontati solamente i primi due casi che si differenziano solo per la presenza di schermature nel Caso 2 rispetto al Caso 1 che ne è totalmente privo. Il Caso3 presenta le sole schermature esterne; perciò le principali considerazioni che riguardano il Caso2 valgono anche per il Caso3.

## Caso 1

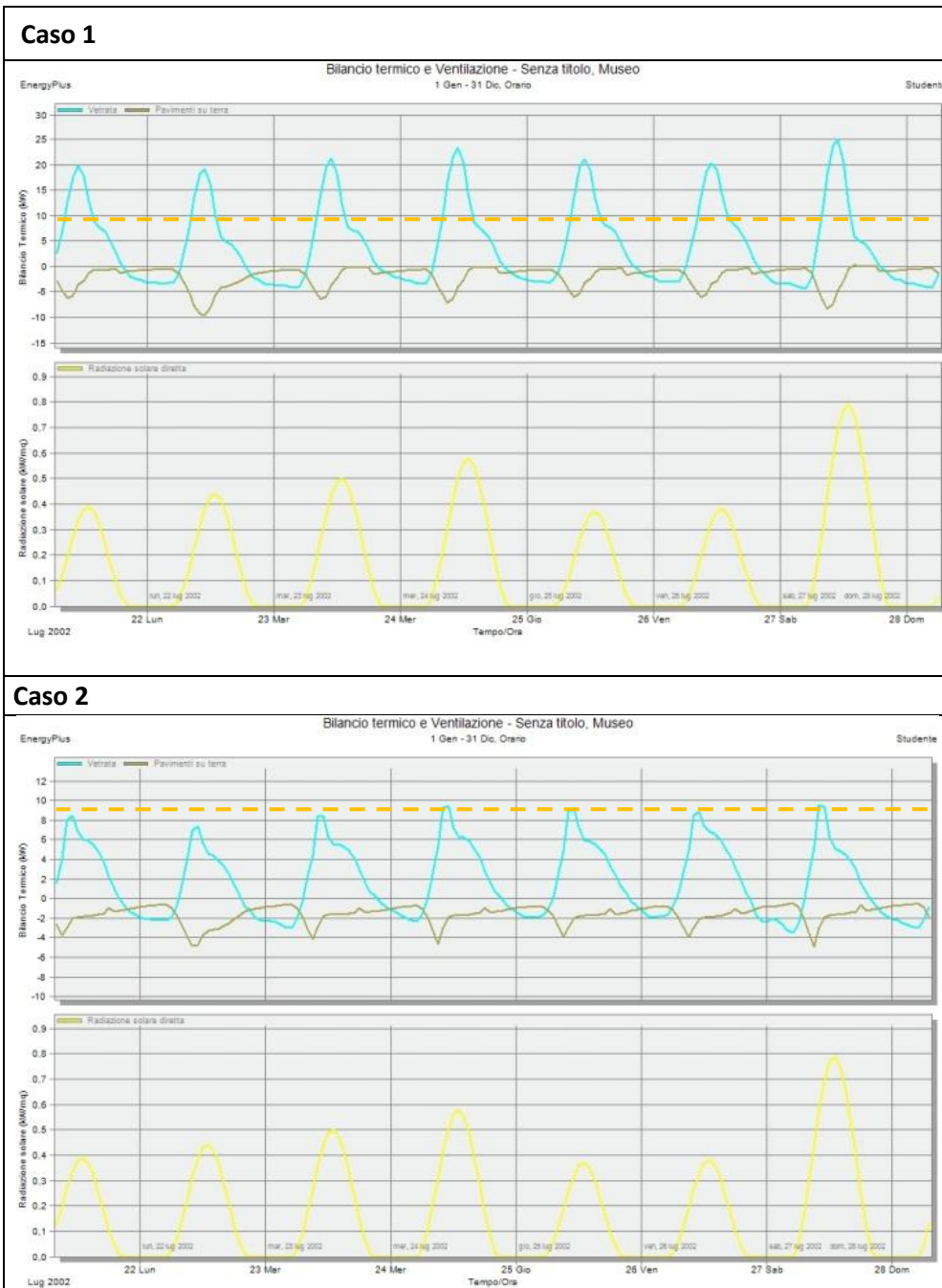


## Caso 2



Oltre alla evidente differenza di apporti solari (in giallo) che deriva dall'adottare la soluzione con le schermature o meno, si nota nel secondo caso un notevole risparmio di consumi per il fabbisogno del raffrescamento.

Nella tabella seguente si riporta l'andamento orario su una settimana estiva delle superfici vetrate e quello della radiazione solare diretta, per visualizzare il legame tra i due. La superficie trasparente, non avendo inerzia interna che apporti un minimo valore di sfasamento termico, segue esattamente il profilo della radiazione. Nei due differenti casi si visualizza ancora meglio l'incidenza della schermatura che abbatte, sull'ora, l'apporto solare del 50%.





---

#### **6. 4.4 Considerazioni finali**

Analizzando il comportamento degli elementi si è visto che in inverno il Caso 1 è quello che riesce a sfruttare al massimo gli apporti solari gratuiti in larga parte per l'assenza di schermature; questo vantaggio ai fini del contenimento dei consumi per il riscaldamento si contrappone a consumi estivi elevatissimi che rendono il Caso 1 il peggiore come comportamento globale sull'intero anno.

Guardando la simulazione annuale dell'intero sistema si nota infatti che il carico maggiore richiesto è in tutti i casi è quello del raffrescamento estivo, molto più alto del riscaldamento. È quindi ragionevole investire sulle schermature, che comportano una riduzione degli apporti solari gratuiti, rinunciando in parte ai benefici invernali in cambio di un netto miglioramento estivo. La stessa considerazione vale anche per la stratigrafia delle superfici vetrate, elemento che insieme alle schermature incide molto su questi aspetti.

Le stratigrafie del Caso 3, diverse da quelle del Caso 1 e 2 per gli isolanti utilizzati, consentono un lieve miglioramento della prestazione invernale e una diminuzione netta del fabbisogno per la climatizzazione estiva.

Da queste considerazioni si evince quindi che la soluzione costruttiva migliore risulta essere quella del Caso 3, non perché sia la migliore in assoluto sotto tutti gli aspetti (obiettivo impossibile viste tutte le variabili in gioco), ma perché combina gli elementi più vantaggiosi ottimizzando così i consumi invernali ed estivi.

---

## Capitolo 7 - Ottenimento del credito

In questo capitolo verrà analizzata la procedura portata avanti per l'ottenimento del credito 1 *Ottimizzazione delle prestazioni energetiche* della categoria LEED EA, illustrato nel paragrafo 3.1.1. per raggiungere il credito si è scelta l'opzione 2 *Simulazione energetica in regime dinamico dell'intero edificio* che chiede di dimostrare un miglioramento percentuale dell'indice di prestazione energetica dell'edificio di progetto rispetto al corrispondente edificio di riferimento.

### 7.1 Edificio di riferimento

Per determinare il miglioramento percentuale dell'edificio di progetto è stato necessario creare, nell'ambiente di modellazione DesignBuilder, l'edificio di riferimento secondo le linee guida imposte dall'Appendice G della norma ASHRAE 90.1 2007, come riportato già sopra nel paragrafo 3.2.2.

Si descrivono di seguito tutte le impostazioni che sono state modificate nel modello per ricavare l'edificio di riferimento partendo dall'edificio di progetto.

Profili di funzionamento: sono gli stessi di quelli da progetto; non è stata quindi apportata nessuna modifica.

Orientamento: questo requisito chiede di effettuare quattro diverse simulazioni per i quattro diversi orientamenti cardinali. Si è quindi ruotato l'edificio quattro volte dalla sua posizione vera di progetto di 90°C per volta.

---

Involucro: in questa sezione è richiesto di considerare, a livello di edificio, tutti gli elementi come leggeri, quindi impostando una capacità termica bassa. Per fare ciò è stato necessario cambiare dalle impostazioni generali del software ‘Opzione del modello dati’ la tipologia Dati di Costruzione e Vetrate da Generale a Pre Progetto che ha permesso di impostare in modo generale la capacità termica voluta. Inoltre è richiesto di utilizzare le trasmittanze termiche di tutti gli elementi coi valori minimi imposti da normativa (DAL 156/08), non interessa che sia presente la stratigrafia di progetto. La copertura deve avere una riflettanza pari a 0,30. Per la copertura è chiesto di modificare anche i valori dell’edificio di progetto: riflessione radiazione solare  $\geq 70\%$  e riflettanza  $\geq 45\%$ . In Design Builder la riflettanza della superficie viene calcolata come  $(1 - \text{assorbanza visibile})$ .

Finestre: su ogni facciata di ogni zona è stato necessario calcolare la percentuale di vetrata rispetto alla superficie opaca. Nel caso la percentuale di progetto sia minore del 40% i m<sup>2</sup> di superficie trasparente rimangono invariati; altrimenti si deve impostare il 40% della superficie lorda opaca. Le ombreggiature non devono essere considerate ed inoltre le finestre vanno poste a filo esterno.

Illuminazione: per l’edificio di riferimento si imposta la potenza di illuminazione secondo i limiti prescritti dalla norma americana ASHRAE 90.1 2007. I sistemi di controllo non sono obbligatori in questa modellazione.

Impianto: il dimensionamento dell’impianto dell’edificio di progetto è stato impostato in DesignBuilder su ‘Semplice’ che significa che i sistemi di HVAC sono stati calcolati in maniera semplificata e non sono modellati

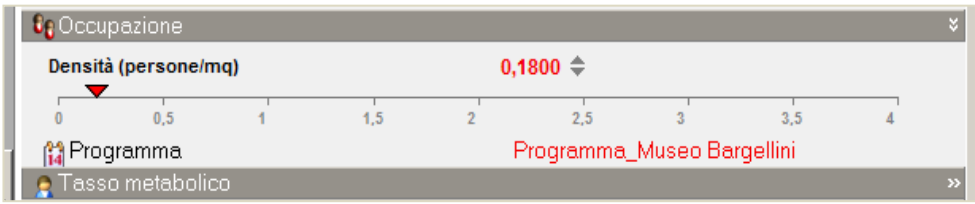
all'interno di EnergyPlus. Di seguito sono riportate le due formule utilizzate dal software per il dimensionamento della caldaia e del ciclo frigo:

*Caldaia = energia carichi termici da EnergyPlus / CoP sistema di riscaldamento*

*Ciclo frigo = energia di raffrescamento da EnergyPlus / CoP sistema di raffrescamento*

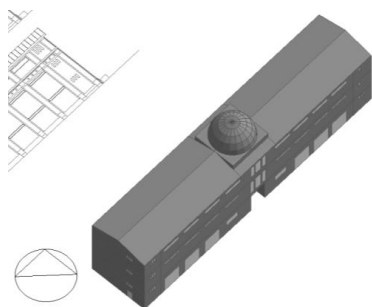
Per l'edificio di riferimento, innanzitutto, è stata inserita la stessa tipologia d'impianto ed inoltre sono stati cambiati i coefficienti per il dimensionamento: è stato sovradimensionato del 15% per il condizionamento e del 25% per il riscaldamento.

In funzione delle linee guida imposte dal sistema di rating LEED sono state prese soluzioni e fatte scelte per il caso in oggetto riassunte nella seguente tabella. Questa riassume l'approccio che si è dovuto utilizzare verso l'edificio di progetto e quello verso l'edificio di riferimento, suddivisa per tutte le variabili che incidono nella progettazione (profili di funzionamento, orientamento, involucro, etc. ).

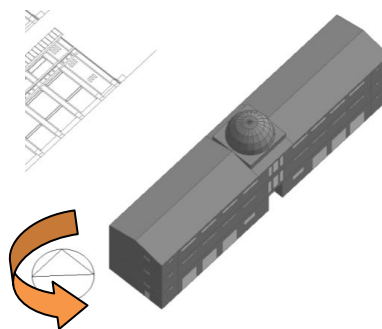
EDIFICIO DI PROGETTO	EDIFICIO DI RIFERIMENTO
<b>profili di funzionamento</b>	
profili di funzionamento realmente previsti nell'edificio	uguali a quelli di progetto
	

## orientamento

modellato come da progetto

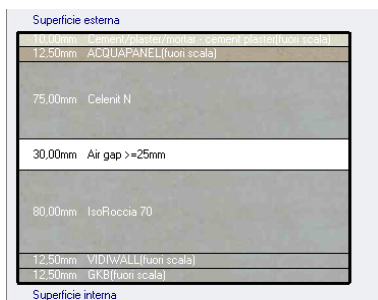


quattro simulazioni con modelli identici eccetto per l'orientamento: 0°C, 90°C, 180°C, 270°C.



## involucro

componenti dell'edificio come da elaborati progettuali



muri fuori terra, solai e coperture modellate con elementi leggeri con i valori massimi della trasmittanza U previsti dalla DAL 156/2008



disposizione e proprietà dei componenti finestrati come da elaborati progettuali	calcolata la percentuale di chiusure trasparenti verticali: per ogni zona finestrata si ha un valore minore del 40% della superficie lorda delle strutture opache verticali tranne che per quella del piano terra: aumentati i mq di superfici verticali trasparenti per questa zona.
presenti schermature esterne come da progetto	finestre poste a filo esterno delle pareti perimetrali senza alcuna schermatura solare
modellata la copertura con una riflessione di 0,70 ed emissività termica di 0,75. Riflettenza pari a 0,45	copertura modellata con un valore di riflettenza pari a 0,30
<b>sistemi di illuminazione</b>	
presente tutta la densità di potenza installata, sia interna che esterna, come da progetto	modellati utilizzando il Building Area Method dalla sezione 9.5 dell'ASHRAE 90.1-2007 e dalla sezione 9.4.5 per l'illuminazione esterna
Modellati anche i sistemi di controllo basati sulla luce naturale	sistemi di controllo non considerati

<b>tipologia degli impianti HVAC</b>	
autodimensionato come da progetto	Il rendimento medio stagionale è stato definito da ASHRAE G311A e B, che risulta essere come dalla DAL 156/08. L'impianto di raffrescamento sovradimensionato del 15%; quello di riscaldamento del 25%.
<b>energia di processo</b>	
consumo pari a quello installato da progetto	identica a quella di progetto
<b>conversione in energia primaria</b>	
per il gas naturale fattore di conversione pari a 1; pari a 2,17 per l'elettricità da norma EN 15603	uguali a quelli usati nel progetto

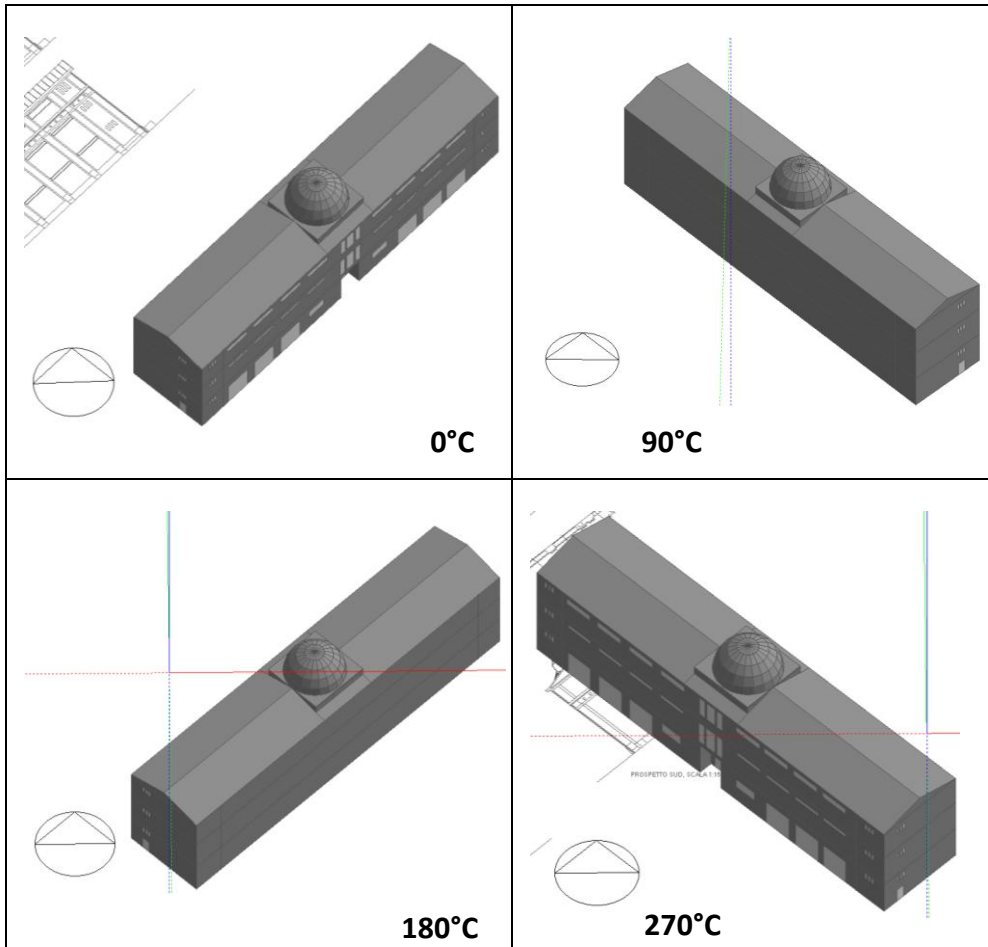
---

## 7.2 Confronto dei risultati

Terminata la modellazione dell'edificio di riferimento secondo i parametri imposti da LEED, è stata effettuata la simulazione. Innanzitutto per l'edificio orientato come da progetto, cioè con la sua posizione reale; in seguito è stato fatto ruotare di 90°, poi di 180° ed infine di 270°. Di ognuna di queste simulazioni sono stati registrati i consumi di energia fornita in funzione dell'impiego finale, ovvero per il riscaldamento, raffrescamento, per i ventilatori e pompe, per l'illuminazione interna ed esterna ed infine per l'energia di processo, che rappresenta tutti i consumi di energia che non sono contenuti nelle precedenti voci, includendo a titolo indicativo apparecchiature per uffici e per uso generico, lavatrici ed asciugatrici, illuminazione non inclusa nell'ammontare della potenza elettrica per illuminazione ammissibile ed altre voci di consumo come ad esempio pompe per la movimentazione dell'acqua da giardino.

Di questi valori riferiti ai quattro diversi orientamenti (riportati nella sequenza sotto) è stata poi calcolata la media, che è quella che serve per determinare la percentuale di energia primaria risparmiata ai fini dell'ottenimento del credito LEED.





*Figura 11: modello dell'edificio di riferimento nei quattro orientamenti utilizzati*

Si può quindi riassumere e semplificare questa fase di rotazione prendendo come punto di riferimento la parete maggiormente vetrata. Da progetto (0°C) la superficie vetrata è esposta a SUD-EST. Di conseguenza:

0°C	90°C	180°C	270°C
S-E	N-E	N-O	S-O

Di seguito è allegata la tabella delle performance dell'edificio creata in Excel per effettuare il confronto finale suddivisa per impiego finale, con

tutti i valori dell'edificio di riferimento per le quattro diverse rotazioni, la loro media, i rispettivi fattori di conversione delle diverse fonti energetiche, i valori dell'edificio di progetto ed infine il miglioramento percentuale di fabbisogno di energia primaria.

			edificio di riferimento							
			rotazione 0°C		rotazione 90°C		rotazione 180°C		rotazione 270°C	
impiego finale	fonte energetica	fattori di conversione	E primaria [KWh]	E fornita [KWh]	E primaria [KWh]	E fornita [KWh]	E primaria [KWh]	E fornita [KWh]	E primaria [KWh]	E fornita [KWh]
riscaldamento degli ambienti	gas naturale	1	36358	36358	39252	39252	39425	39425	35675	35675
raffrescamento degli ambienti	elettricità	2,17	122538	56368	96404	44346	94846	43629	122228	56225
ventilatori	elettricità	2,17	1874	862	1874	862	1874	862	1874	862
illuminazione interna	elettricità	2,17	122124	56177	122124	56177	122124	56177	122124	56177
illuminazione esterna	elettricità	2,17	4742	2182	4742	2182	4742	2182	4742	2182
energia di processo	elettricità	2,17	12375	5693	12375	5693	12375	5693	12375	5693
pompe	elettricità	2,17	5835	2684	5835	2684	5835	2684	5835	2684
<b>totale</b>	-	-	305846	160322	282606	151195	281221	150651	304854	159498

impiego finale	fonte energetica	fattori di conversione	edificio di riferimento		edificio di progetto		miglioramento percentuale	progetto VS rotazione 0°C
			Media		E primaria [KWh]	E fornita [KWh]	energia [%]	
			E primaria [KWh]	E fornita [KWh]				
riscaldamento degli ambienti	gas naturale	1	37677	37677	15938	15938	58%	56%
raffrescamento degli ambienti	elettricità	2,17	109004	50142	76914	35380	29%	37%
ventilatori	elettricità	2,17	1874	862	1874	862	0%	0%
illuminazione interna	elettricità	2,17	122124	56177	85059	39127	30%	30%
illuminazione esterna	elettricità	2,17	4742	2182	4742	2182	0%	0%
energia di processo	elettricità	2,17	12375	5693	12375	5693	0%	0%
pompe	elettricità	2,17	5835	2684	5835	2684	0%	0%
<b>totale</b>	-	-	293632	155416	202738	101866	<b>31%</b>	<b>34%</b>

*Tabella 3: tabella riassuntiva delle performance degli edifici modellati*

L'ultima colonna è stata aggiunta per esplicitare il miglioramento percentuale di fabbisogno di energia primaria tra l'edificio di progetto e quello di riferimento orientato come il progetto. Ciò è stato fatto per evidenziare la differenza di metodo di LEED (media dei valori sui quattro orientamenti) ed un confronto tra il progetto ed uno uguale con parametri minimi da normativa.

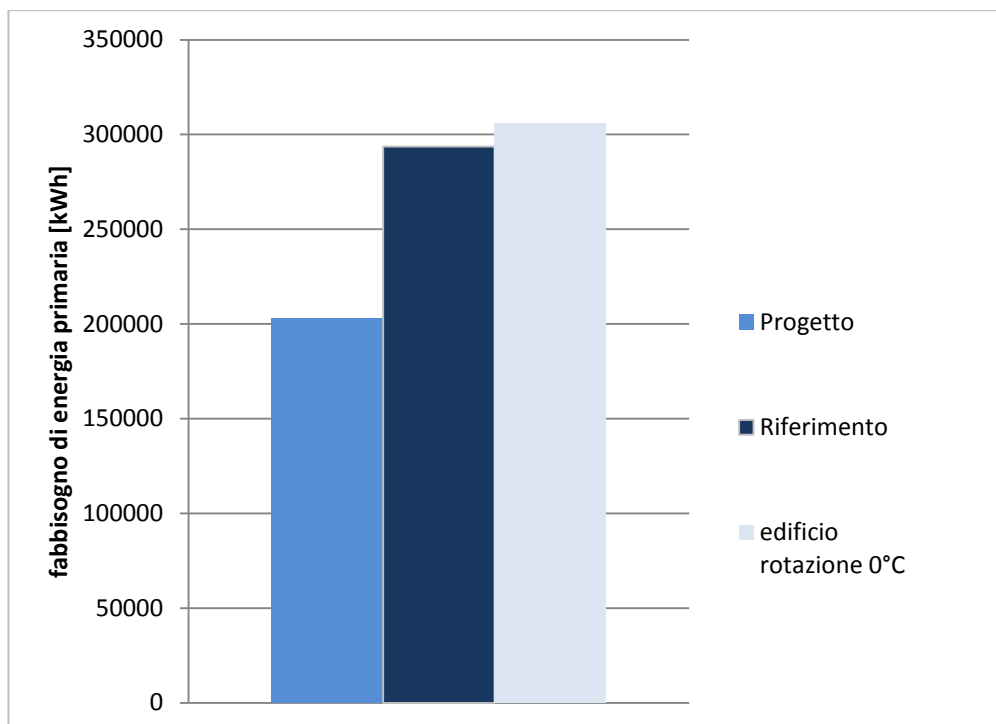


Figura 12: consumi dei tre edifici studiati per i confronti finali

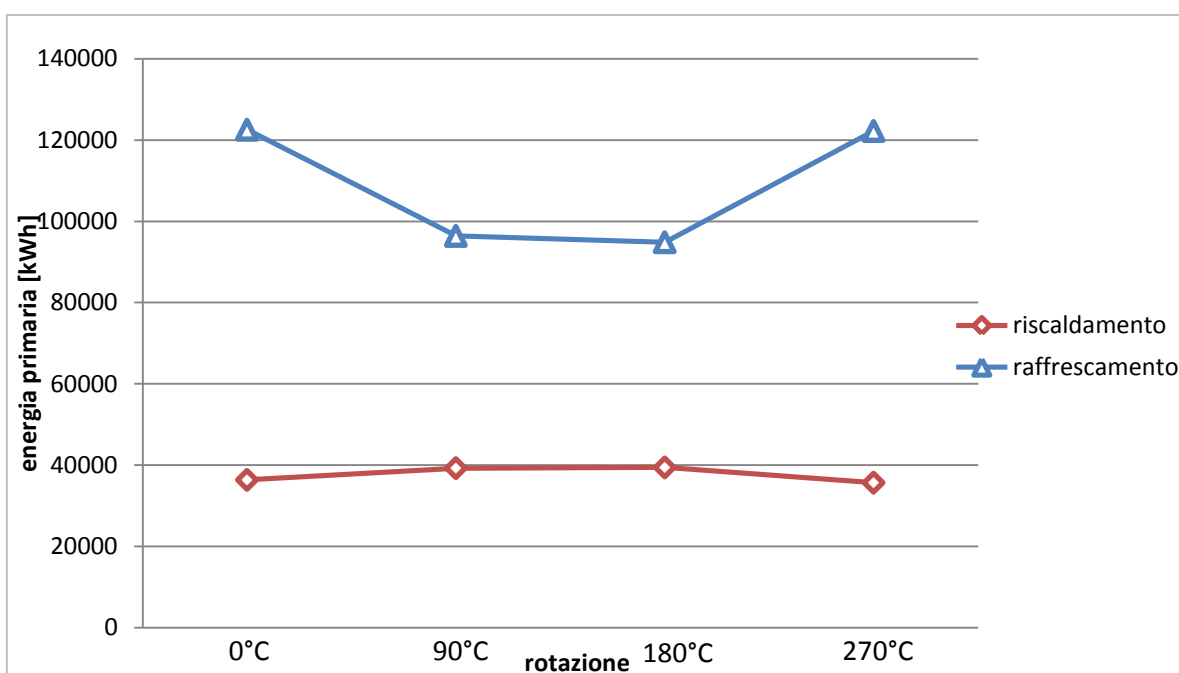


Figura 13: andamento dell' energia primaria per riscaldamento e raffrescamento nell'edificio di riferimento per i 4 diversi orientamenti

---

Come si evince dalla tabella delle performance dell'edificio (*Tabella 3*) il risparmio finale in termini di fabbisogno di energia primaria è del 31%. Ciò significa che per la certificazione LEED si acquisiscono *10 punti*.

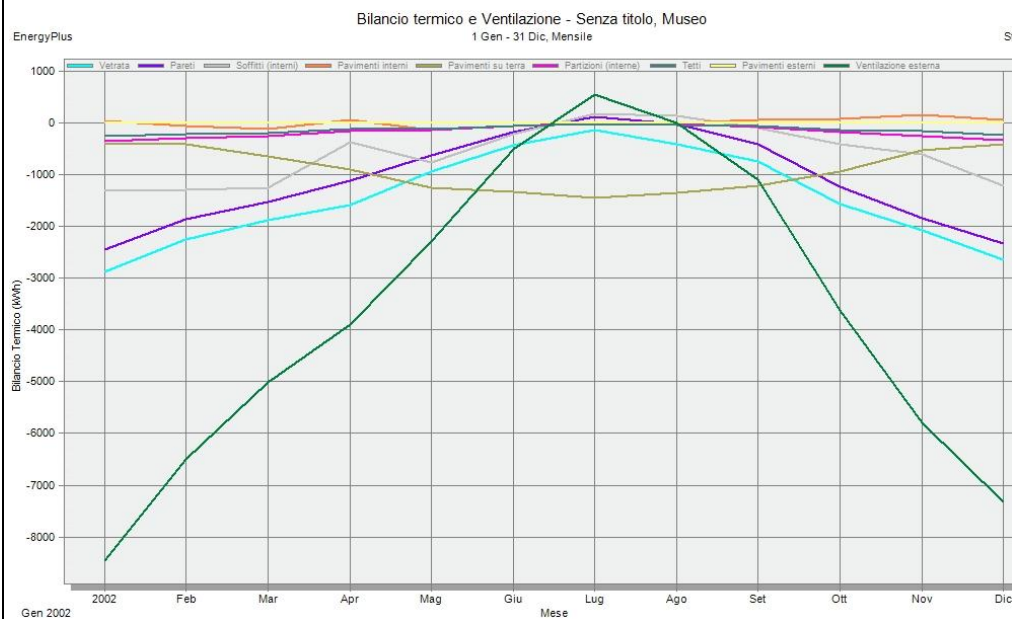
Per completezza di valutazione si deve sottolineare il fatto che in questa modellazione col calcolo dinamico non è stato possibile considerare il ruolo delle fonti rinnovabili, invece previste nel progetto. Si può quindi affermare che si avrà sicuramente un abbassamento dei rispettivi fabbisogni, quindi una diminuzione ulteriore dei consumi dell'edificio.

### **7.3 Confronto delle simulazioni**

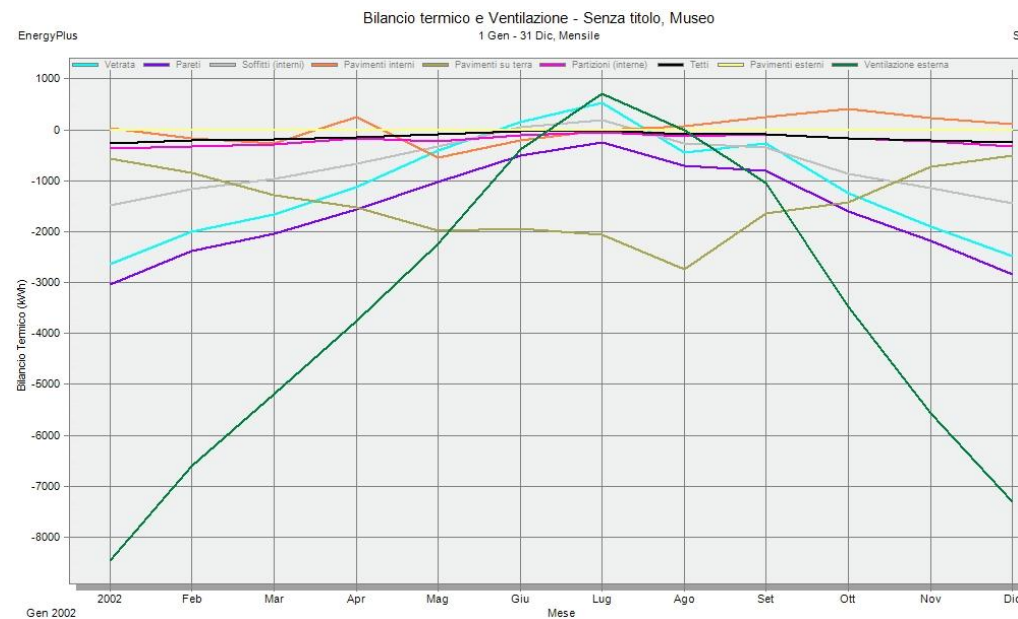
Dopo aver confrontato l'edificio di progetto e quello di riferimento in funzione del fabbisogno di energia primaria, è stato interessante effettuare il confronto, con conseguenti considerazioni, dei grafici riportanti gli andamenti annuali, mensili, giornalieri ed orari, dei flussi di calore attraverso gli elementi componenti l'edificio e l'andamento annuale dei consumi.

Si riportano di seguito tutti i grafici che sono risultati significativi ed esplicativi delle diverse opzioni che contraddistinguono i due edifici.

## EDIFICIO DI PROGETTO

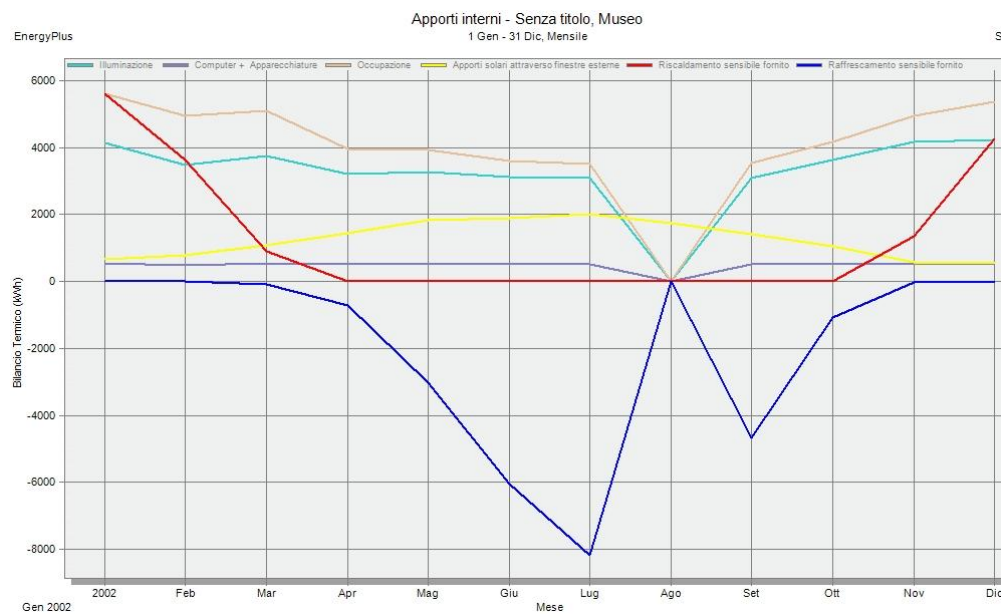


## EDIFICIO DI RIFERIMENTO

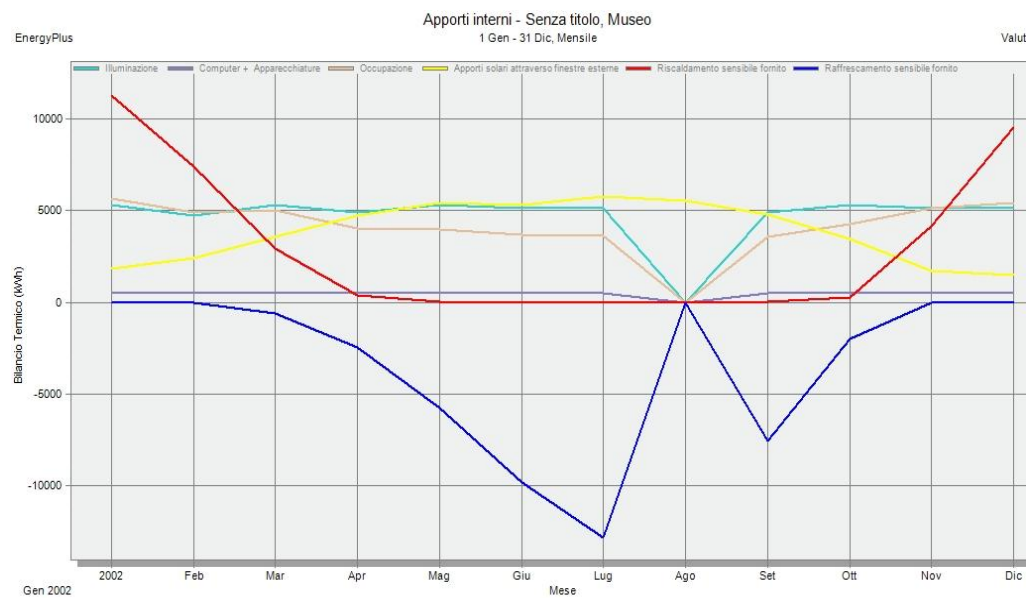


Sono ben visibili i diversi comportamenti su scala annuale del *pavimento su terra* (linea verde oliva): nel caso del progetto la sua dispersione è, in media, la metà ed inoltre presenta un andamento più omogeneo. Lo stesso lo si nota per i *pavimenti interni* (linea arancione). Un'altra differenza tra i due casi la si nota sui valori di dispersione delle *vetrate* (linea azzurra) e delle *pareti* perimetrali (linea viola): mantengono entrambi gli elementi un comportamento simile nei due casi, ma nel riferimento le pareti hanno maggiori dispersioni. Le superfici *vetrate* invece disperdono poco di più nel progetto, il che risulta essere svantaggioso in inverno ma durante l'estivo diventa una risorsa. In ogni caso queste ultime, sull'anno, hanno un andamento più compatto nel progetto rispetto al riferimento.

## EDIFICIO DI PROGETTO

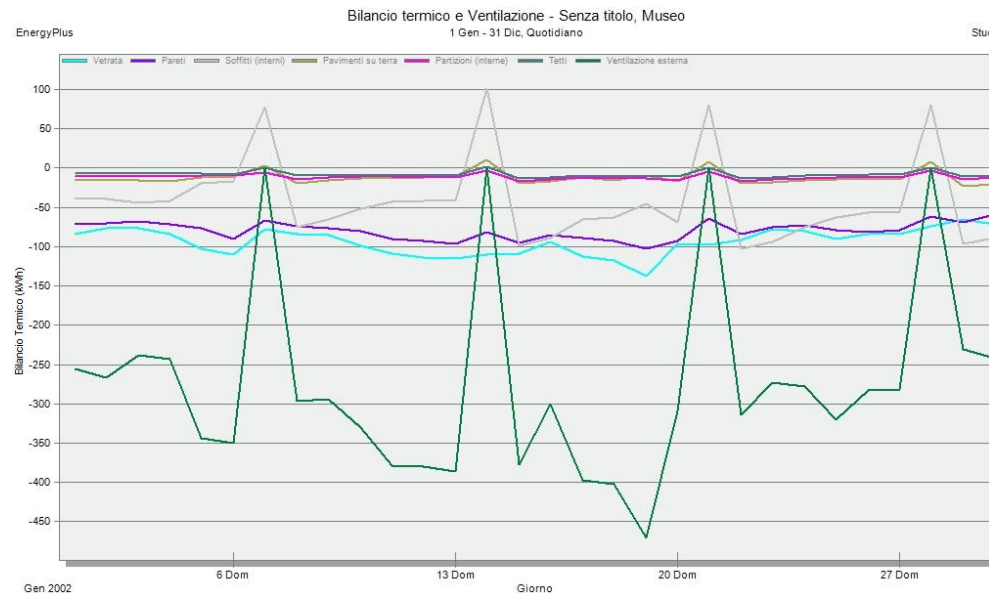


## EDIFICIO DI RIFERIMENTO

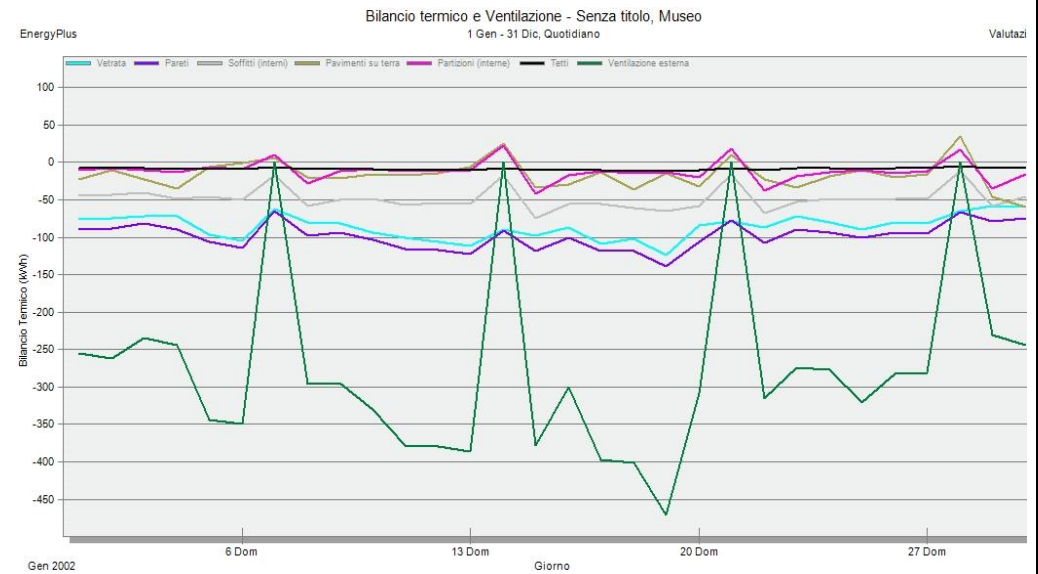


La prima notazione da fare per la lettura di questi due grafici è l'ordine di grandezza dei kWh di consumi che li differenzia: il *riscaldamento* (linea rossa) ed il *raffrescamento forniti* (linea blu) giocano il ruolo predominante. Nel caso di progetto infatti il consumo di picco di questi è rispettivamente di 5600 kWh e di 8000 kWh contro i 10200 kWh e i 10500 kWh dell'edificio di riferimento: oltre all'involucro più performante il progetto presenta infatti nell'impianto un recuperatore di calore. Guardando invece il comportamento dell'*illuminazione* (linea azzurra) fornita nel caso di progetto si nota, innanzitutto, minore consumo ed, inoltre, un comportamento differente dal riferimento dato dai sistemi di controllo della luce naturale installati nel caso di progetto. Infine gli *apporti solari* (linea gialla): il comportamento tra i due è molto simile, ma nel primo caso sono inferiori di meno della metà, dato imputabile del tutto alla presenza delle schermature esterne.

## EDIFICIO DI PROGETTO



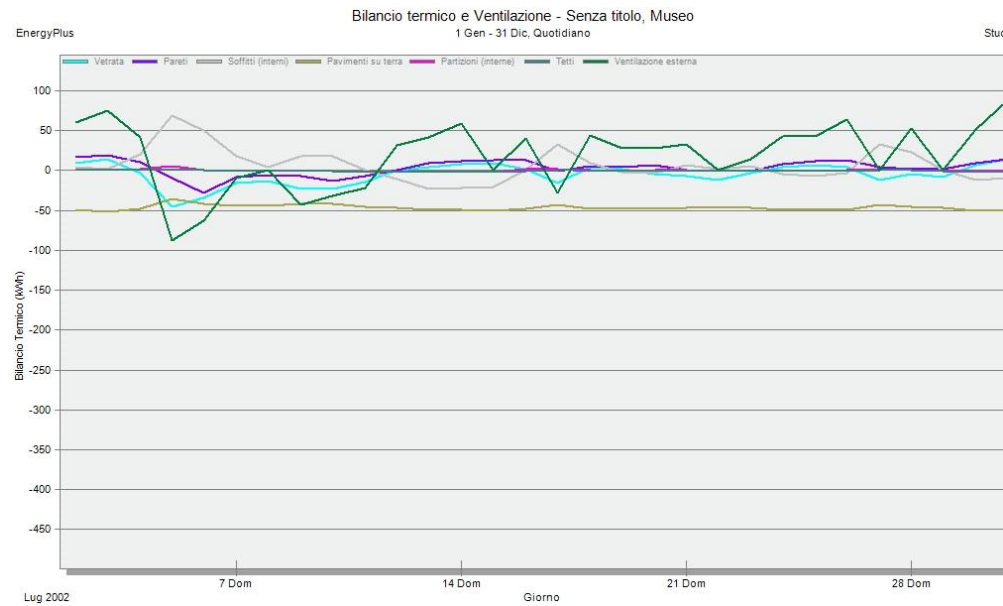
## EDIFICIO DI RIFERIMENTO



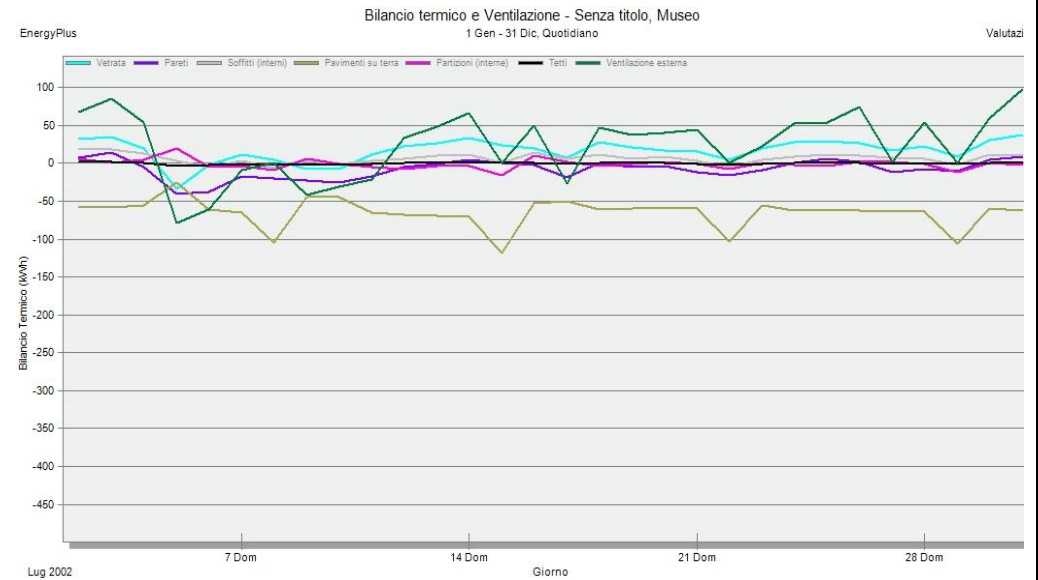
Questi grafici mostrano gli andamenti giornalieri dei flussi di calore riportati su un intero mese invernale (gennaio). Si nota distintamente il buon comportamento delle *partizioni interne* (linea rosa) che nel progetto presentano infatti un andamento molto omogeneo e compatto vicino all'asse dello zero, equilibrio tra interno ed esterno. Si può notare il comportamento dei *soffitti interni* (linea grigia) che nel progetto hanno una maggiore inerzia termica, rispetto al riferimento, evidente soprattutto nel giorno di spegnimento dell'impianto (lunedì) in cui rilasciano calore all'interno dell'ambiente scaldato.



## EDIFICIO DI PROGETTO

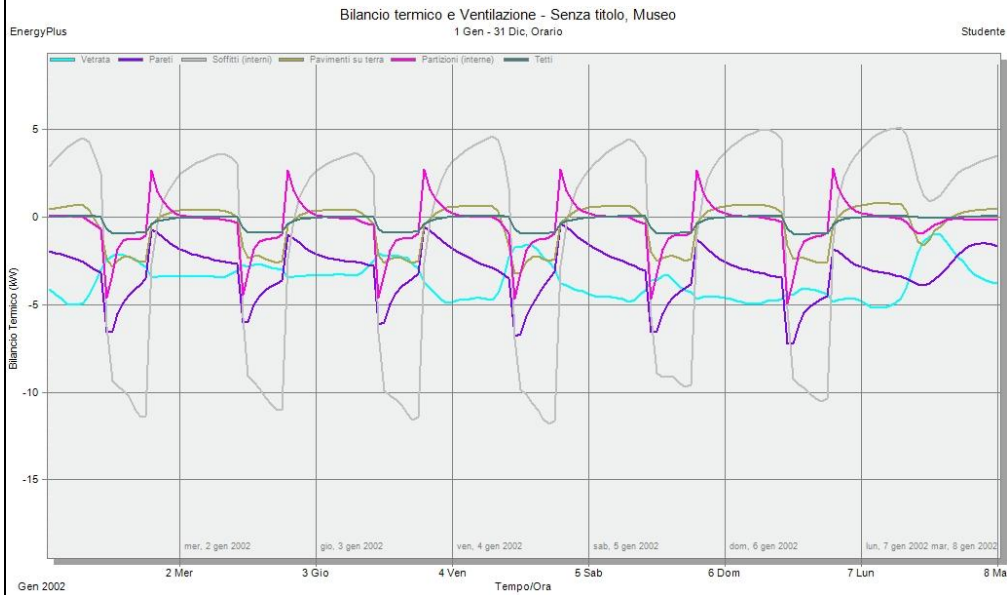


## EDIFICIO DI RIFERIMENTO

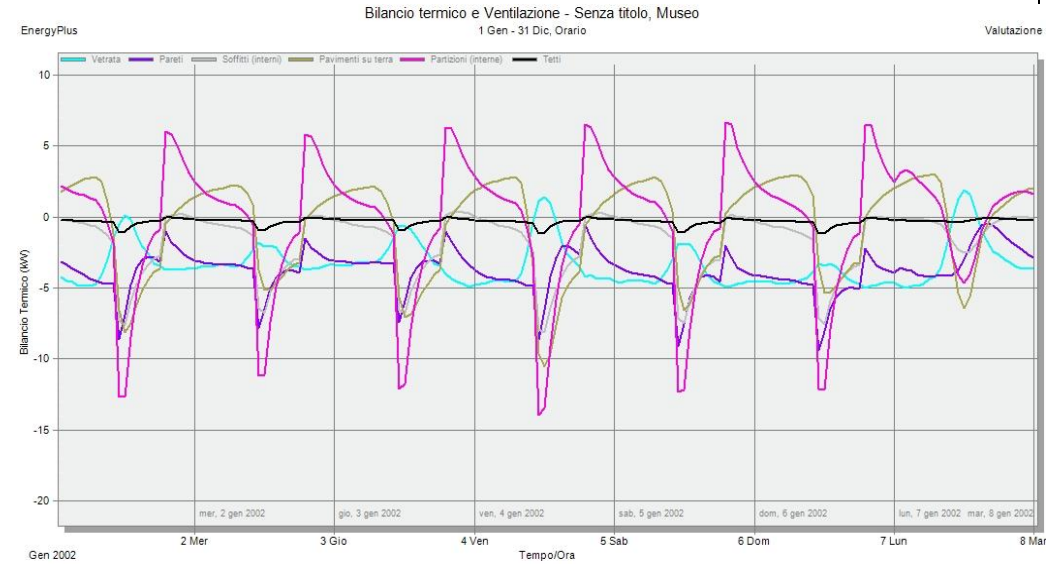


Report analogo al precedente, caso estivo (luglio): si nota il comportamento vantaggioso delle *vetrate* di progetto che non danno apporti interni, a differenza di quelle dell'edificio di riferimento. In ultimo si nota meglio, rispetto al riferimento annuale, l'andamento omogeneo del *pavimento su terra* dell'edificio di progetto rispetto a quello di riferimento.

## EDIFICIO DI PROGETTO

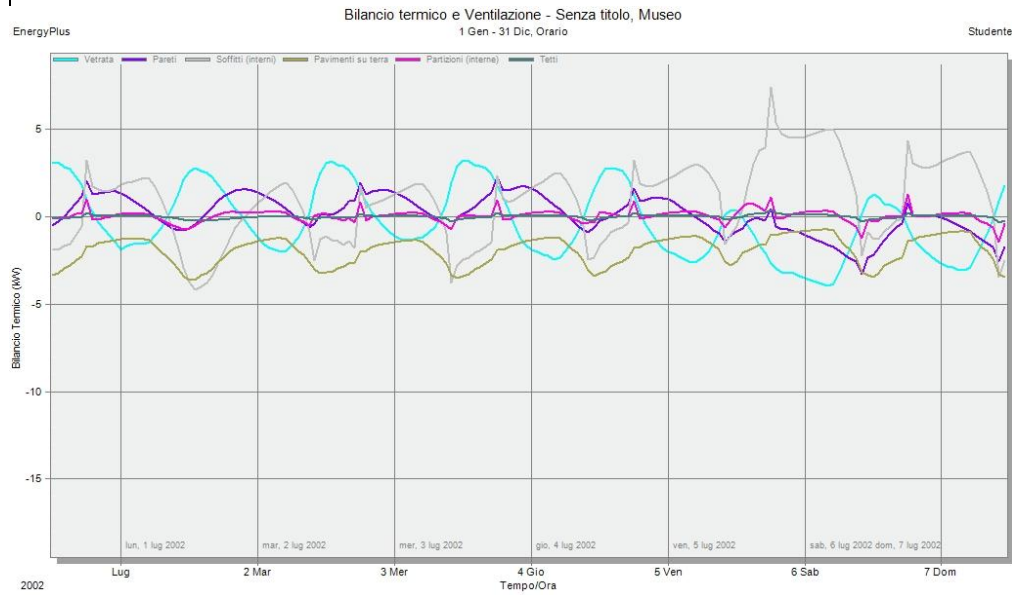


## EDIFICIO DI RIFERIMENTO

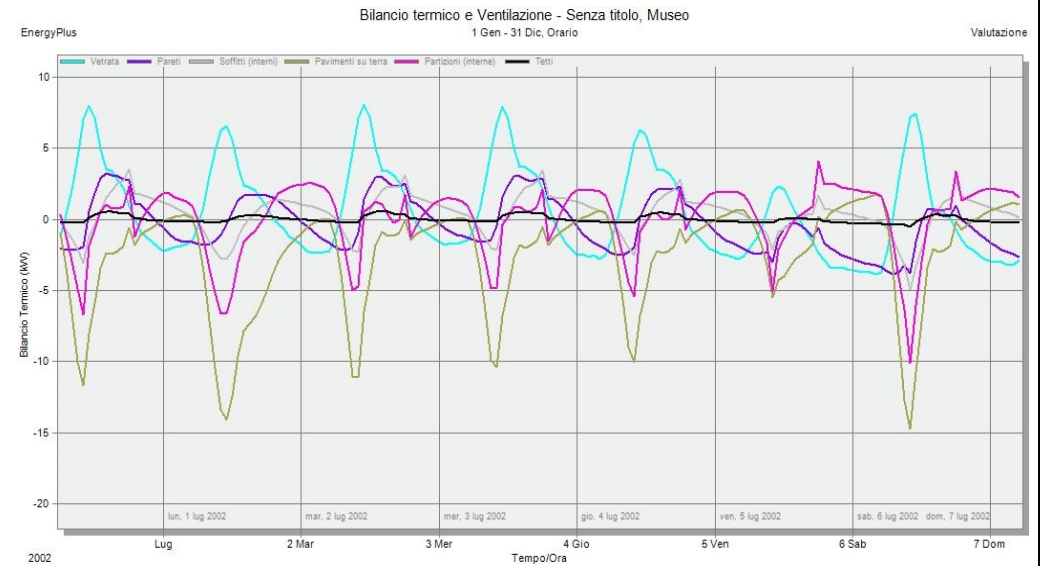


Il grafico illustra l'andamento orario dei flussi termici nell'arco di una settimana invernale (1-8 gennaio). Il comportamento delle *pareti* (linea viola) è analogo per entrambe le soluzioni; in quella di progetto si hanno dei picchi di dispersioni leggermente inferiori. Il *pavimento su terra* (linea verde oliva) presenta un comportamento più performante nella soluzione di progetto in quanto ha minor scostamento dall'asse neutro.

## EDIFICIO DI PROGETTO

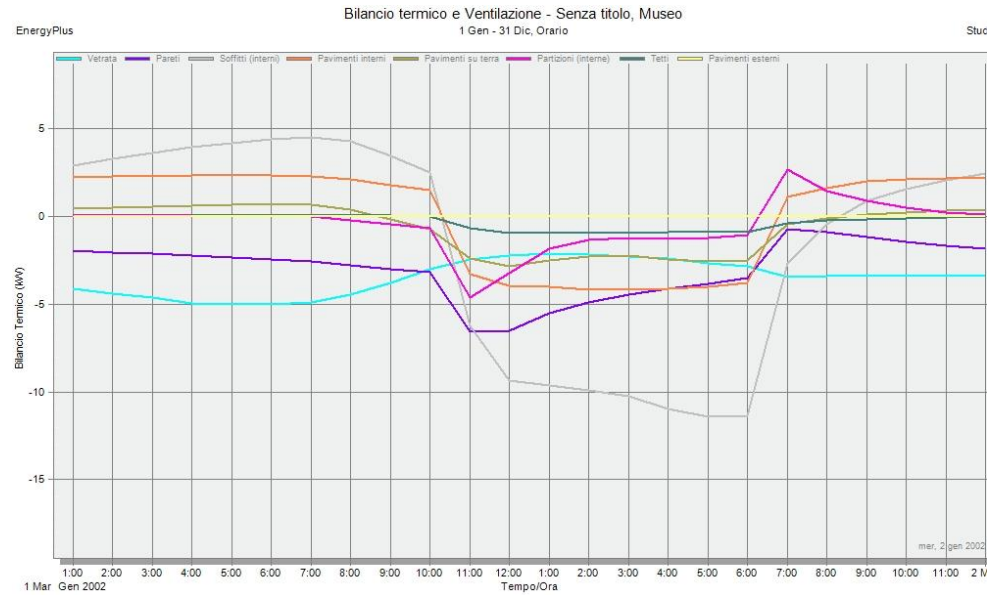


## EDIFICIO DI RIFERIMENTO

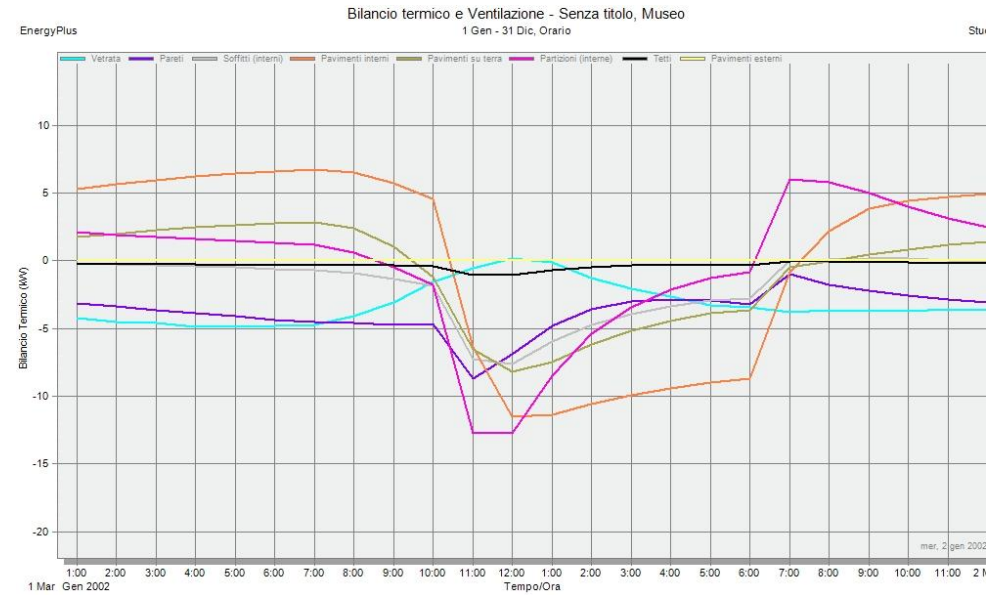


Il grafico illustra l'andamento orario dei flussi termici nell'arco di una settimana estiva (1-8 luglio). Nel caso estivo è più immediato notare l'andamento delle vetrate: nel caso di progetto presentano un andamento molto più omogeneo e performante dato che i valori di apporti solari sono inferiori a quelli dell'edificio di riferimento. Una notazione va fatta anche per il *pavimento su terra* che, anche in questa stagione, presenta un ottimo comportamento nel caso di progetto. Nel caso di riferimento si ha, in media, una diminuzione delle dispersioni durante la settimana perché, dopo il lunedì giorno di chiusura, l'ambiente interno dell'edificio va via via raffrescandosi, diminuendo così la temperatura dell'elemento e avvicinandosi di più alla temperatura del terreno.

## EDIFICIO DI PROGETTO

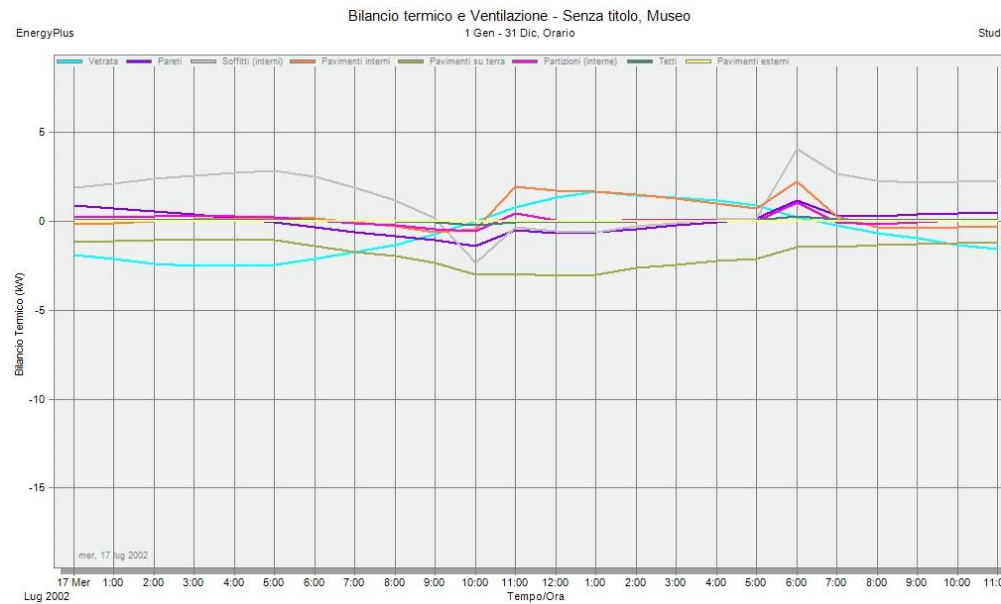


## EDIFICIO DI RIFERIMENTO

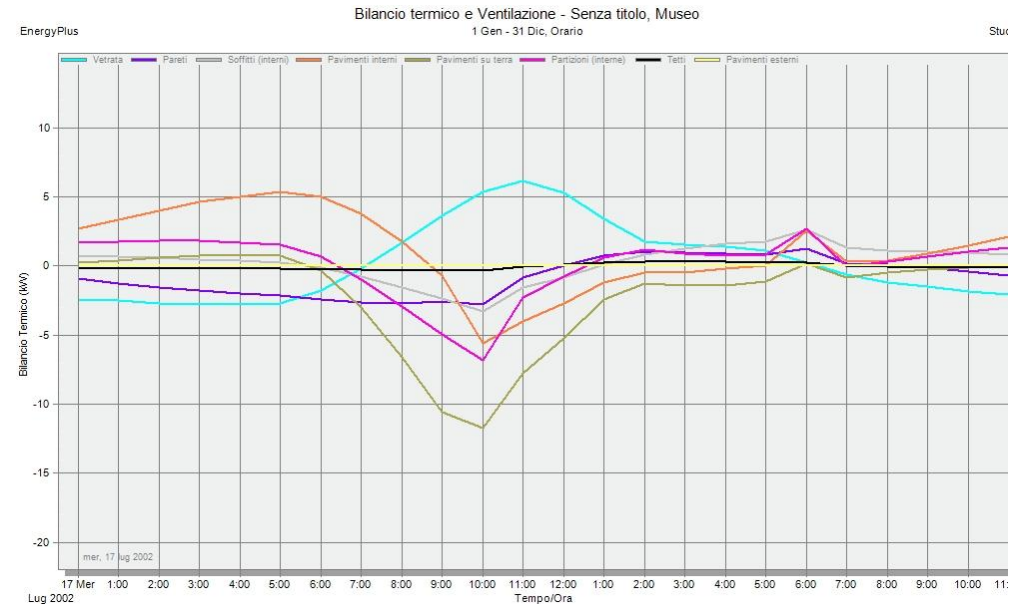


Su tale report, che mostra l'andamento orario nell'arco di una sola giornata invernale, è interessante focalizzare l'attenzione sui comportamenti delle *pareti* (linea viola) e quello del solaio dell'ultimo piano che è esposto verso il sottotetto non scaldato (*soffitti*, linea grigia): l'andamento delle prime è uguale per i due casi; quello del solaio invece ha un comportamento molto differente e, nello specifico, quello di riferimento è migliore poiché ha una dispersione inferiore, a quella da progetto, durante l'orario di funzionamento dell'impianto (10:00-18:00).

## EDIFICIO DI PROGETTO



## EDIFICIO DI RIFERIMENTO



Andamento orario nell'arco di una sola giornata estiva: la soluzione di progetto prevede elementi con ottime prestazioni poiché, come si nota dal grafico, gli andamenti sono tutti molto vicini all'asse dello 0, cioè alla situazione di scambio termico nullo tra l'interno dell'elemento e l'ambiente interno. Il *soffitto* (linea grigia) è l'unico che presenta valori di dispersione ed apporti interni più importanti: anch'esso è però performante in quanto, avendo una sua inerzia termica elevata, rilascia nell'ambiente il calore accumulato dalla radiazione solare esattamente nell'orario di chiusura dell'edificio, il che significa non sovraccaricare ulteriormente l'impianto. Il suo sfasamento è quindi l'optimum che si potesse raggiungere. Gli elementi del caso di riferimento invece cominciano a rilasciare calore nell'ambiente interno dall'orario di apertura.

---

## Conclusioni

A conclusione dell'intero lavoro si può quindi affermare che il primo obiettivo che si era prefissato, verificare l'ottenimento di un punteggio elevato ai fini della certificazione LEED, è stato raggiunto con successo. Il confronto tra l'edificio di progetto e l'edificio di riferimento imposto dal protocollo LEED, ai fini della valutazione del miglioramento percentuale di fabbisogno di energia primaria, ha fatto emergere un risparmio di consumi pari al 31%: si sono raggiunti perciò 10 punti su 19. Questo punteggio non è il massimo ottenibile da questo edificio, poiché questa modellazione col calcolo dinamico non tiene conto dell'impianto reale dell'edificio e del ruolo delle fonti rinnovabili, invece previste nel progetto. Si può quindi affermare che, con un calcolo più approfondito anche lato impianto, si potrebbe ottenere una diminuzione ulteriore dei consumi dell'edificio.

Si evince, in secondo luogo, che il metodo utilizzato è risultato affidabile: è stato testato lo studio del comportamento termoenergetico dinamico del museo MAGI '900 col software di calcolo DesignBuilder. La simulazione dinamica, su tutte le diverse soluzioni progettuali analizzate, ha portato risultati coerenti, visibili in termini di comfort interno, di flussi termici dell'involucro, quindi di consumi. Questo approccio di calcolo si dimostra utilizzabile non solo in ambiti di ricerca, ma anche più ad ampio raggio in ambiti professionali, sia in un'ottica di certificazione LEED sia, in prospettiva, per lo studio di edifici a energia quasi zero.

Sempre sull'utilizzo del software di calcolo è necessario riferire che la quantità di input ed output è elevata: risulta indispensabile una conoscenza

---

approfondita dei fenomeni fisici che influenzano il comportamento del sistema ed anche l'entità delle varie interazioni, quindi i parametri che caratterizzano il sistema. Pertanto l'utilizzo di tale strumento in ambito professionale è possibile solo da parte di tecnici specializzati che conoscano nel dettaglio le basi teoriche della materia.

La simulazione dinamica dell'edificio ha dimostrato un grande vantaggio: essere un ausilio alla progettazione. Le stratigrafie dei pacchetti murari, dei solai, degli infissi sono state infatti definite a valle di diverse opzioni studiate ed analizzate tramite gli output del software, quali il comfort, lo sfasamento delle pareti e dei solai. Le simulazioni dinamiche esportate da DesignBuilder, in particolare quelle con intervallo orario, giocano un ruolo molto importante soprattutto per analizzare il caso estivo. Permettono infatti di visualizzare comportamenti negativi degli elementi, dovuti per esempio ad uno sfasamento troppo basso della struttura, non percepibili da un calcolo tradizionale. Tali anomalie, se non individuate e corrette in fase di progettazione, potrebbero compromettere il comfort dell'edificio una volta costruito. Da qui l'importanza della progettazione integrata che, come in questo caso, richiede una grande flessibilità e collaborazione da parte di tutti gli attori del processo edilizio, dall'ambito architettonico a quello strutturale a quello impiantistico, fino ad arrivare alla gestione dell'edificio.

Un aspetto solo accennato in questa tesi che meriterebbe di essere approfondito in maniera dettagliata è la modellazione dell'impianto: una simulazione dinamica dell'intero sistema edificio-impianto darebbe la possibilità di avvicinare maggiormente il comportamento dell'edificio modellato ed il comportamento dell'edificio reale. Le novità tecnologiche

---

degli impianti termici e le norme in continua evoluzione che ne disciplinano il calcolo richiedono sempre più una simulazione dettagliata anche della modellazione lato impianto: in questo campo i software di calcolo tradizionali si stanno continuamente aggiornando e migliorando, ed è la frontiera in cui dovrà addentrarsi anche il calcolo dinamico.

In conclusione si può affermare che, comprovata l'importanza dell'edilizia sia in campo industriale che in quello economico e la grande responsabilità che essa ha sulla qualità della vita e dell'ambiente, risulta essenziale investire sul metodo appena indagato ed analizzato.

Dal lavoro svolto si evince infatti che lo studio del comportamento termoenergetico in campo dinamico è un utile strumento per migliorare la progettazione dell'edificio ai fini di un abbattimento del fabbisogno di energia, massimizzando il comfort interno, e di una riduzione dei costi di manutenzione e di esercizio relativi a tutto il ciclo di vita dell'edificio.



---

## **Bibliografia**

- Manuale LEED Italia Nuove Costruzioni e Ristrutturazioni, Edizione 2009 Ristampa 2011
- EnergyPlus - University of Illinois and University of California, *EnergyPlus, Engineering Reference, The Reference to EnergyPlus Calculations - October 2011*
- 90.1 User's Manual ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1 – 2004, Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings
- Guida AICARR, Editoriale Delfino - Marco Filippi e Enrico Fabrizio, *Introduzione alla simulazione termoenergetica dinamica degli edifici*
- A.L. Pisello, F. Cotana, R. Barone, V. Romagna and M. Bobker, *On optimizing energy efficiency of a complex multipurpose building through dynamic simulation and operations rescheduling*
- Lamberto Tronchin, Kristian Fabbri, *Energy performance building evaluation in Mediterranean countries: comparison between software simulations and operating rating simulation*

## **Normativa tecnica**

- ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1 – 2007, Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings
- UNI/TS 11300-1:2008 “Prestazione energetiche degli edifici – Determinazione del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione estiva ed invernale”

- 
- UNI/TS 11300-2:2008 “Prestazione energetiche degli edifici – Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria”
  - UNI EN ISO 13790:2008 “Prestazione energetica degli edifici – Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento”
  - UNI EN 15265:2008 “Prestazione energetica degli edifici – Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti mediante metodi dinamici – criteri generali e procedimenti di validazione”

### **Webgrafia**

[1] [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/)

[2] [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

[3] [www.gbcitalia.org](http://www.gbcitalia.org)

[4] [www.designbuilder.co.uk/helpv3.0/](http://www.designbuilder.co.uk/helpv3.0/)

[5] [www.magi900.com](http://www.magi900.com)

[6] [www.comune.pievedicento.bo.it](http://www.comune.pievedicento.bo.it)

[7] [www.tutorcasa.it/articoli/certificazione\\_energetica.htm](http://www.tutorcasa.it/articoli/certificazione_energetica.htm)