POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica, Aerospaziale, dell'Autoveicolo e della Produzione

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi della normativa e progettazione preliminare di impianti di produzione di energia rinnovabile nell'Innovation Hub di Aquiraz



Relatore

Prof. Masoero Marco

Candidato

De Amicis Federico

Sommario

1		Intro	oduzi	one	1
2		Casc	stu	dio: Innovation Hub di Aquiraz	2
3		Qua	dro r	normativo del Brasile per edifici commerciali e di servizio	4
	3.	1	Zon	izzazione bioclimatica del Brasile	6
	3.	2	Req	uisiti minimi dell'involucro edilizio	9
		3.2.2	1	Prestazioni termiche	9
		3.2.2	2	Prestazioni acustiche	11
		3.2.3	3	Requisiti di illuminazione	14
		3.2.4	1	Requisiti di ventilazione naturale	16
	3.	3	Etic	hetta energetica secondo RTQ-C	17
4		Soft	ware	utilizzati	20
	4.	1	Soft	ware di simulazione	20
		4.1.2	1	EnergyPlus	20
		4.1.2	2	Radiance	23
	4.	2	Inte	rfacce grafiche	23
		4.2.2	1	OpenStudio	23
		4.2.2	2	DesignBuilder	26
5		Veri	fica d	dei requisiti minimi da normativa	27
	5.	1	Veri	fica mediante calcoli	27
		5.1.3	1	Verifica delle prestazioni termiche dei componenti di involucro	27
		5.1.2	2	Verifica dei requisiti di ventilazione naturale	38
		5.1.3	3	Verifica dei requisiti di illuminazione naturale	40
		5.1.4	1	Calcolo etichetta energetica dell'edificio	41
	5.	2	Veri	fica mediante simulazione dinamica	48
		5.2.2 dell'	_	Verifica termica dell'involucro edilizio mediante verifica della temperatura interna	48
		5.2.2	2	Verifica dell'illuminazione naturale mediante simulazione dinamica	60
6		Ener	gia e	elettrica	80
	6.	1	Stim	na dei consumi elettrici dell'edificio mediante simulazione dinamica	80
		6.1.2	1	Illuminazione	80
		6.1.2	2	Apparecchiature elettriche	82
		6.1.3	3	Aria condizionata	84
		6.1.4	4	Consumi elettrici totali	86
	6.	2	Stud	dio di fattibilità di produzione di energia elettrica mediante fonti rinnovabili	87

	6.2.	Utilizzo dell'eolico	87
	6.2.	Fotovoltaico	90
7	Ana	isi dell'etichetta energetica secondo RTQ-C al variare dei dispositivi dell'impianto	di di
cc	ondizior	amento	101
	7.1	Analisi senza considerare l'eventuale punteggio bonus per energie rinnovabili	102
	7.2	Analisi considerando l'eventuale punteggio bonus per energie rinnovabili	102
8	Con	lusioni	104
9	Bibl	ografia	106

1 Introduzione

La trattazione seguente descrive il lavoro fatto da me nello svolgimento della tesi in azienda presso Planet Idea, *competence center* del gruppo Planet Smart City. Nello specifico si è analizzato l'edificio principale, che prende il nome di Innovation Hub, della *smart city* di Aquiraz in Brasile.

Il lavoro è diviso in due argomenti principali: il primo riguarda la verifica del rispetto delle normative tecniche dell'edificio e il secondo è incentrato su una proposta progettuale per l'edificio in ambito delle energie rinnovabili.

Per quanto riguarda il primo argomento si è prima eseguita un'analisi delle normative tecniche del Brasile e in seguito si è svolta la verifica della conformità del progetto alle norme in vigore mediante calcoli e simulazioni dinamiche. In questa prima parte dello studio sono stati inoltre descritti i software utilizzati per quanto riguarda la parte di simulazione.

Nella seconda parte si sono analizzati i carichi elettrici interni ed esterni dell'edificio e nel seguito si sono eseguiti uno studio di fattibilità e un progetto preliminare per lo sfruttamento di fonti rinnovabili per la produzione di energia elettrica.

È stata eseguita per l'edificio in questione anche la valutazione dell'etichetta energetica e un'analisi della stessa in funzione dei diversi dispositivi dell'impianto di condizionamento che non sono ancora noti.

Questo testo sarà una relazione tecnica in cui si sono messe in evidenza le linee guida per eseguire la verifica delle normative e per la progettazione preliminare di impianti di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili.

2 Caso studio: Innovation Hub di Aquiraz

L'Innovation Hub è costituito da diversi ambienti con molteplici destinazioni d'uso: oltre a ospitare diverse attività commerciali, dispone di sale per eventi, feste e attività condivise e offre inoltre l'opportunità di vedere dimostrazioni delle soluzioni innovative implementate nella Smart City (Planet Smart City, 2021).



Figura 1. Render dell'Innovation Hub

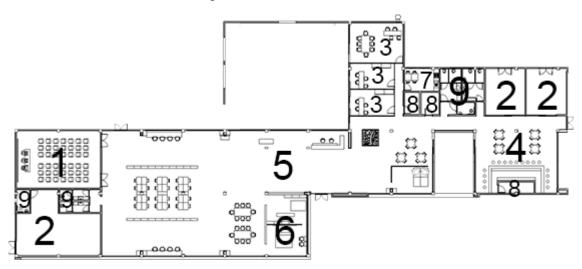


Figura 2. Pianta dell'Innovation Hub con destinazioni d'uso dei locali

In Figura 2 vengono numerati i locali in base alla destinazione di uso:

- 1. cinema;
- 2. sale commerciali;
- 3. uffici;
- 4. caffetteria;
- 5. *hall*, la quale ospita la reception e zone con vari utilizzi, tra cui aree per il coworking, per le riunioni o per i bambini;
- 6. biblioteca degli oggetti, un ambiente che, oltre a fungere da deposito degli oggetti disponibili da prendere in prestito, è concepito per ospitare tavoli da lavoro che gli abitanti possono occasionalmente utilizzare;
- 7. cucina;
- 8. depositi;
- 9. WC maschili, femminili e per disabili.

3 Quadro normativo del Brasile per edifici commerciali e di servizio

Non esistendo norme specifiche in Brasile a riguardo delle prestazioni termiche degli edifici commerciali e di servizio, si applicano le norme relative agli edifici residenziali per la verifica dell'Innovation Hub con le necessarie limitazioni.

Attualmente sono in vigore due norme inerenti alle prestazioni degli edifici:

- NBR 15220 (2005);
- NBR 15575 (2013).

Entrambe sono emanate dall'Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), il quale è responsabile della creazione degli standard brasiliani e fa parte dell'International Organization for Standardization (ISO). In particolare, l'organismo di riferimento è il Comitê Brasileiro de Construção Civil (ABNT/CB-02) che si occupa della standardizzazione nel campo edilizio.

La *NBR 15520* è suddivisa in cinque parti nelle quali vengono definiti i metodi per calcolare e valutare le proprietà termiche degli elementi costruttivi:

- parte 1: Definizioni, simboli e unità;
- parte 2: Metodi per il calcolo della trasmittanza termica, della capacità termica, dello sfasamento termico e del fattore di assorbimento solare dei componenti dell'edificio;
- parte 3: Zonizzazione bioclimatica brasiliana e linee guida costruttive per abitazioni unifamiliari di interesse sociale;
- parte 4: Misura della resistenza termica e della conduttività termica secondo il principio della piastra calda e protetta;
- parte 5: Misura della resistenza termica e della conducibilità termica mediante il metodo flussimetrico.

La NBR 15575 è suddivisa in sei parti:

- parte 1: Requisiti generali;
- parte 2: Requisiti strutturali;
- parte 3: Requisiti per le pavimentazioni;
- parte 4: Requisiti per le chiusure verticali esterne e interne;
- parte 5: Requisiti per le coperture;

• parte 6: Requisiti per i sistemi idrosanitari.

In entrambe le norme vengono considerate le proprietà termiche degli elementi costruttivi, quali la trasmittanza termica, il fattore di assorbimento solare, la capacità termica e altri parametri riferiti all'involucro edilizio.

Leggi locali possono modificare l'applicabilità delle norme citate in precedenza (Planet Smart City, 2019).

Oltre alle suddette norme, il testo fondamentale è il *Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas* (RTQ-C), pubblicato dall'*Instituto nacional de metrologia, qualidade e tecnologia* (Inmetro) per la prima volta nel 2010 e revisionato varie volte negli anni, di cui l'ultima revisione è entrata in vigore nel 2021 (Instituto nacional de metrologia, qualidade e tecnologia (Inmetro), 2021).

Il regolamento ha come obiettivo l'ottenimento dell'etichetta energetica dell'edificio, mostrando in particolare quali sono i parametri che maggiormente influenzano le prestazioni energetiche degli edifici commerciali. L'etichetta è rilasciata dal *Brazilian Labeling Program* (PBE) *Edifica Label*, in collaborazione con *Inmetro* ed *Eletrobras/PROCEL Edifica*, in seguito a un'ispezione effettuata da un tecnico dell'*Organismos de Inspeção creditados* (OIA).

Il RTQ-C fornisce una classificazione degli edifici in base all'efficienza di tre sistemi:

- involucro edilizio,
- illuminazione,
- condizionamento dell'aria.

Inoltre, punti bonus possono essere ottenuti nei seguenti casi:

- utilizzo di sistemi che razionalizzano l'uso dell'acqua,
- utilizzo di fonti di energia rinnovabile per il riscaldamento dell'acqua,
- utilizzo di fonti di energia rinnovabile per la produzione di corrente elettrica (eolico o fotovoltaico),
- utilizzo di sistemi di cogenerazione e sistemi innovativi,
- utilizzo di ascensori con determinate etichette energetiche secondo VDI 4707.

I tre elementi fondamentali più i punti bonus forniscono i valori da utilizzare in un'equazione per ottenere il punteggio per l'etichetta energetica. Tale punteggio è condizionato inoltre da determinati requisiti generali che l'edificio deve rispettare:

- separazione degli impianti elettrici in base alla destinazione d'uso;
- sistemi di riscaldamento dell'acqua.

L'etichettatura può essere fatta sia in fase di progetto dell'edificio sia per un edificio costruito in precedenza.



Figura 3. Esempio di etichetta energetica di edificio commerciale, di servizi o pubblico (PBE Edifica, 2020)

In *Figura 3*, viene illustrato un esempio di etichetta energetica per un edificio commerciale, di servizi o pubblico. Nella parte superiore sono indicati i dati inerenti all'edificio esistente o di nuova costruzione. Nella parte centrale è riportato il punteggio totale e la classificazione dell'edificio, composta di classi energetiche da A (più efficiente) a E (meno efficiente). Nella parte inferiore vengono forniti i dati, i punteggi e le relative classificazioni energetiche dei diversi componenti dell'etichetta citati in precedenza.

3.1 Zonizzazione bioclimatica del Brasile

La definizione dei requisiti minimi per gli edifici varia in relazione alla zona bioclimatica di appartenenza del sito di progetto.

La suddivisione del Brasile in zone bioclimatiche, ossia in zone omogenee dal punto di vista del clima, deriva dall'analisi di seimilacinquecento aree, ognuna definita tramite la posizione geografica e analizzata sulla base dei seguenti dati climatici:

- medie mensili delle temperature massime;
- medie mensili delle temperature minime;
- medie mensili dell'umidità relativa dell'aria.

I dati sono stati ricavati considerando i dati climatici misurati tra il 1961 e il 1990 per 206 città oppure tra il 1931 e il 1960 per 124 città. Per le restanti aree, il clima è stato stimato tramite interpolazione.

Si riporta in *Figura 4* la zonizzazione del Brasile secondo la norma *NBR 15220-3*.

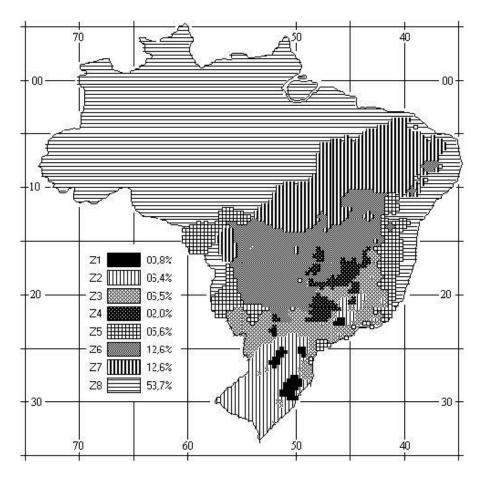


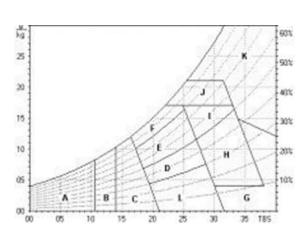
Figura 4. Zonizzazione bioclimatica del Brasile (ABNT/CB-02- Comitê Brasileiro de Construção Civil, 2003)

Le zone bioclimatiche sono:

- Z1 include le aree con i climi freddi nel Sud del paese;
- Z2 e Z3, principalmente nel Sud e Sud-Est del paese, hanno rispettivamente un'estate e un inverno accentuati;

- Z4, Z5 e Z6 sono le regioni più miti, dove tuttavia variano le condizioni fra inverno ed estate;
- Z7 e Z8 sono le zone a Nord e Nord-Est del paese dove il clima è caldo tutto l'anno, quindi
 il progetto del riscaldamento non è tenuto in considerazione.

La zonizzazione climatica ha consentito la definizione per ciascuna zona di "carte bioclimatiche"¹, di cui si mostra un esempio in *Figura 5*.



Α	Zona riscaldamento artificiale
В	Zona riscaldamento solare dell'edificio
С	Zona massa termica per riscaldamento
D	Zona comfort termico (bassa umidità)
E	Zona comfort termico
F	Zona deumidificazione (rinnovo aria)
G + H	Zona raffreddamento evaporativo
H+I	Zona massa termica per raffrescamento
I+J	Zona ventilazione
K	Zona raffrescamento artificiale
L	Zona umidificazione dell'aria

Figura 5. Carta bioclimatica e definizione delle zone (Planet Smart City, 2019)

In *Figura 6,* si riporta la posizione della *zona bioclimatica 8* dove si trova l'Innovation Hub di Aquiraz e la carta bioclimatica relativa.

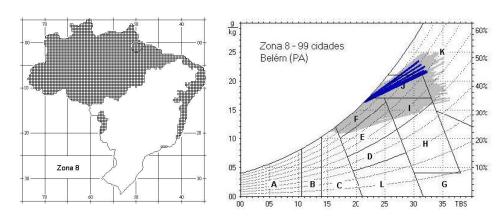


Figura 6. Posizione della zona bioclimatica 8 e carta bioclimatica relativa (ABNT/CB-02- Comitê Brasileiro de Construção Civil, 2003)

La norma *NBR 15220* fornisce inoltre linee guida per quanto riguarda la ventilazione naturale, l'ombreggiamento delle aperture, la finitura esterna dell'involucro edilizio e le strategie di

¹ Derivate dalle carte bioclimatiche proposte da Givoni in *Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines* nel 1992.

condizionamento termico passivo. Tutte le linee guida devono essere rispettate per ogni zona bioclimatica in cui è suddiviso il Brasile.

3.2 Requisiti minimi dell'involucro edilizio

3.2.1 Prestazioni termiche

Vengono posti dei limiti ai valori della trasmittanza termica $U\left(\frac{W}{m^2K}\right)$, della capacità termica $CT\left(\frac{kJ}{m^2K}\right)$ e del fattore di assorbimento solare α per le pareti e per le coperture. Tali limiti variano in relazione alla zona bioclimatica considerata e sono mostrati in *Tabella 1*, per tutte le zone bioclimatiche.

Zona bioclimatica	ı	Parete esteri	าล	Parete interna	Cop	pertura
Zoria biociiniatica		U	СТ	СТ		U
	α	(W/m ² K)	(kJ/m²K)	(kJ/m²K)	α	(W/m ² K)
1		< 2,50			-	≤ 2,30
2		12,30				± 2,30
3					se ≤ 0,6	≤ 2,30
4					36 2 0,0	3 2,30
5			> 130	> 130	se > 0,6	≤ 1,50
6	se ≤ 0,6	≤ 3,70		36 7 0,0		3 1,50
	30 = 0,0	3,70		se ≤ 0,	se ≤ 0,4	≤ 2,30
7	se > 0,6	≤ 2,50				
	36 7 0,0				se > 0,4	≤ 1,50
					se ≤ 0,4	≤ 2,30 * FT
8			_	_		
					se > 0,4	≤ 1,50 * FT
Fonte	NBR 15575-4		NBR 15575-4	NBR 15575-3	NBR	15575-5

Tabella 1. Requisiti termici per l'involucro edilizio

Per la zona bioclimatica 8 i valori di trasmittanza della copertura permessi sono maggiori dei limiti suddetti nel caso in cui sia soddisfatta una delle seguenti condizioni:

• copertura con tegole in argilla non trattate, ossia non verniciate o smaltate;

- presenza di aperture di ventilazione in almeno due lati contrapposti;
- presenta di aperture di ventilazione lungo l'intera estensione delle relative facciate.

Nel caso delle ultime due condizioni si utilizza un fattore correttivo della trasmittanza FT, definito come $FT=1,17\div 1,07\times h^{-1,04}$, dove h è l'altezza delle aperture di ventilazione della copertura. Se la copertura non è ventilata, si ha FT=1. In Figura 7, si mostra lo schema esplicativo della ventilazione della copertura.

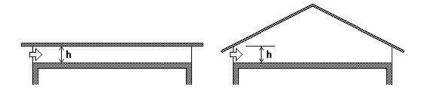


Figura 7. Schema esplicativo della ventilazione della copertura

Nel caso in cui l'edificio non raggiunga i limiti di trasmittanza termica e capacità termica dell'involucro edilizio, la norma *NBR 15575-1* prevede che sia eseguita una verifica della prestazione termica attraverso un metodo di simulazione dinamica di tipo orario, da eseguirsi con programmi di calcolo tipo *EnergyPlus* o simili secondo i requisiti della norma *ASHRAE 140*, riportati anche al par. 11.2 della *NBR 15575-1*.

In particolare, si richiede la verifica della temperatura dell'aria interna all'edificio in assenza di impianto climatizzazione invernale e/o estiva, ossia di verificare che la temperatura dell'aria all'interno dell'edificio sia più confortevole o uguale alla temperatura dell'aria esterna. A seconda del livello prestazionale sono forniti dalla norma diversi valori di temperatura interna possibili. Si riportano in *Tabella 2* i requisiti di temperatura interna. Per la simulazione si dovrà considerare l'edificio senza apporti di calore endogeni dovuti a persone, apparecchiature elettriche e illuminazione artificiale.

Livello di prestazioni termiche in estate	Zona Bioclimatica 1-7	Zona Bioclimatica 8
М	Ti,max ≤ Te,max	Ti,max ≤ Te,max
I	Ti,max ≤ (Te,max – 2°C)	Ti,max ≤ (Te,max – 1°C)
S	Ti,max ≤ (Te,max – 4°C)	Ti,max ≤ (Te,max - 2°C) Ti,min ≤ (Te,min + 1°C)
Livello di prestazioni termiche in inverno	Zona Bioclimatica 1-5	Zona Bioclimatica 6-8
M	Ti,min ≥ (Te,min + 3°C)	-
I	Ti,min ≥ (Te,min + 5°C)	-
S	Ti,min ≥ (Te,min + 7°C)	-

Ti,max: valore massimo giornaliero della temperatura dell'aria all'interno dell'edificio (°C)

Te, max: valore massimo giornaliero della temperatura dell'aria all'esterno dell'edificio (°C)

Ti,min: valore minimo giornaliero della temperatura dell'aria all'interno dell'edificio (°C)

Te, min: valore minimo giornaliero della temperatura dell'aria all'esterno dell'edificio (°C)

M= livello minimo di prestazione

I= livello intermedio di prestazione

S= livello superiore di prestazione

Fonte: NBR 15220-3, NBR 15775-1, NBR 15775-4, NBR 15775-5

Tabella 2. Requisiti di temperature dell'aria interna

La norma include inoltre la possibilità di effettuare la verifica delle temperature dell'aria interna mediante l'esecuzione di una campagna di monitoraggio in campo; tale metodo però non è da intendersi sostitutivo della verifica con simulazione ma solo supplementare a esso.

3.2.2 Prestazioni acustiche

La verifica delle prestazioni acustiche dell'involucro edilizio può essere effettuata con metodi differenti:

- verifica in laboratorio: il metodo prevede la misura in laboratorio del potere fonoisolante dei singoli componenti edilizi fornendo valori di riferimento per il calcolo della prestazione globale dell'involucro edilizio come richiesto da norma ISO 10140-2;
- verifica in opera: il metodo prevede la misura in opera dei livelli di isolamento acustico dei componenti edilizi esterni (facciate e copertura per unità autonoma e solo facciata per unità pluripiano) e delle partizioni interne in caso di edifici non autonomi. Le norme di riferimento sono la ISO 140-4, ISO 140-5 e nel caso di misure semplificate la ISO 10052.

Si riassume in *Tabella 3* quanto detto sopra sui parametri da verifica per misure acustiche.

Simbolo	Descrizione	Norma	Applicazione
R_w	Potere fonoisolante	ISO 10140-2	Componenti in
κ_w	Totale follosolarite	ISO 717-1	laboratorio
D	Differenza del livello ponderato	ISO 140-4	Partizioni verticali e
$D_{nT,w}$	standardizzato	ISO 717-1	orizzontali interne
D	Isolamento acustico di facciata	ISO 140-5	Facciate e coperture
$D_{2m,nT,w}$	isolamento acustico ui lacciata	ISO 717-1	esterne
Fonte: NBR 15575-4, NBR 15575-5			

Tabella 3. Parametri da verificare

Sono riportati in *Tabella 4* i requisiti minimi per gli elementi esterni in base alla classe del rumore del sito di progetto e per gli elementi interni in caso di misure di laboratorio. In *Tabella 5*, invece sono elencati gli stessi requisiti per le misure in opera.

Classe di Sito di progetto rumore		R_w	Livello di prestazione		
	Edificia cituata lautana da fauti di munana interes	≥ 25	Minimo		
I	Edificio situato lontano da fonti di rumore intenso di qualsiasi natura	≥ 30	Intermedio		
	ur quaisiasi natura	≥ 35	Superiore		
	Edificio situato in aree soggette a situazioni di	≥ 30	Minimo		
II	rumore non classificate nelle classi I e III	≥ 35	Intermedio		
	rumore non classificate fielie classific in	≥ 40	Superiore		
	Edificio soggetto a rumore intensi (es. mezzi di	≥ 35	Minimo		
III	trasporto)	≥ 40	Intermedio		
		≥ 45	Superiore		
	Elemento	R_w	Livello di		
		W	prestazione		
Parete tra unità	Parete tra unità autonome (muro gemellato), senza una stanza da letto		Minimo		
			Intermedio		
			Superiore		
Parete tra uni	tà autonome (muro gemellato), con almeno una	50 – 54	Minimo		
Tarete tra um	stanza da letto	55 – 59	Intermedio		
	Stanza da letto	≥ 60	Superiore		
Parete cieca tra i	unità abitativa (soggiorno)e zone di transito comuni	45 – 49	Minimo		
Tarete creda tra t	(corridoi e scale)	50 – 54	Intermedio		
	(66.11.23.1.2.30.15)	≥ 55	Superiore		
Parete cieca t	tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di	35 – 39	Minimo		
i arete dieta (transito comuni (corridoi e scale)	40 – 44	Intermedio		
	(22	≥ 45	Superiore		
Parete cieca tra	unità abitativa e aree comuni con permanenza di	50 - 54	Minimo		
persone, attivit	à ricreative e attività sportive (es. palestra, sala da	55 – 59	Intermedio		
ba	llo, spogliatoi, bagni e home theater)	≥ 60	Superiore		
		45 – 49	Minimo		
Insieme d	li pareti e porte di unità separate da una hall	50 - 54	Intermedio		
	≥ 55 Superiore				
Fonte: NBR 15575-4, NBR 15575-5					

Tabella 4. Requisiti acustici per verifica in laboratorio

Edificio situato lontano da fonti di rumore intenso di qualsiasi natura ≥ 20 Minimo ≥ 25 Intermedio ≥ 25 Intermedio ≥ 25 Minimo ≥ 25 Mi	Classe di	Sito di progetto	$D_{2m,nT,w}$	Livello di	
Edificio situato lontano da fonti di rumore intenso di qualsiasi natura ≥ 25 Intermedio ≥ 30 Superiore ≥ 25 Minimo ≥ 30 Intermedio ≥ 35 Superiore ≥ 30 Minimo ≥ 35 Superiore ≥ 30 Minimo ≥ 35 Intermedio ≥ 40 Superiore ≥ 50 Superio	rumore		,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	prestazione	
Parete tra unità autonome (muro gemellato), con almeno una stanza da letto Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno)e zone di transito comuni (corridoi e scale) Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale) Parete cieca tra unità abitativa e aree comuni con permanenza di persone, attività ricreative e attività sportive (es. palestra, sala da ballo, spogliatoi, bagni e home theater) Listermedio ≥ 25 Minimo ≥ 30 Intermedio ≥ 30 Minimo ≥ 35 Intermedio ≥ 40 Superiore		Edificio situato lontano da fonti di rumore intenso di	≥ 20	Minimo	
Edificio situato in aree soggette a situazioni di rumore non classificate nelle classi I e III ≥ 30 Intermedio ≥ 30 Intermedio ≥ 35 Superiore ≥ 30 Minimo ≥ 30 Minimo ≥ 35 Superiore ≥ 40 Minimo ≥ 40 Superiore ≥ 50 Superiore	I		≥ 25	Intermedio	
Edificio situato in aree soggette a situazioni di rumore non classificate nelle classi I e III ≥ 30 Superiore ≥ 30 Minimo ≥ 35 Superiore ≥ 30 Minimo ≥ 35 Intermedio ≥ 40 Superiore ≥ 40 Minimo ≥ 40 Intermedio ≥ 50 Superiore		quantition nature	≥ 30	Superiore	
III non classificate nelle classi e III ≥ 30 Intermedio ≥ 35 Superiore ≥ 30 Minimo ≥ 35 Intermedio ≥ 40 Superiore ≥ 40 Intermedio ≥ 50 Superiore		Edificio situato in aree soggette a situazioni di rumore	≥ 25	Minimo	
Edificio soggetto a rumore intensi (es. mezzi di trasporto) ≥ 35 Intermedio ≥ 40 Superiore	П		≥ 30	Intermedio	
Elimento ≥ 35 Intermedio Elemento 2 ± 40 Superiore Livello di prestazione Parete tra unità autonome (muro gemellato), senza una stanza da letto $40 - 44$ Minimo Parete tra unità autonome (muro gemellato), con almeno una stanza da letto $45 - 49$ Minimo Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno)e zone di transito comuni (corridoi e scale) $45 - 49$ Intermedio Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno)e zone di transito comuni (corridoi e scale) $40 - 44$ Minimo Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale) $30 - 34$ Minimo Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale) $30 - 34$ Minimo Parete cieca tra unità abitativa e aree comuni con permanenza di persone, attività ricreative e attività sportive (es. palestra, sala da ballo, spogliatoi, bagni e home theater) 2 ± 50 Superiore Insieme di pareti e porte di unità separate da una hall ($D_{nT,w}$ ottenuto tra le unità) 2 ± 50 Superiore		Hori classificate field classifie in	≥ 35	Superiore	
Elemento ≥ 40 Superiore Livello di prestazione Parete tra unità autonome (muro gemellato), senza una stanza da letto $40 - 44$ Minimo Parete tra unità autonome (muro gemellato), con almeno una stanza da letto $45 - 49$ Minimo Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno)e zone di transito comuni (corridoi e scale) $40 - 44$ Minimo Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno)e zone di transito comuni (corridoi e scale) $40 - 44$ Minimo Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale) $30 - 34$ Minimo Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale) $30 - 34$ Minimo Parete cieca tra unità abitativa e aree comuni con permanenza di persone, attività ricreative e attività sportive (es. palestra, sala da ballo, spogliatoi, bagni e home theater) $2 + 40$ Minimo Livelmedio $2 + 50$ Superiore			≥ 30	Minimo	
ElementoLivello di prestazioneParete tra unità autonome (muro gemellato), senza una stanza da letto $40-44$ MinimoParete tra unità autonome (muro gemellato), con almeno una stanza da letto $45-49$ MinimoParete cieca tra unità abitativa (soggiorno)e zone di transito comuni (corridoi e scale) $40-44$ MinimoParete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale) $30-34$ MinimoParete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale) $30-34$ MinimoParete cieca tra unità abitativa e aree comuni con permanenza di persone, attività ricreative e attività sportive (es. palestra, sala da ballo, spogliatoi, bagni e home theater) $45-49$ MinimoInsieme di pareti e porte di unità separate da una hall ($D_{nT,w}$ ottenuto tra le unità) $40-44$ Minimo 250 Superiore	III	Edificio soggetto a rumore intensi (es. mezzi di trasporto)	≥ 35	Intermedio	
Parete tra unità autonome (muro gemellato), senza una stanza da letto			≥ 40	Superiore	
Parete tra unità autonome (muro gemellato), senza una stanza da letto Parete tra unità autonome (muro gemellato), senza una stanza da letto Parete tra unità autonome (muro gemellato), con almeno una stanza da letto Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno)e zone di transito comuni (corridoi e scale) Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale) Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale) Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale) Parete cieca tra unità abitativa e aree comuni con permanenza di persone, attività ricreative e attività sportive (es. palestra, sala da ballo, spogliatoi, bagni e home theater) Insieme di pareti e porte di unità separate da una hall ($D_{nT,w}$ ottenuto tra le unità) $(D_{nT,w}$ ottenuto tra le unità) $(D_{nT,w}$ ottenuto tra le unità)		Flemento	D	Livello di	
Parete tra unità autonome (muro gemellato), senza una stanza da letto		Liemento	≥ nI,w	prestazione	
Parete tra unità autonome (muro gemellato), con almeno una stanza da letto	Daroto tr	a unità autonomo (muro gomollato), consa una stanza da	40 – 44	Minimo	
Parete tra unità autonome (muro gemellato), con almeno una stanza da letto $\frac{45-49}{50-54} \begin{array}{c} \text{Minimo} \\ \hline 50-54 \\ \hline \end{array}$ Intermedio $\frac{50-54}{50-54} \begin{array}{c} \text{Intermedio} \\ \hline \end{array}$ Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno) e zone di transito comuni (corridoi e scale) $\frac{40-44}{45-49} \begin{array}{c} \text{Minimo} \\ \hline \end{array}$ Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale) $\frac{30-34}{50-39} \begin{array}{c} \text{Intermedio} \\ \hline \end{array}$ Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale) $\frac{35-39}{50-39} \begin{array}{c} \text{Intermedio} \\ \hline \end{array}$ Parete cieca tra unità abitativa e aree comuni con permanenza di persone, attività ricreative e attività sportive (es. palestra, sala da ballo, spogliatoi, bagni e home theater) $\frac{50-54}{50-54} \begin{array}{c} \text{Intermedio} \\ \hline \end{array}$ Intermedio $\frac{50-54}{50-54} \begin{array}{c} \text{Intermedio} \\ \hline \end{array}$	raiete ti			Intermedio	
Parete tra unità autonome (muro gemellato), con almeno una stanza da letto	letto		≥ 50	Superiore	
$\begin{array}{c} \text{Stanza da letto} \\ \\ \hline \\ \geq 55 \\ \\ \hline \\ \text{Superiore} \\ \\ \hline \\ \text{Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno)e zone di transito comuni} \\ \\ \text{(corridoi e scale)} \\ \hline \\ \hline \\ \text{Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale)} \\ \hline \\ \hline \\ \text{Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale)} \\ \hline \\ \hline \\ \text{Parete cieca tra unità abitativa e aree comuni con permanenza di persone, attività ricreative e attività sportive (es. palestra, sala da ballo, spogliatoi, bagni e home theater)} \\ \hline \\ \hline \\ \text{Parete di pareti e porte di unità separate da una hall} \\ \hline \\ \text{($D_{nT,w}$ ottenuto tra le unità)} \\ \hline \\ \hline \\ \hline \\ \text{Parete cieca tra unità abitativa e aree comuni con permanenza di persone, attività ricreative e attività sportive (es. palestra, sala da ballo, spogliatoi, bagni e home theater)} \\ \hline \\ \hline \\ \text{Parete cieca tra unità abitativa e aree comuni con permanenza di persone, attività ricreative e attività sportive (es. palestra, sala da ballo, spogliatoi, bagni e home theater)} \\ \hline \\ \hline \\ \text{Parete cieca tra unità abitativa e aree comuni con permanenza di persone, attività ricreative e attività sportive (es. palestra, sala da ballo, spogliatoi, bagni e home theater)} \\ \hline \\ \hline \\ Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di persone di person$	Parete			Minimo	
Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno)e zone di transito comuni (corridoi e scale) Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale) Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale) Parete cieca tra unità abitativa e aree comuni con permanenza di persone, attività ricreative e attività sportive (es. palestra, sala da ballo, spogliatoi, bagni e home theater) Parete di pareti e porte di unità separate da una hall $(D_{nT,w}$ ottenuto tra le unità) $(D_{nT,w}$ ottenuto tra le unità)	raiete			Intermedio	
Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno)e zone di transito comuni (corridoi e scale) Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale) Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale) Parete cieca tra unità abitativa e aree comuni con permanenza di persone, attività ricreative e attività sportive (es. palestra, sala da ballo, spogliatoi, bagni e home theater) Insieme di pareti e porte di unità separate da una hall $(D_{nT,w}$ ottenuto tra le unità) $(D_{nT,w}$ ottenuto tra le unità) 45 − 49		Stanza da letto	≥ 55	Superiore	
	Parete cie	ca tra unità abitativa (soggiorno)e zone di transito comuni	40 – 44	Minimo	
Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale) Parete cieca tra unità abitativa e aree comuni con permanenza di persone, attività ricreative e attività sportive (es. palestra, sala da ballo, spogliatoi, bagni e home theater) Insieme di pareti e porte di unità separate da una hall $(D_{nT,w}$ ottenuto tra le unità) ≥ 50 Superiore	Tarete cie		45 – 49	Intermedio	
Parete cieca tra unità abitativa (soggiorno e cucina) e zone di transito comuni (corridoi e scale)		(comac) c scale)	≥ 50	Superiore	
transito comuni (corridoi e scale) Parete cieca tra unità abitativa e aree comuni con permanenza di persone, attività ricreative e attività sportive (es. palestra, sala da ballo, spogliatoi, bagni e home theater) Insieme di pareti e porte di unità separate da una hall $(D_{nT,w}$ ottenuto tra le unità)	Parete	rcieca tra unità ahitativa (soggiorno e cucina) e zone di	30 – 34	Minimo	
Parete cieca tra unità abitativa e aree comuni con permanenza di persone, attività ricreative e attività sportive (es. palestra, sala da ballo, spogliatoi, bagni e home theater)	rarete		35 – 39	Intermedio	
persone, attività ricreative e attività sportive (es. palestra, sala da ballo, spogliatoi, bagni e home theater)		transito comuni (cornaoi e scare)	≥ 40	Superiore	
ballo, spogliatoi, bagni e home theater) $ \geq 55 \qquad \text{Superiore} $ Insieme di pareti e porte di unità separate da una hall $ (D_{nT,w} \text{ ottenuto tra le unità}) \qquad \qquad \frac{40-44}{45-49} \qquad \text{Intermedio} $ $ \geq 50 \qquad \text{Superiore} $	Parete c	ieca tra unità abitativa e aree comuni con permanenza di	45 – 49	Minimo	
Insieme di pareti e porte di unità separate da una hall $(D_{nT,w} \text{ ottenuto tra le unità}) \\ \hline \begin{pmatrix} 40-44 & \text{Minimo} \\ 45-49 & \text{Intermedio} \\ \hline \geq 50 & \text{Superiore} \end{pmatrix}$	persone,	persone, attività ricreative e attività sportive (es. palestra, sala da		Intermedio	
Insieme di pareti e porte di unità separate da una hall $(D_{nT,w} \text{ ottenuto tra le unità}) \qquad \qquad 45 - 49 \qquad \text{Intermedio}$ $\geq 50 \qquad \text{Superiore}$	ballo, spogliatoi, bagni e home theater)		≥ 55	Superiore	
$(D_{nT,w} ext{ ottenuto tra le unità})$ $2 \le 50$ Intermedio ≥ 50 Superiore	1	ilomo di noroti o norto di unità conorte de une bell	40 – 44	Minimo	
≥ 50 Superiore	ins		45 – 49	Intermedio	
Fonte: NBR 15575-4, NBR 15575-5					
	Fonte: NB	R 15575-4, NBR 15575-5			

Tabella 5. Requisiti acustici per misure in opera

3.2.3 Requisiti di illuminazione

La verifica dell'illuminazione naturale può essere effettuata sia con misure in opera, attraverso la misura del fattore di luce diurna FLD (%), sia tramite simulazione con la verifica dei livelli di illuminamento naturale E (lux).

La norma fornisce i requisiti per eseguire correttamente le misurazioni per entrambe le verifiche possibili.

Nel caso si proceda alla verifica in opera dell'illuminazione naturale, bisogna rispettare le seguenti condizioni:

- le misure devono essere eseguite con un luxmetro con un errore massimo pari al 5%;
- l'intervallo orario deve essere compreso tra le 9.00 e le 15.00;
- i giorni di misura devono avere una copertura nuvolosa superiore al 50% in assenza di precipitazioni;
- assenza di illuminazione artificiale;
- assenza di schermature mobili ed elementi oscuranti;
- la misura deve essere eseguita al centro dell'ambiente ad un'altezza di 0,75 m rispetto al piano di calpestio, applicabile anche in caso di scale;
- in caso di complesso residenziale le misure si devono eseguire per tutti gli orientamenti possibili;
- lo stesso si applica per ogni piano se pluripiano;
- assenza di luce diretta sul luxmetro.

Nel caso si proceda alla verifica mediante simulazione dell'illuminazione naturale bisogna rispettare le seguenti condizioni:

- simulare le condizioni di illuminazione naturale il 23 aprile alle ore 9:30 e il 23 ottobre alle ore 15:30;
- utilizzare i dati climatici esterni da Tabella A1 dell'Anexo A della norma NBR 15575-1;
- indice di nuvolosità pari a 50%;
- assenza di illuminazione artificiale;
- assenza di schermature mobili ed elementi oscuranti;
- la misura deve essere eseguita al centro dell'ambiente ad un'altezza di 0,75 m rispetto al piano di calpestio, applicabile anche in caso di scale;

- le misure si devono eseguire per tutti gli orientamenti in caso il progetto ne preveda diversi;
- lo stesso si applica per ogni piano se pluripiano;
- considerare le ostruzioni all'interno.

Oltre a quelli di illuminazione naturale, la norma *NBR* 15575 presenta i requisiti per l'illuminazione artificiale degli ambienti. Ne fornisce inoltre le condizioni di misura che può essere eseguita sia in opera sia mediante simulazione:

- misure eseguite nelle ore notturne;
- misure eseguite in un punto al centro all'ambiente;
- misure eseguite in un punto al centro del corridoio;
- misure eseguite in un punto al centro delle scale;
- considerare il piano di lavoro ad un'altezza di 0.80 m rispetto al piano di calpestio;
- assenza di apporto di illuminazione naturale (porte, finestre e schermature chiuse);
- impianto di illuminazione completamente attivo.

Si riportano in *Tabella 6* i requisiti di illuminazione naturale e artificiale degli ambienti per i diversi livelli di prestazione possibili.

Locale		Illuminazione naturale (lux) requisiti per verifica con simulazione			
	Minimo	Intermedio	Superiore		
Soggiorno, stanza, cucina, aree di servizio	≥ 60	≥ 90	≥ 120		
Bagno, corridoio o scala (privati o ad uso comune), garage, parcheggio	-	≥ 30	≥ 45		
Locale		nazione natural	, ,		
	Minimo	Intermedio	Superiore		
Soggiorno, stanza, cucina, aree di servizio	≥ 0,50	≥ 0,65	≥ 0,75		
Bagno, corridoio o scala (privati o ad uso comune), garage, parcheggio	-	≥ 0,25	≥ 0,35		
Locale	Illum	inazione artific	iale (lux)		
	Minimo	Intermedio	Superiore		
Soggiorno, stanza, aree di servizio, garage o parcheggi coperti	≥ 100	≥ 150	≥ 200		
Cucina	≥ 200	≥ 300	≥ 400		
Corridoio o scala (privati o ad uso comune)	≥ 100	≥ 150	≥ 200		
Garage o parcheggio scoperto	≥ 20	≥ 30	≥ 40		

Nota: Per gli edifici pluripiano i livelli di illuminazione naturale (lux e FLD) possono essere inferiore a quelli indicati in tabella del 20% per tutti i locali identificati.

Fonte: NBR 15575-1

Tabella 6. Requisiti di illuminazione naturale e artificiale

Oltre al rispetto di tali requisiti, si richiede che tutti gli ambienti di lunga permanenza e i bagni abbiano una superficie minima trasparente tramite una o più aperture, le quali garantiscono l'accesso di luce naturale. Si riportano in *Tabella 7* i valori minimi richiesti.

Zona Bioclimatica	Superficie minima di illuminazione A (%)	
1 - 6	A ≥ 16%	
7	A ≥ 10%	
8	A ≥ 12,5%	
A=100 x (Area illuminazione/Area utile pavimento)		
Fonte: NBR 15575-4		

Tabella 7. Requisiti minimi di superficie illuminante

Ai fini del calcolo della superficie di illuminazione A, si considera l'area di illuminazione effettiva, includendo solo la superficie trasparente ma escludendo il telaio del serramento, la quale è calcolata con coefficienti, alcuni riportati nell'*Anexo II – Tabela de desconto das esquadrias* e altri calcolati caso per caso a seconda della dimensione effettiva dell'area di illuminazione. Di seguito è riportata la formula utilizzata:

 $A = A_{apertura} \cdot \%illuminazione.$

I corridoi non devono essere inclusi nell'area utile del pavimento e le stanze da letto si considerano con un'area utile massima pari a $15\ m^2$ anche se maggiore come impone la norma NBR 15220.

3.2.4 Requisiti di ventilazione naturale

Secondo la *NBR 15575-4*, gli ambienti a permanenza prolungata devono possedere una superficie di ventilazione minima. Si riportano in *Tabella 8* i requisiti minimi.

Zona Bioclimatica	Superficie minima di ventilazione A (%)
1-7	A ≥ 7%

8	A ≥ 12% Nord del Brasile				
	A ≥ 8% Nord-Est e Sud-Est del Brasile				
A=100 x (Area ventilazione/Area utile pavimento)					
Fonte: NBR 15575-4					

Tabella 8. Requisiti minimi di superficie di ventilazione

Ai fini del calcolo della superficie di ventilazione A, si considera l'area di apertura effettiva, escludendo il telaio del serramento e includendo solo la superficie apribile del serramento, la quale è calcolata con coefficienti, alcuni riportati nell'Anexo II – Tabela de desconto das esquadrias e altri calcolati caso per caso a seconda della dimensione effettiva dell'area di ventilazione. Di seguito è riportata la formula:

 $A = A_{apertura} \cdot \%ventilazione.$

È inoltre richiesta la verifica della ventilazione trasversale, cioè è necessario che le aperture di ventilazione siano disposte su facciate opposte. Si calcola utilizzando il parametro $^{A2}/_{A1} \ge 0,25$, dove A1 è la sommatoria delle aree di apertura su una medesima facciata, la quale possiede il valore di m^2 maggiore, e A2 è la sommatoria delle aree di apertura in m^2 sulle restanti facciate. Tale verifica non tiene conto delle porte di ingresso.

I corridoi non sono inclusi nell'area utile del pavimento, mentre le stanze da letto si considerano con un'area utile massima pari a $15\ m^2$ anche se maggiore come impone la norma NBR 15220. Per gli edifici unifamiliari in classe energetica A, è richiesto che almeno il 50% dei bagni garantiscano ventilazione naturale.

3.3 Etichetta energetica secondo RTQ-C

Il caso studio preso in considerazione rientra nella categoria "edificio commerciale e di servizi", i quali sono caratterizzati dal non avere una destinazione residenziale o industriale. Si considerano esempi di questi edifici: scuole private, edifici per la cura della salute degli animali o dell'uomo, quali ospedali, cliniche e cliniche private, vendita di beni in genere, prestazione di servizi, banche private, divertimento, preparazione e vendita di alimenti, uffici, locali commerciali, sedi di aziende o industrie, purché in queste ultime non vi sia attività produttiva e luoghi di alloggio (PBE Edifica, 2020).

Il metodo di calcolo è analogo a quello degli edifici residenziali: si ottiene un punteggio totale associato all'etichetta energetica. Il calcolo dell'etichetta energetica è eseguito quindi applicando il RTQ-C (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR,

2013), analogo al RTQ-R degli edifici residenziali. La classificazione energetica è di tipo alfabetico, da A (più efficiente) a E (meno efficiente). Si riportano in *Tabella 9* l'associazione del punteggio totale con l'etichetta energetica.

Punteggio totale	Livello di efficienza
≥ 4,5 a 5	А
≥ 3,5 a < 4,5	В
≥ 2,5 a < 3,5	С
≥ 1,5 a < 2,5	D
< 1,5	Е

Tabella 9. Associazione punteggio totale con classe energetica per RTQ-C

Il metodo prescrittivo è utilizzato per la verifica della classe energetica dell'Innovation Hub, seguendo il manuale con l'ausilio di un sito internet² per il calcolo (Eletrobrás/Procel, Eletrobrás, & UFSC, 2017).

Il RTQ-C ha alcuni prerequisiti generali in cui si richiede la separazione degli impianti elettrici in base all'uso finale, il quale viene rispettato dall'Innovation Hub, e il riscaldamento dell'acqua, il quale non si applica all'edificio in questione perché non sono presenti sistemi di riscaldamento dell'acqua.

Il calcolo tiene conto inoltre di:

- localizzazione;
- dimensione dell'edificio;
- involucro edilizio;
- aperture e loro caratteristiche;
- illuminazione naturale e artificiale;
- condizionamento dell'aria;
- comfort termico nell'edificio.

I vari componenti del calcolo incidono in modo diverso sul calcolo del punteggio finale:

- involucro edilizio il 30%;
- illuminazione il 30%;
- condizionamento dell'aria il 40%.

² https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/webprescritivo/index.html

Inoltre, c'è la possibilità che all'edificio si applichino bonus sul punteggio dovuti all'utilizzo di fonti rinnovabili per la produzione di acqua calda o di energia elettrica, tuttavia l'Innovation Hub non rientra in nessuna delle suddette casistiche.

4 Software utilizzati

Sono stati utilizzati per le simulazioni due software differenti, *EnergyPlus* e *Radiance*, tramite due diverse interfacce grafiche, *OpenStudio Application* e *DesignBuilder*,

OpenStudio Application è un software open-source gratuito, facente parte della raccolta di software OpenStudio, ed è impiegato come interfaccia grafica di EnergyPlus per completare la simulazione dinamica termica dell'edificio. Fa parte di questa raccolta di software anche il plugin per SketchUp utilizzato per la modellazione dell'edificio. DesignBuilder, è un software a pagamento utilizzato invece per la simulazione dell'illuminazione naturale come interfaccia grafica di Radiance.

4.1 Software di simulazione

4.1.1 EnergyPlus

EnergyPlus è una raccolta di software open-source che ha le sue radici nei due software BLAST, sviluppato dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti d'America (DoD), e DOE-2, sviluppato dal Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti d'America (DoE), tra la fine degli anni '70 e l'inizio degli anni '80 (Solaripedia | Resource, 2008).

BLAST e *DOE-2* hanno dei problemi di obsolescenza a causa del linguaggio di programmazione utilizzato che ne rende difficile l'aggiornamento e l'integrazione con le nuove tecnologie nel campo dell'energia. Inoltre, non sono in grado di eseguire simulazioni integrate con l'ambiente gestendo i *feedback* ottenuti dall'avanzare della simulazione ma eseguono calcoli in serie.

Nel 2001 è uscita la prima versione di EnergyPlus sviluppata dal Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti d'America (DoE), finanziata dal *Building Technologies Office* (BTO) e gestita dal *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). A differenza dei software su cui si basa, è sviluppato a moduli così da avere la possibilità di aggiornamento dei singoli moduli senza intaccare tutto il software o gli altri moduli in via di sviluppo o aggiornamento. In *Figura 8* sono mostrati i vari moduli che compongono il software. Al centro sono presenti i tre moduli principali del software, *Surface Heat Balance Manager* e *Air Heat Balance Manager*, i quali si occupano della risoluzione delle equazioni di base dei problemi termici, e *Building Systems Simulation*

Manager, il quale si occupa della simulazione della totalità dell'edificio e degli impianti. I tre moduli principali sono integrati tra loro e comunicano con tutti i restanti moduli del software.

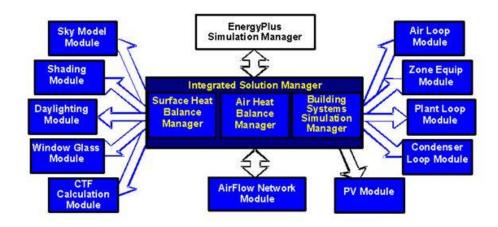


Figura 8. Moduli che compongono EnergyPlus (U.S. Department of Energy, 2020)

Inoltre, è possibile l'integrazione tra i vari moduli, così i calcoli possono essere eseguiti in modo iterativo, gestendo così i *feedback* dello spazio simulato. Gli sviluppatori rilasciano due importanti aggiornamenti di *EnergyPlus* l'anno.

In *Figura 9*, è mostrato il funzionamento di *EnergyPlus*, si nota inoltre l'integrazione dei *feedback* nelle simulazioni nonché la possibilità di sviluppare e aggiungere moduli nuovi facilmente. È inoltre disponibile la possibilità di utilizzare interfacce grafiche esterne come mostrato nella parte in giallo (U.S. Department of Energy, 2020).

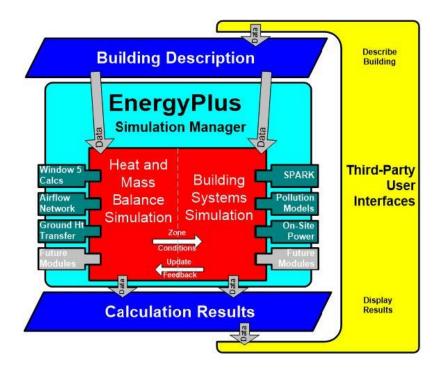


Figura 9. Funzionamento di base di EnergyPlus (U.S. Department of Energy, 2020)

EnergyPlus utilizza file di testo come input, mentre l'output è disponibile in diversi formati di file: fogli di calcolo, database SQL, grafici, file di testo e pagine web. La suite include diversi programmi: EP-Launch per la gestione dei file di input e output e per l'esecuzione delle simulazioni; IDF-Editor per la creazione di file di input utilizzando una semplice interfaccia simile a un foglio di calcolo; EP-Compare per confrontare graficamente i risultati di due o più simulazioni. Include inoltre una serie di utility, tra le quali una per esportare il disegno dell'edificio in AutoCAD DXF e una per aggiornare il file di input per versioni più recenti di EnergyPlus.

In Figura 10, sono mostrate le interfacce di EP-Launch e di IDF-Editor. EP-Launch permette di selezionare il file di input, di avviare un editor di testo oppure IDF-Editor per modificarlo, nonché di selezionare il file relativo alle condizioni metereologiche del luogo dove eseguire la simulazione. Nella parte inferiore del dell'interfaccia si può accedere a tutti i file di output generati dalla simulazione. IDF-Editor, come menzionato in precedenza, ha un'interfaccia simile a un foglio di calcolo per la modifica degli oggetti di input; inoltre presenta nella parte superiore una descrizione per ogni oggetto disponibile da aggiungere alla simulazione e una guida veloce per la compilazione corretta dei campi.

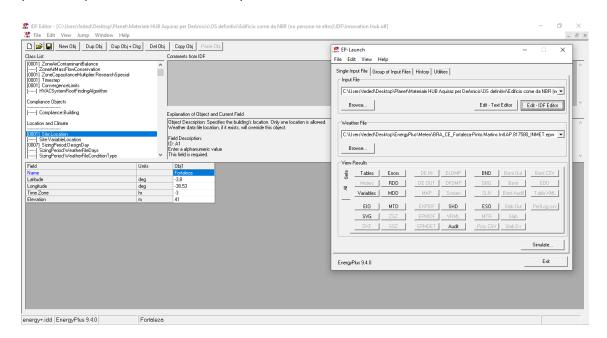


Figura 10. Interfaccia di EP-Launch e di IDF-Editor

EnergyPlus è disponibile gratuitamente al download³ per Windows, Mac e Linux.

-

³ Da https://energyplus.net/downloads

4.1.2 Radiance

Radiance è una raccolta di programmi open-source per l'analisi dell'illuminazione, sviluppato dal Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) nel 1985. Come input richiede la geometria dell'edificio, i materiali costruttivi, gli impianti e i dati meteo del luogo di simulazione (nuvolosità per i diversi giorni dell'anno). Fornisce come output sia mappe grafiche sia fogli di calcolo con i valori di illuminazione dell'edificio (Fritz & McNeil, 2019).

Radiance è disponibile gratuitamente al download⁴ per Windows, Mac e Linux.

4.2 Interfacce grafiche

4.2.1 OpenStudio

OpenStudio è una raccolta di software per la simulazione energetica degli edifici che contiene *OpenStudio Application,* interfaccia grafica di *EnergyPlus* e *Radiance*.

La prima versione è stata rilasciata nel 2008 dal *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), ma da luglio 2020 il progetto è sviluppato dalla organizzazione *The OpenStudio Coalition*.

OpenStudio Application ha un'interfaccia grafica molto intuitiva: nella parte sinistra presenta i vari passaggi che compongo il workflow per eseguire la simulazione. Dopo aver selezionato la scheda necessaria, nella parte centrale sono mostrati i diversi parametri modificabili, con ulteriori schede selezionabili. Nella parte destra, è disponibile la parte relativa alla libreria di oggetti predefiniti disponibili e la possibilità di modificarli singolarmente per crearne di personalizzati.

In *Figura 11* si può vedere l'interfaccia grafica di *OpenStudio Application* con la relativa descrizione delle diverse schede.

⁴ Da https://github.com/LBNL-ETA/Radiance/releases

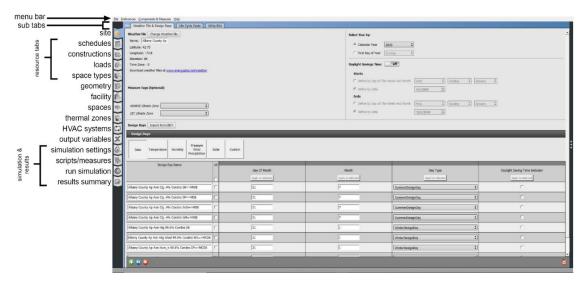


Figura 11. Interfaccia grafica di OpenStudio Application con descrizione delle schede (OpenStudio Coalition, 2020)

La suite *OpenStudio* contiene, inoltre, un *plug-in* per il software di modellazione 3D *SketchUp* che permette di generare velocemente la geometria dell'edificio da simulare senza utilizzare l'*IDF-Editor* di *EnergyPlus* che ne rende complessa la realizzazione. *OpenStudio* permette anche di importare file *BIM* creati con altri software.

Il plug-in di OpenStudio per SketchUp permette di:

- creare e modificare gli spazi e le *thermal zone* da simulare;
- creare e modificare totalmente l'involucro edilizio (involucro edilizio esterno, ombreggiamenti, pareti interne e aperture);
- assegnare i diversi tipi di costruzioni all'involucro edilizio e le relative condizioni al bordo (es. parete interna o esterna);
- aggiungere sistemi di controllo dell'illuminazione naturale;
- avviare OpenStudio per eseguire la simulazione mantenendo la possibilità di modificare
 l'edificio senza chiudere e riaprire il software;
- visualizzare l'edificio in base al tipo di superficie, al materiale da costruzione, alle condizioni al bordo e alla thermal zone.

In Figura 12 si può vedere l'interfaccia del plug-in. In alto, la barra degli strumenti più grande presenta gli strumenti per la creazione del modello, con i quali si possono creare i diversi spazi, le partizioni interne, gli ombreggiamenti e aggiungere i controlli dell'illuminazione naturale. Inoltre, presenta strumenti relativi alle connessioni tra superfici. Oltre agli strumenti di disegno, nella parte destra della barra degli strumenti, sono presenti strumenti per l'ispezione del modello, per l'assegnazione della proprietà alle superfici e per l'avvio di *OpenStudio Application*. La barra degli strumenti più piccola invece è relativa alla visualizzazione del modello e permette

di scegliere il modo di visualizzazione dell'edificio tra le diverse modalità disponibili come detto in precedenza. La finestra a destra prende il nome di *OpenStudio Inspector*, avviabile con gli strumenti di ispezione presenti nella barra degli strumenti, e permette di visualizzare e modificare le diverse impostazioni delle superfici che compongono il modello.

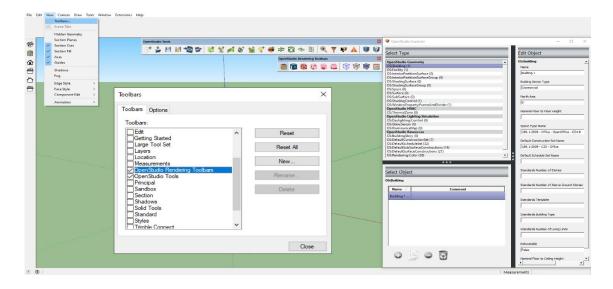


Figura 12. Interfaccia grafica del plug-in di OpenStudio per SketchUp (OpenStudio Coalition, 2020)

OpenStudio permette l'integrazione con la Building Component Library⁵ (BCL) sviluppata dal Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti d'America (DoE) dalla quale è possibile scaricare componenti aggiuntivi, tra cui materiali, componenti di impianti e persino edifici interi, utilizzabili come input delle simulazioni, e misure⁶, strumenti utili per visualizzare output diversi da quelli standard di EnergyPlus, tra cui grafici con dati di comfort interni o diagrammi di carico degli impianti di climatizzazione.

La suite comprende inoltre un visualizzatore dei risultati della simulazione e uno strumento di analisi parametrico dei risultati.

OpenStudio Application è disponibile al download⁷ gratuitamente per Windows, Mac e Linux. Mentre il plug-in di OpenStudio per SketchUp è disponibile al download⁸ gratuitamente per Windows e Mac, non avendo una versione di SketchUp per Linux.

⁶ ECM (Energy Conservation Measures)

⁵ https://bcl.nrel.gov/

⁷ Da https://github.com/openstudiocoalition/OpenStudioApplication/releases

⁸ Da https://github.com/openstudiocoalition/openstudio-sketchup-plugin/releases

4.2.2 DesignBuilder

DesignBuilder è un software sviluppato dall'azienda DesignBuilder Software Ltd. Essendo modulare, fornisce la possibilità di installare moduli diversi a seconda delle necessità. Le funzionalità principali sono la possibilità di modellare l'edificio o di importare un modello BIM creato con altri software nonché l'interfaccia grafica per le simulazioni di EnergyPlus e di Radiance. Inoltre, permette l'ottimizzazione termica di edifici mediante script iterativi per raggiungere obiettivi fissati dal progettista, la creazione di simulazioni CFD per edifici, l'analisi dei costi in fase di progettazione e la certificazione energetica degli edifici per Regno Unito e Irlanda.

Permette inoltre di visualizzare sul software gli output della simulazione in modo grafico oppure come dati in fogli di calcolo, i quali possono essere esportati in immagini o documenti di Word ed Excel.

In *Figura 13* si mostra l'interfaccia grafica del software con un esempio di modello 3D importato dal plug-in di *OpenStudio per SketchUp*.

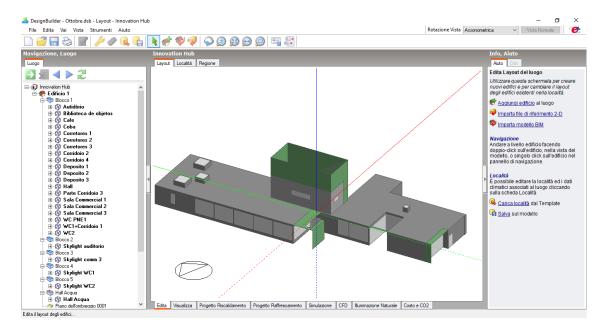


Figura 13. Interfaccia di DesignBuilder

DesignBuilder è disponibile al *download*⁹ a pagamento, con diversi pacchetti a seconda delle necessità lavorative dell'utilizzatore; una versione completa di tutti i moduli in prova per 30 giorni è inoltre disponibile previa registrazione.

⁹ Da https://designbuilder.co.uk/download/release-software

5 Verifica dei requisiti minimi da normativa

5.1 Verifica mediante calcoli

5.1.1 Verifica delle prestazioni termiche dei componenti di involucro

I valori delle proprietà termiche utilizzati sono ottenuti dalla normativa NBR 15220-2, da Anexo geral V – Catálogo de propriedas termicas de paredes, coberturas e vidro e da simulazioni eseguite dalla Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Fogiatto, 2015).

Ricordando che:

- resistenza termica $R\left(\frac{m^2K}{W}\right)$, $R=\frac{s}{\lambda}$, dove s è lo spessore dello strato espresso in m e λ è la conducibilità termica dello strato $(\frac{W}{mK})$;
- trasmittanza termica $U\left(\frac{W}{m^2K}\right)$, $U=\frac{1}{R}=\frac{\lambda}{s}$;
- capacità termica $CT\left(\frac{kJ}{m^2K}\right)$ $CT=\sum_i^{n\,strati}\lambda_iR_ic_i\rho_i=\sum_i^{n\,strati}s_ic_i\rho_i$, dove c è il calore specifico per unità di massa del materiale che compone lo strato $(\frac{J}{kgK})$ e ρ è la sua densità $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$.

1.1.1.1 Chiusura verticale esterna

Parete esterna tipo 1	s medio	ρ	С	СТ	λ	R	U
	(cm)	(kg/m³)	(J/kgK)	(kJ/m²K)	(W/mK)	(m ² K/W)	(W/m ² K)
Strato liminare interno						0,130	
Reboco de argamassa	3	1800	1000	54	1,15	0,026	
Tijolo estrutural	14			182		0,319	3,136
concreto							
14x19x29 cm							
Reboco de argamassa	3	1800	1000	54	1,15	0,026	
Strato liminare esterno						0,040	
				290		0,541	1,848

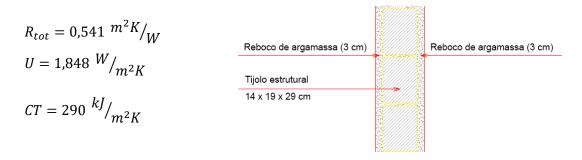


Figura 14. Stratigrafia della parete esterna di tipo 1

Parete esterna tipo 2	s medio	ρ	С	СТ	λ	R	U
	(cm)	(kg/m³)	(J/kgK)	(kJ/m²K)	(W/mK)	(m ² K/W)	(W/m ² K)
Strato liminare interno						0,130	
Reboco de argamassa	3	1800	1000	54	1,15	0,026	
Tijolo estrutural concreto 14x19x29 cm	14			182		0,319	3,136
Tijolo estrutural concreto 14x19x29 cm	14			182		0,319	3,136
Reboco de argamassa	3	1800	1000	54	1,15	0,026	
Strato liminare esterno						0,040	
				472		0,860	1,163



Figura 15. Stratigrafia della parete esterna di tipo 2

Parete esterna tipo 3	s medio	ρ	С	СТ	λ	R	U
	(cm)	(kg/m³)	(J/kgK)	(kJ/m²K)	(W/mK)	(m ² K/W)	(W/m ² K)
Strato liminare interno						0,130	
Reboco de gesso	1	1200	840	10	0,70	0,014	
Tijolo estrutural concreto 14x19x29 cm	14			182		0,319	3,136
Tijolo estrutural concreto 14x19x29 cm	14			182		0,319	3,136
Reboco de argamassa	3	1800	1000	54	1,15	0,026	
Strato liminare esterno						0,040	
				428		0,848	1,179

$$R_{tot} = 0.848 \ m^2 K/_W$$
 Reboco de argamassa (3 cm). Reboco de gesso (3 cm)
$$U = 1,179 \ W/_{m^2 K}$$
 Tijolo estrutural
$$14 \times 19 \times 29 \ \text{cm}$$

Figura 16. Stratigrafia della parete di tipo 3

Il valore di assorbimento delle finiture delle pareti è calcolato come media pesata, ipotizzando un calcolo simile a quello per il RTQ-C, dei valori di assorbimento delle diverse finiture per l'area sulla quale sono presenti. Si ottiene un valore pari a $\alpha=0,40$, avendo:

- bianco nuvola (*branco nuvem*) con un valore di $\alpha = 0.16$ per un'area di 896,80 m^2 ;
- grigio scuro (*cinza escuro*) con un valore di $\alpha = 0.86$ per un'area di 456,59 m^2 .

Confrontando i valori delle chiusure verticali con i requisiti della norma del *desempenho NBR* 15575-4, si nota da *Tabella 10* che risultano verificati per tutte le tipologie di pareti esterne.

Requisiti Parete esterna]			Verifica parete tipo 1	
	α	U (W/m ² K)	CT (kJ/m ² K)		
Zona Bioclimatica 8	<=0,6	<=3,70	-	Verificato	
	>0,6	<=2,50 -			
	α	U (W/m ² K)	CT (kJ/m ² K)		
Zona Bioclimatica 8	<=0,6	<=3,70	-	Verificato	
	>0,6	<=2,50	-		
				Verifica parete tipo 3	
Zona Bioclimatica 8	α	U (W/m ² K)	CT (kJ/m ² K)		
	<=0,6	<=3,70	-	Verificato	
	>0,6	<=2,50	-		

Tabella 10. Verifica delle prescrizioni termiche delle chiusure verticali

5.1.1.1 Chiusura orizzontale superiore

Copertura maggiore	s	ρ	С	СТ	λ	R	U
	medio	(kg/m³)	(J/kgK)	(kJ/m²K)	(W/mK)	(m ² K/W)	(W/m ² K)
	(cm)						
Strato liminare interno						0,100	
Forro de gesso acartonado	2	1000	840	17	0,35	0,057	
Camera d'aria	38,5					0,200	
Calcestruzzo	15	2200	1000	330		0,030	
Camada de regularização in	8	1400	1000	112	0,50	0,160	
cls alleggerito							
Impermeabilização	0,15	1000	1460	2	0,23	0,007	
bituminosa							
Proteção mecânica de	3	1800	1000	54	1,15	0,026	
argamassa leve							
Strato liminare esterno						0,040	
				515		0,620	1,614

Il calcolo della trasmittanza del calcestruzzo strutturale è eseguito dividendolo in sezioni in base alla resistenza termica. Le sezioni A e B, infatti, presentano uno spessore medio differente, come si può vedere da *Figura 17*. Per cui si è calcolata prima la resistenza termica della singola sezione

come in precedenza e poi quella totale dello strato facendo il parallelo tra le resistenze termiche delle due sezioni: $R_{tot}=\frac{1}{\frac{1}{R_A}+\frac{1}{R_B}}$. Di seguito sono mostrati i dati e il risultato:

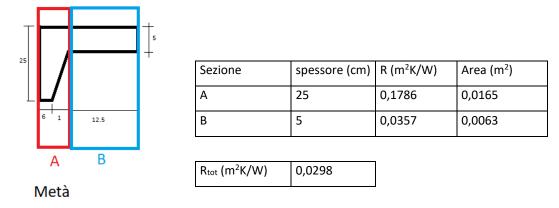


Figura 17. Calcolo valore resistenza termica del calcestruzzo della copertura maggiore

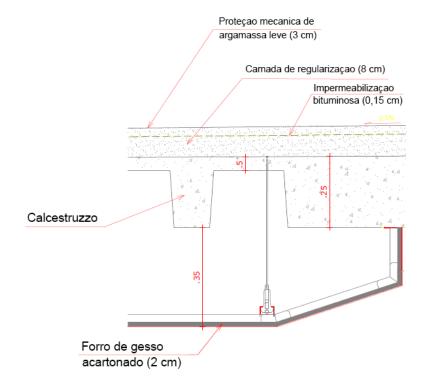


Figura 18. Stratigrafia della copertura maggiore

Vengono riportati i valori delle proprietà termiche per la copertura maggiore:

$$R_{tot} = 0.620 \ m^2 K /_W$$
 $U = 1.614 \ W /_{m^2 K}$
 $CT = 515 \ kJ /_{m^2 K}$

Copertura area tecnica	s medio	ρ	С	СТ	λ	R	U
	(cm)	(kg/m³)	(J/kgK)	(kJ/m²K)	(W/mK)	(m ² K/W)	(W/m²K)
Strato liminare interno						0,100	
Controsoffitto in cartongesso	2	1000	840	17	0,35	0,057	
Camera d'aria	38,5					0,200	
Calcestruzzo strutturale	30	2200	1000	660		0,048	
Camada de regularização in	10	1400	1000	140	0,50	0,200	
cls alleggerito							
Impermeabilizzante	0,15	1000	1460	2	0,23	0,007	
Contrapiso	9	1800	1000	162	1,15	0,078	
Strato liminare esterno						0,040	
				981		0,730	1,371

Il calcolo relativo allo strato di calcestruzzo strutturale è stato eseguito analogamente a quello della copertura maggiore, facendo il parallelo tra le sezioni *A*, *B* e *C*. In *Figura 19*, sono mostrati i dati e il risultato.

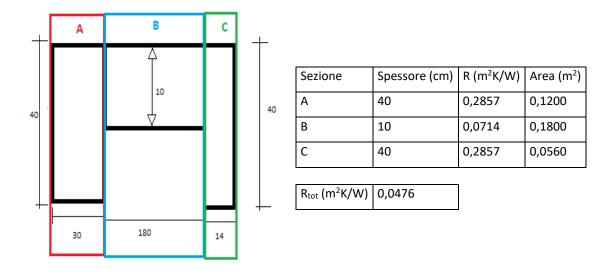


Figura 19. Calcolo valore resistenza termica del calcestruzzo della copertura dell'area tecnica

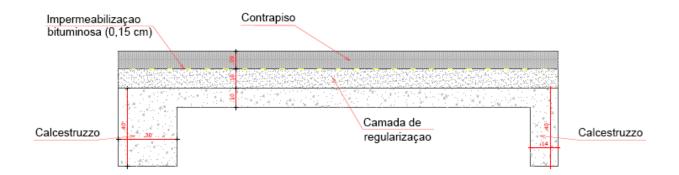


Figura 20. Stratigrafia relativa alla copertura dell'area tecnica

Come per la copertura maggiore vengono riportati i dati della copertura dell'area tecnica.

$$R_{tot} = 0.730 \ m^2 K /_W$$
 $U = 1.371 \ W /_{m^2 K}$
 $CT = 981 \ ^{kJ} /_{m^2 K}$

Copertura area acqua	s medio	ρ	С	СТ	λ	R	U
	(cm)	(kg/m ³)	(J/kgK)	(kJ/m²K)	(W/mK)	(m ² K/W)	(W/m ² K)
Strato liminare interno						0,100	
Calcestruzzo strutturale	32	2200	1000	704		0,078	
Camada de regularização	10	1400	1000	140	0,50	0,200	
in cls alleggerito							
Impermeabilizzante	0,15	1000	1460	2	0,23	0,007	
Contrapiso	9	1800	1000	162	1,15	0,078	
Strato liminare esterno						0,040	
				1008		0,503	1,988

Il calcolo relativo allo strato di calcestruzzo strutturale è stato eseguito analogamente a quello delle altre coperture, facendo il parallelo tra le sezioni *A* e B. In *Figura 21* sono mostrati i dati e il risultato.

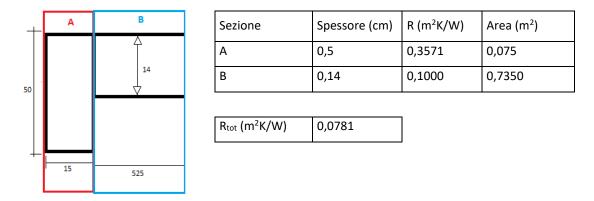


Figura 21. Calcolo valore resistenza termica del calcestruzzo della copertura dell'area della torre dell'acqua

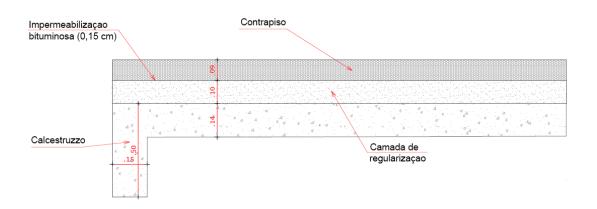


Figura 22. Stratigrafia relativa alla copertura dell'area della torre dell'acqua

Come per i tipi precedenti di copertura vengono riportati i dati della copertura dell'area della torre dell'acqua.

$$R_{tot} = 0.503 \ m^2 K /_W$$
 $U = 1.988 \ ^W /_{m^2 K}$
 $CT = 1008 \ ^{kJ} /_{m^2 K}$

Non è specificata la finitura della copertura, perciò si prende come valore di assorbimento quello relativo allo strato più esterno che è pari a $\alpha=0.50$ per tutte le tipologie di copertura orizzontale, avendo per la copertura maggiore intonaco di malta e per la copertura dell'area tecnica e della torre dell'acqua uno strato di malta.

Confrontando i valori delle chiusure verticali con i requisiti della norma del *desempenho NBR* 15575-5, si nota da *Tabella 11* che non risultano verificati per tutte le tipologie di copertura

presenti ma solo per quella relativa alla torre dell'acqua. L'edificio non rispetta quindi i limiti di trasmittanza termica per tutti i tipi copertura dell'edificio, quindi è necessaria una verifica della prestazione termica attraverso un metodo di simulazione dinamica da eseguirsi con programmi di calcolo tipo Energy Plus o similari.

Requisiti Copertura Orizzontale			Verifica tipo maggiore
	α	U (W/m ² K)	
Zona Bioclimatica 8	<=0,4	<=2,30	
	>0,4	<=1,50	Non Verificato
		•	Verifica tipo area tecnica
	α	U (W/m ² K)	
Zona Bioclimatica 8	<=0,4	<=2,30	
	>0,4	<=1,50	Verificato
			Verifica tipo area acqua
	α	U (W/m ² K)	
Zona Bioclimatica 8	<=0,4	<=2,30	
	>0,4	<=1,50	Non Verificato

Tabella 11. Verifica delle prescrizioni termiche delle chiusure orizzontali

Nella *Tabella 11* si tralascia il coefficiente correttivo della trasmittanza perché la copertura non è ventilata.

5.1.1.2 Posizioni delle pareti esterne e delle coperture orizzontali

Si mostrano nelle immagini seguenti le posizioni dei diversi tipi di componenti dell'involucro edilizio e le relative legende.

5.1.1.2.1 Pareti esterne

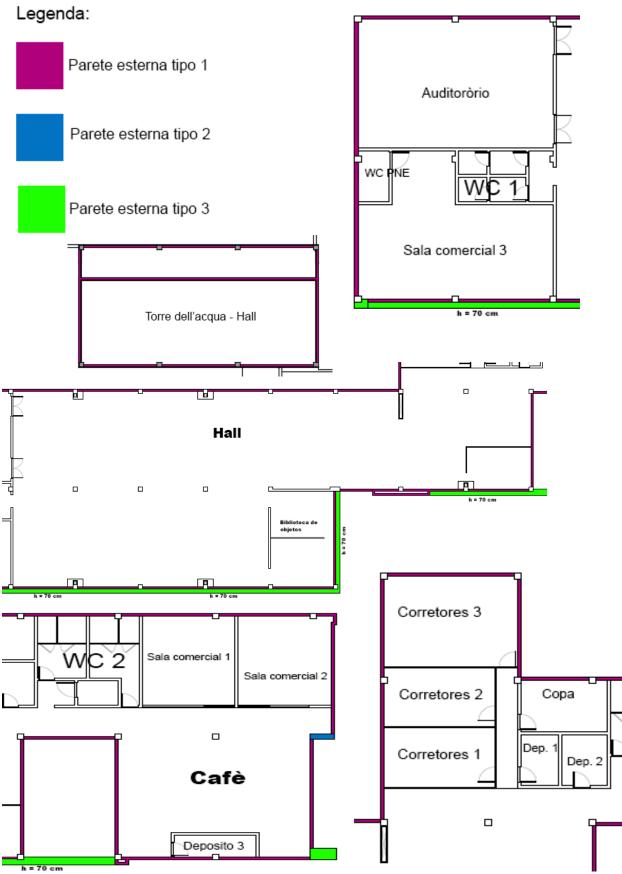


Figura 23. Posizioni dei diversi tipi di pareti esterne

5.1.1.2.2 Copertura orizzontale

Legenda: Copertura orizzontale tipo maggiore Copertura orizzontale tipo tecnica Copertura orizzontale tipo torre acqua Lucernari

Figura 24. Posizioni dei diversi tipi di coperture orizzontali

5.1.1.3 Chiusura orizzontale inferiore, pareti interne e serramenti

Per la chiusura orizzontale inferiore, le norme non prevedono specifici requisiti per cui non è stata eseguita la verifica delle prestazioni termiche.

Nel caso dell'Innovation Hub di Aquiraz, trovandosi nella zona bioclimatica 8, la normativa *NBR* 15575-3 non richiede requisiti minimi per le pareti interne.

I valori utilizzati nei calcoli per i serramenti esterni, sia per le finestre esterne e interne sia per le porte a vetri, sono stati ipotizzati pari a quelli utilizzati nelle unità abitative di Laguna¹⁰ (Planet Smart City, 2019). Si considerano quindi i seguenti valori:

- Trasmittanza termica totale (telaio e vetro) pari a $U=5.7~W/_{m^2K}$;
- Fattore solare del vetro pari a FS = 0.8;
- Fattore di trasmissione luminosa del vetro pari a TL = 0.88.

Inoltre, sono presenti nella *Sala Commercial 3* e nella torre dell'acqua sopra alla *Hall* aperture costruite con mattoni di vetrocemento per cui si sono utilizzati i seguenti valori nei calcoli (Seves Glass Block, 2021):

ullet Trasmittanza termica totale (telaio e vetro) pari a $\mathit{U}=$ 2,8 $^{W}/_{m^2K}$;

¹⁰ Prima *smart city* progettata da Planet Smart City

- Fattore solare del vetro pari a FS = 0.8;
- Fattore di trasmissione luminosa del vetro pari a TL = 0.70.

I lucernari sono ipotizzati con le stesse caratteristiche dei serramenti esterni, mentre le pareti dei lucernari risultano avere trasmittanza pari a $U=3,620~W/_{m^2K}$ e presentano inoltre un valore di assorbimento relativo allo strato più esterno pari a $\alpha=0,50$, per cui anche questa parete rispetta i requisiti minimi della norma del *desempenho* per coperture verticali esterne.

Anche per i serramenti esterni come per la copertura inferiore, non esistono specifici requisiti termici richiesti da normativa *NBR 15575*.

5.1.2 Verifica dei requisiti di ventilazione naturale

Secondo la normativa *NBR 15575-4*, gli ambienti a permanenza prolungata e i bagni devono possedere una superficie di ventilazione minima, i cui requisiti minimi sono riportati in *Tabella* 12.

Zona Bioclimatica	Superficie minima di ventilazione A (%)			
8	A ≥ 12% Nord del Brasile			
o o	A ≥ 8% Nord-Est e Sud-Est del Brasile			
A=100 x (Area ventilazione/Area utile pavimento)				

Tabella 12. Superficie minima di ventilazione

Nel caso dell'Innovation Hub ci troviamo nel Nord-Est del Brasile.

Ai fini del calcolo della superficie di ventilazione A, si considera l'area di apertura effettiva, escludendo il telaio mediante dei coefficienti correttivi ottenuti da normativa o calcolati.

Nell'Innovation Hub sono presenti lucernari con griglie di ventilazione, quindi si è tenuto conto anche di tali aperture nell'esecuzione del calcolo.

In *Tabella 13,* sono mostrati i valori per ogni locale a permanenza prolungata. I locali evidenziati con lo stesso colore sono considerati un'unica entità, si è fatto questo perché le aree dei corridoi non sono da tenere in considerazione come area utile da normativa ma presentano aperture che devono essere invece considerate nella verifica.

Stanza	Area utile (m²)	Area ventilazione (m²)	A ventilazione (%)	Verifica
Auditório	69,16	1,37	2%	Non Verificato
WC PNE 1	4,26	0,57	13%	Verificato
WC masculino 1	4,34			
WC feminino 1	4,34	1,03	12%	Verificato
Circulação 1	3,33			
Sala comercial 3	65,16	5,66	9%	Verificato
Hall	451,93	42,21	9%	Verificato
Circulação 4	6,31	42,21	376	verificato
Correttores 1	16,79	3,78	23%	Verificato
Correttores 2	16,28	3,78	23%	Verificato
Correttores 3	30,59	6,90	23%	Verificato
Сора	11,04	2,51	23%	Verificato
WC masculino 2	9,75			
WC feminino 2	11,36	2,94	12%	Verificato
WC PNE 2	3,12			
Circulação 2	3,03			
Circulação 3	8,53	11,79	14%	Verificato
Café	84,55			
Sala comercial 1	26,22	4,29	16%	Verificato
Sala comercial 2	26,61	4,29	16%	Verificato
Biblioteca de objetos	43,9	0,00	0%	Non Verificato

Tabella 13. Valori di superficie di ventilazione e verifica

I requisiti sono rispettati in tutti i locali ad esclusione dell'auditorio, il quale ha come uniche aperture di ventilazione le griglie dei lucernari, e della biblioteca de objetos, la quale ha solo finestre a vetro fisso.

È inoltre rispettato il requisito per cui almeno il 50% dei bagni abbia ventilazione naturale.

È inoltre verificato che le aperture di ventilazione, escludendo le porte di ingresso, sono disposte su facciate opposte verificando il parametro $^{A2}/_{A1} \geq 0,25$, dove A1 è la sommatoria delle aree di apertura su una medesima facciata, la quale possiede il valore di m^2 maggiore, e A2 è la sommatoria delle aree di apertura in m^2 sulle restanti facciate.

Area finestrata apribile (m²)
4,43
50,61
31,26
29,99

Tabella 14. Aree di aperture delle singole facciate

Dai dati in *Tabella 14*, il coefficiente $^{A2}/_{A1}=1,30$ rispetta quanto richiesto dalla normativa per la ventilazione trasversale.

5.1.3 Verifica dei requisiti di illuminazione naturale

Secondo la norma *NBR 15575-4,* tutti gli ambienti di lunga permanenza e i bagni devono possedere una superficie minima trasparente tramite una o più aperture che garantiscono l'accesso della luce naturale. Si riportano in *Tabella 15* i valori minimi richiesti.

Zona Bioclimatica Superficie minima di ventilazione A (
8	A ≥ 12,5%			
A=100 x (Area illuminazione/Area utile pavimento)				

Tabella 15. Superficie minima di illuminazione naturale

Per calcolare la superficie di illuminazione A, è necessario considerare l'area effettiva, senza considerare il telaio; si calcola quindi utilizzando dei coefficienti analoghi a quelli utilizzati per il calcolo della ventilazione naturale, sempre ricavati da normativa o calcolati.

In *Tabella 16,* sono mostrati i valori per ogni locale a lunga permanenza. I locali evidenziati con lo stesso colore sono considerati un'unica entità, si è fatto questo perché le aree dei corridoi non sono da tenere in considerazione come area utile da normativa ma presentano aperture che devono essere invece considerate nella verifica.

Stanza	Area utile (m²)	Area illuminazione (m²)	A illuminazione (%)	Verifica
Auditório	69,16	4,96	7%	Non Verificato
WC PNE 1	4,26	0,41	10%	Non Verificato
WC masculino 1	4,34			
WC feminino 1	4,34	3,21	37%	Verificato
Circulação 1	3,33			

Sala comercial 3	65,16	17,81	27%	Verificato
Hall	451,93	162,47	36%	Verificato
Circulação 4	6,31	102,	3070	Vermodeo
Correttores 1	16,79	3,78	23%	Verificato
Correttores 2	16,28	3,78	23%	Verificato
Correttores 3	30,59	11,04	36%	Verificato
Сора	11,04	1,81	16%	Verificato
WC masculino 2	9,75			
WC feminino 2	11,36	2,51	10%	Non Verificato
WC PNE 2	3,12			
Circulação 2	3,03			
Circulação 3	8,53	71,12	84%	Verificato
Café	84,55			
Sala comercial 1	26,22	4,29	16%	Verificato
Sala comercial 2	26,61	4,29	16%	Verificato
Biblioteca de objetos	43,9	36,90	84%	Verificato

Tabella 16. Valori di superficie di illuminazione e verifica

La percentuale minima di aperture di illuminazione è verificata in tutti i locali eccetto i due bagni e l'auditorio. Sono state inoltre eseguite altre verifiche dell'illuminazione naturale con simulazione dinamica per ogni locale dell'Innovation Hub.

5.1.4 Calcolo etichetta energetica dell'edificio

Il calcolo dell'etichetta energetica è stato eseguito mediante il metodo *prescritivo*, applicando inoltre le seguenti considerazioni:

- i valori di trasmittanza e assorbimento dell'involucro sono stati calcolati come media pesata dei singoli valori che li compongono (comprese le aperture) in base all'area come da regolamento;
- i limiti ambientali dell'illuminazione sono stati selezionati in base all'attività svolta nei singoli locali;
- si è scelto, in questo primo esempio, di usare condizionatori con etichetta energetica di classe A e con isolamento delle tubazioni, in seguito si tratta l'intera casistica possibile;
- il calcolo del EqNumV relativo al comfort per locali non climatizzati è eseguito secondo la normativa ASHRAE 55, utilizzando le temperature ottenute dalla simulazione dinamica dell'edificio completo di impianto di condizionamento.

Si riportano in *Tabella 17* i valori necessari per il calcolo di pareti e copertura.

Dato	Valore		
Ucopertura	1,74	W/m ² K	
$lpha_{copertura}$	0,51		
U_{pareti}	2,84	W/m ² K	
lphapareti	0,48		
CT_{pareti}	314	kJ/m ² K	

Tabella 17. Dati relativi all'involucro edilizio

Per quanto riguarda l'involucro edilizio sono inoltre richiesti una coppia di parametri: il primo rappresentante la percentuale di aperture zenitali (PAZ) e il secondo rappresentante il fattore solare del vetro di queste aperture. Si ha per l'Innovation Hub:

- PAZ = 2,38%;
- FS = 0.8.

Nel calcolo sono necessari alcuni dati dimensionali dell'edificio:

- area totale costruita (presa all'esterno dei muri e includendo giardini): $A_{tot} = 1181,99 \ m^2;$
- area della copertura proiettata sull'orizzontale al netto di gronde e schermature solari: $A_{pcop}=976,29\ m^2;$
- area utile del pavimento: $A_{pe} = 916,81 m^2$;
- volume totale al netto di giardini interni: $V_{tot} = 4808,23 m^3$;
- area totale dell'involucro edilizio comprese le aperture: $A_{env}=2350,89~m^2$.

Tali dati sono utilizzati per il calcolo di due coefficienti impiegati direttamente nel calcolo:

- fattore di altezza $FA = \frac{A_{pcop}}{A_{tot}} = 0.83;$
- fattore di forma $FF = \frac{A_{env}}{V_{tot}} = 0,49$.

Infine, per il calcolo della classe energetica dell'involucro edilizio, sono necessari dati riguardanti le caratteristiche delle aperture. Si utilizzano:

- il fattore del solare del vetro FS, uguale a quello delle aperture zenitali;
- la percentuale di aperture su tutte le facciate PAF_t o sulla facciata a ovest PAF_o , si utilizza il PAF_t a meno che il PAF_o non sia maggiore del 20% rispetto al PAF_t ;

• gli angoli di ombreggiamento orizzontali *AHS* e verticali *AVS*, calcolati come media pesata dell'area dei singoli angoli di ombreggiamento per ogni apertura.

Si riportano in Tabella 18 tali valori.

PAFt	31%
PAFo	33%
AHS	16,83
AVS	5,27

Tabella 18. Percentuali di aperture e angoli di ombreggiamento delle aperture

Oltre a potenza installata e area utile in cui è installata, la verifica dell'illuminazione richiede la selezione dei tipi di locali in cui è installata nonché il rispetto requisiti specifici per ogni locale. Tali requisiti sono:

- la separazione dei circuiti, cioè se per ogni stanza è presente un dispositivo manuale per lo spegnimento delle luci all'interno. Se il locale ha un'area tra i 250 m² e i 1000 m², il dispositivo deve controllare le luci per un'area massima di 250 m². Se supera i 1000 m², deve controllare un'area massima di 1000 m²;
- il contributo della luce naturale, cioè se esiste la possibilità di spegnere alcune luci vicino ad aperture lasciando accese quelle non interessate dal contributo della luce naturale;
- lo spegnimento automatico mediante sensore di presenza o temporizzatore, ad eccezione di luoghi in cui lo spegnimento automatico possa creare pericoli per gli occupanti o ambienti in cui devono stare accese 24h/24h.

In Tabella 19, si riportano i dati dell'illuminazione artificiale richiesta per il calcolo RTQ-C.

	Area	Potenza	Divisione	Contributo luce	Spegnimento
Stanza	(m ²)	(W)	circuiti	naturale	automatico
Auditório	69,16	800	si	no	no
WC PNE 1	4,26	20	si	si	no
WC masculino 1	4,34	40	si	no	no
WC feminino 1	4,34	40	si	no	no
Circulação 1	3,33	40	si	no	no
Sala comercial 3	65,16	720	si	no	no
Hall	451,93	6100	no	no	no
Correttores 1	16,79	160	si	si	no
Correttores 2	16,28	160	si	si	no
Correttores 3	30,59	320	si	si	no

Circulação 4	6,31	120	si	no	no
Depósito 1 -					
material t.i	4,8	40	si	no	no
Depósito 2 - dml	5,83	40	si	no	no
Сора	11,04	80	si	Sİ	no
WC masculino 2	9,75	80	si	si	no
WC feminino 2	11,36	80	si	si	no
WC PNE 2	3,12	40	si	si	si
Circulação 2	3,03	20	si	no	no
Circulação 3	8,53	160	si	si	no
Sala comercial 1	26,22	320	si	si	no
Sala comercial 2	26,61	320	si	Si	no
Café	84,55	960	si	si	no
Depósito 3 - dml	5,58	40	si	no	no
Biblioteca des					
objetos	43,9	640	si	si	no

Tabella 19. Riassunto dell'illuminazione artificiale dell'Innovation Hub

Nel calcolo si richiedono anche i dati relativi a tipo e potenza del dispositivo per il condizionamento dell'aria dell'edificio; in *Tabella 20* sono riassunti per ogni locale dell'edificio.

Stanza	Area (m²)	Tipo Split	BTU/h Split	Tipo Cassetta	BTU/h Cassetta
Auditório	69,16	0	0	2	48000
WC PNE 1	4,26	0	0	0	0
WC masculino 1	4,34	0	0	0	0
WC feminino 1	4,34	0	0	0	0
Circulação 1	3,33	0	0	0	0
Sala comercial 3	65,16	3	18000	0	0
Hall	495,83	2	18000	9	58000
Correttores 1	16,79	1	12000	0	0
Correttores 2	16,28	1	12000	0	0
Correttores 3	30,59	1	22000	0	0
Circulação 4	6,31	0	0	0	0
Depósito 1 - material t.i	4,8	1	12000	0	0
Depósito 2 - dml	5,83	0	0	0	0
Сора	11,04	0	0	0	0
WC masculino 2	9,75	0	0	0	0
WC feminino 2	11,36	0	0	0	0

WC PNE 2	3,12	0	0	0	0
Circulação 2	3,03	0	0	0	0
Circulação 3	8,53	0	0	0	0
Sala comercial 1	26,22	1	22000	0	0
Sala comercial 2	26,61	1	22000	0	0
Café	84,55	0	0	2	48000
Depósito 3 - dml	5,58	0	0	0	0

Tabella 20. Dispositivi di condizionamento dell'aria nei locali dell'Innovation Hub

Si è scelto, come già menzionato in precedenza, che le tubazioni siano isolate e l'efficienza dei condizionatori sia di livello A. In *Tabella 21*, si riportano le efficienze scelte per i dispositivi.

Tipo	Potenza (BTU/h)	Efficienza
Cassetta	48000	3
Split	18000	3,5
Cassetta	58000	3
Split	12000	3,5
Split	22000	3,5

Tabella 21. Efficienze dei dispositivi di condizionamento dell'aria

È richiesto anche di specificare il valore dell'area dei locali condizionati nell'edificio, il quale è pari a $AC = 835,99 \ m^2$ nel presente caso studio.

L'ultima parte del calcolo richiede l'area di permanenza temporanea non condizionata: per l'Innovation Hub si ha $APT=37,41\ m^2$ poiché da regolamento RTQ-C rientrano in questa area i quattro corridoi e i tre depositi presenti nell'edificio.

Ultimo dato necessario per il calcolo dell'etichetta energetica è l'*EqNumV*, rappresentante, come specificato in precedenza, l'equivalente numerico della percentuale di ore occupate in comfort *POC* nei locali non condizionati a permanenza non temporanea¹¹. È necessario specificare nell'etichetta quale standard di comfort si è utilizzato, in questo caso si è utilizzato la normativa *ASHRAE 55:2010*. Tale norma fornisce il grafico in *Figura 25* che mostra i limiti di accettabilità della temperatura interna in base a quella esterna. Il grafico fornisce due livelli di accettabilità dell'80% e del 90% in cui si prevede che tale percentuale degli occupanti senta condizioni di comfort. Se non diversamente specificato, si considera il campo di accettabilità del 80%.

¹¹ I WC da regolamento RTQ-C devono essere considerati in questo calcolo

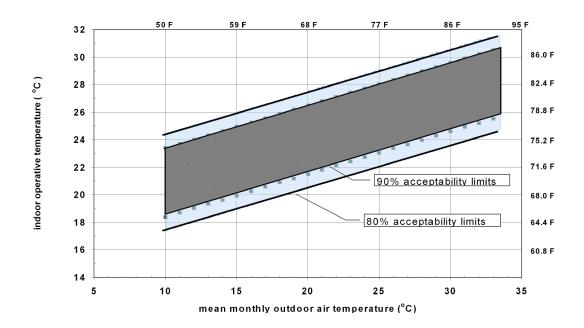


Figura 25. ASHRAE 55:2010 - Modello di comfort adattativo

L'asse delle ascisse del grafico rappresenta la media mensile della temperatura esterna, intesa come la media tra il valore minimo giornaliero medio e il valore massimo giornaliero medio della temperatura dell'aria esterna (a bulbo secco) per il mese in esame.

Tale valore consente di determinare il campo di accettabilità. In relazione ai dati climatici di Fortaleza, il campo di accettabilità della temperatura operativa interna è illustrato in *Figura 26*.

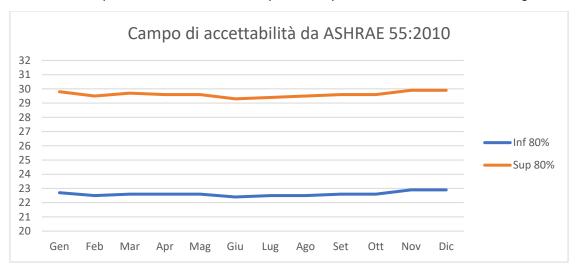


Figura 26. Campo di accettabilità per l'80% di comfort da ASHRAE 55:2010

Dopo aver ottenuto le ore di comfort come da normativa, si ottiene come da regolamento RTQ-C la Tabella~22 che mostra i valori di EqNumV in base al valore di $POC = \frac{Ore~occupate~in~condizioni~di~comfort}{Ore~totali}~x~100.$

POC %	EqNumV	Classificazione finale
POC ≥ 80%	5	Α
70% ≤ POC < 80%	4	В
60% ≤ POC< 70%	3	С
50% ≤ POC < 60%	2	D
POC < 50%	1	E

Tabella 22. EqNumV e classificazione finale in base a POC%

Per ottenere le ore di comfort, è simulato dinamicamente l'edificio con l'impianto di climatizzazione nei locali in cui è presente. In seguito, si ottengono i dati orari di temperatura per i locali necessari, quindi si confrontano con i limiti inferiore e superiore di accettabilità secondo normativa. Infine, sono calcolati il valore di *POC* e il relativo *EqNumV*, i quali vengono mostrati in *Tabella 23*.

Stanza	Ore comfort	POC %	EqNumV
Сора	12604	72%	4
WC PNE	17520	100%	5
WC 1	17331	99%	5
WC 2	17394	99%	5

Tabella 23.Ore di comfort per i locali non condizionati

I valori di *EqNumV* in *Tabella 23* sono per le singole stanze, si devono quindi pesare in base all'area utile del locale per ottenere il valore per l'edificio. Si ottiene un *EqNumV* pari a 4,79.

Si riassumono in *Tabella 24* i risultati relativi all'Innovation Hub per i componenti del calcolo dell'etichetta.

Identificazione	Classificazione
Involucro edilizio	С
Illuminazione	С
Condizionamento aria	А
Comfort locali non condizionati	Α

Tabella 24. Valori di classe energetica per i singoli componenti del calcolo RTQ-C

La classificazione dell'involucro è limitata a C dalla trasmittanza termica e dal coefficiente di assorbimento della copertura. In *Tabella 25* si mostra il punteggio totale e la classe energetica dell'edificio.

Punteggio finale	3,74
Classificazione finale	В

Tabella 25. Classificazione dell'Innovation Hub secondo RTQ-C

5.2 Verifica mediante simulazione dinamica

5.2.1 Verifica termica dell'involucro edilizio mediante verifica della temperatura dell'aria interna

Si esegue una verifica della temperatura dell'aria interna tramite una simulazione dinamica oraria dell'edificio poiché non tutto l'involucro edilizio rispetta i requisiti minimi della normativa *NBR 15575*. La simulazione è eseguita con il software OpenStudio, interfaccia grafica di EnergyPlus. Il modello utilizzato per simulazione è stato creato con OpenStudio Plug-In per SketchUp utilizzando come base un render dell'edificio.

È necessaria la verifica della temperatura dell'aria interna all'edificio in assenza di impianto di climatizzazione invernale e/o estiva: si richiede di verificare che la temperatura dell'aria all'interno dell'edificio sia più confortevole o uguale alla temperatura dell'aria esterna, e sono forniti diversi valori a seconda del livello prestazionale ottenuta. Sono riportati i valori in *Tabella* 26.

Livello di prestazioni termiche in estate	Zona Bioclimatica 8
М	Ti,max ≤ Te,max
1	Ti,max ≤ (Te,max – 1°C)
S	Ti,max ≤ (Te,max - 2°C) Ti,min ≤ (Te,min + 1°C)
Livello di prestazioni termiche in inverno	Zona Bioclimatica 8
M	-
I	-
S	-

Ti,max: valore massimo giornaliero della temperatura dell'aria all'interno dell'edificio (°C)

Te,max: valore massimo giornaliero della temperatura dell'aria all'esterno dell'edificio (°C)

Ti,min: valore minimo giornaliero della temperatura dell'aria all'interno dell'edificio (°C)

Te,min: valore minimo giornaliero della temperatura dell'aria all'esterno dell'edificio (°C)

M= livello minimo di prestazione

I= livello intermedio di prestazione

S= livello superiore di prestazione

Fonte: NBR 15220-3, NBR 15775-1, NBR 15775-4, NBR 15775-5

Tabella 26. Requisiti di temperatura dell'aria interna per zona bioclimatica 8

Come si nota dalla *Tabella 26* per l'Innovation Hub non è richiesta una verifica della temperatura in inverno.

Per il calcolo della temperatura interna si analizzano i locali senza considerare l'apporto di calore derivante da fonti interne (persone e apparecchi).

5.2.1.1 Dati in input della simulazione

5.2.1.1.1 Modello dell'edificio

In *Figura 27* è mostrato il modello utilizzato per la simulazione dinamica dell'edificio. Sono presenti delle semplificazioni per quanto riguardano i *tijolo de vidro* nella *sala comercial 3* e nella *torre dell'acqua:* vengono considerati come un'unica apertura di area pari al totale di quelle dei *tijolo de vidro* su ogni singola facciata. La linea arancione in *Figura 27* rappresenta la direzione del Nord: l'edificio risulta essere ruotato di 21,3° verso Ovest rispetto al Nord.

Viene inoltre mostrata in *Figura 28* la pianta con la divisione delle singole stanze: ogni colore rappresenta una differente *thermal zone* simulata.

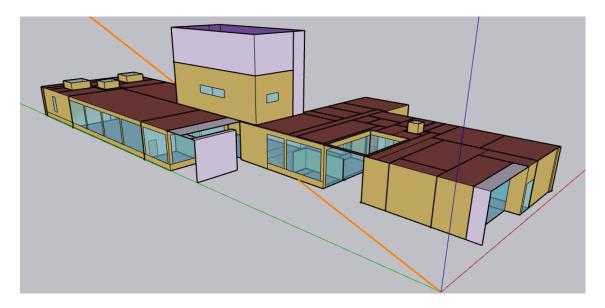


Figura 27. Modello dell'edificio ottenuto con OpenStudio Plug-in per SketchUp

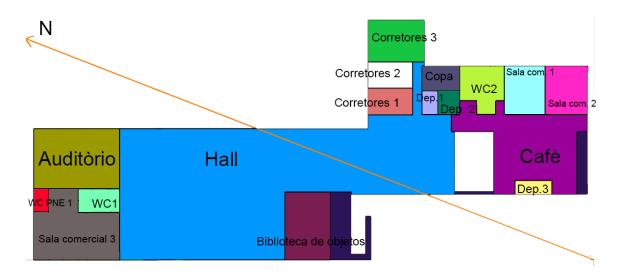


Figura 28. Pianta dell'edificio con thermal zone

Dalla pianta si può vedere che i corridoi (*Circulação*) sono stati associati nel calcolo a un altro locale confinante:

- "Circulação 1" è insieme al WC1,
- "Circulação 2" è insieme al Cafè,
- "Circulação 3" è insieme al Cafè,
- "Circulação 4" è insieme alla Hall.

5.2.1.1.2 Dati climatici

Aquiraz è sita nelle prossimità di Fortaleza, per cui ai fini del calcolo dinamico, sono stati utilizzati i dati climatici relativi alla località Fortaleza per l'anno tipo meteoclimatico.



Figura 29. Posizione di Aquiraz

Il file utilizzato (Weather Data | EnergyPlus, 2021) è quello relativo ai dati INMET¹².

Il clima di Fortaleza è di tipo tropicale con una stagione secca (agosto – dicembre) e una stagione piovosa (febbraio – maggio). Il valore di precipitazione massimo mensile è pari a 510mm di pioggia nel mese di aprile, il valore minimo pari a 4mm nel mese di settembre.

È caratterizzato da una temperatura dell'aria costante durante l'anno con una temperatura massima media giornaliera variabile fra 28-30°C e una minima media giornaliera variabile fra 23-25°C.

L'umidità relativa dell'aria esterna è piuttosto elevata con valori maggiori del 60% per l'87% delle ore dell'anno con punte dell'80-90% durante le ore notturne.

L'area è caratterizzata da una nuvolosità del 50% circa durante tutto l'anno, determinando dunque l'incidenza significativa della radiazione solare diffusa rispetto al totale.

Il sito è caratterizzato da una ventosità moderata, con velocità del vento prevalentemente inferiore a 4-5 m/s e direzione prevalente Est. Nelle ore notturne la velocità del vento è generalmente inferiore a 2 m/s (Planet Smart City, 2019).

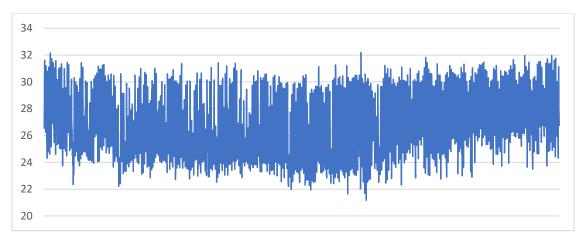


Figura 30. Andamento orario della temperatura a bulbo secco ad Aquiraz

1.1.1.1.1 Involucro edilizio

Oltre ai dati mostrati nella verifica dei requisiti eseguita in precedenza, per l'involucro edilizio, sono stati calcolati i dati relativi alle pareti interne e alla chiusura orizzontale inferiore. Sono riportati in seguito tutti i dati utilizzati non precedentemente mostrati.

Chiusura inferiore orizzontale:

¹² Instituto Nacional de Meteorologia

$$R_{tot} = 0.476 \ m^2 K/_W$$

$$U = 2,103 \ ^W/_{m^2K}$$

Pareti interne, 2 tipi:

• Parete interna di mattoni: $R_{tot} = 0.427 \, \frac{m^2 K}{W}$ $U = 2.339 \, \frac{W}{m^2 K}$

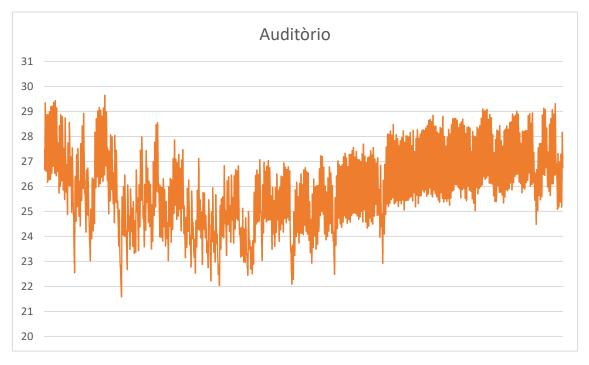
• Parete interna di cartongesso: $R_{tot} = 0.309 \ m^2 K/_W$ $U = 3.241 \ W/_{m^2 K}$

5.2.1.2 Output della simulazione

Sono utilizzati i valori assoluti massimi e minimi sia per la temperatura interna sia per quella esterna per mantenersi dalla parte della sicurezza nella verifica dell'involucro edilizio tramite simulazione.

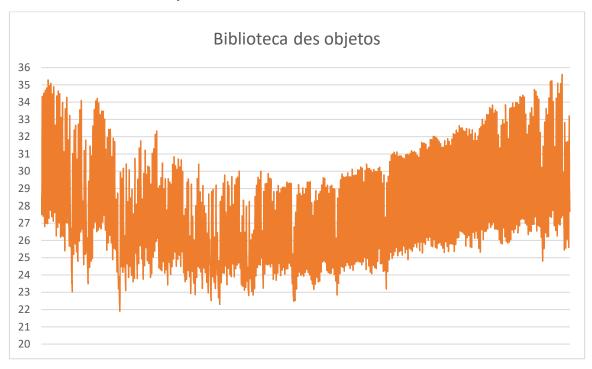
Sono riportati nelle seguenti sezioni i grafici di andamento della temperatura dell'aria interna ottenuti dalla simulazione. Inoltre, è eseguita la verifica della temperatura dell'aria interna ed è mostrato il livello di prestazione verificato per ogni locale a permanenza prolungata dell'Innovation Hub.

5.2.1.2.1 Auditòrio



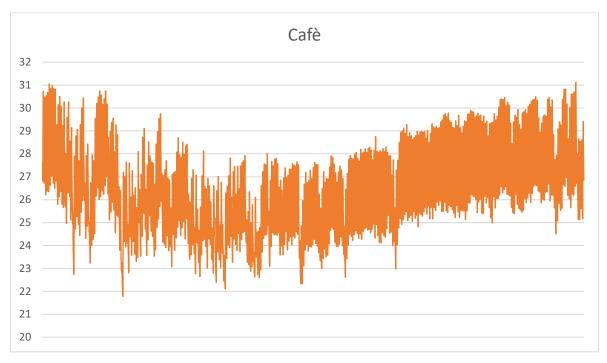
Auditòrio	T ext (°C)	T int max (°C)	T int min (°C)	Livello	S
Te, max	32,2	29,7			
Te, max (°C) -1 °C	31,2				
Te, max (°C) -2 °C	30,2				
Te, min (°C) + 1 °C	22,2		21,6		

5.2.1.2.2 Biblioteca des objetos



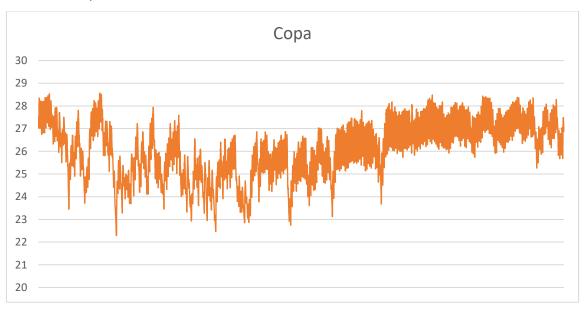
Biblioteca des obj.	T ext (°C)	T int max (°C)	T int min (°C)	Livello	Non raggiunto
Te, max	32,2	35,6			
Te, max (°C) -1 °C	31,2				
Te, max (°C) -2 °C	30,2				
Te, min (°C) + 1 °C	22,2		21,9		

5.2.1.2.3 Café



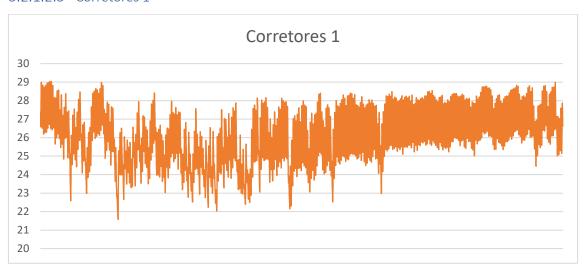
Cafè	T ext (°C)	T int max (°C)	T int min (°C)	Livello	I
Te, max	32,2	31,1			
Te, max (°C) -1 °C	31,2				
Te, max (°C) -2 °C	30,2				
Te, min (°C) + 1 °C	22,2		21,8		

5.2.1.2.4 Copa



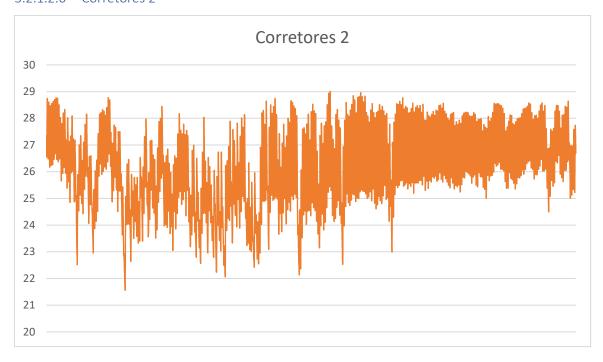
Copa	T ext (°C)	T int max (°C)	T int min (°C)	Livello	1
Te, max	32,2	28,6			
Te, max (°C) -1 °C	31,2				
Te, max (°C) -2 °C	30,2				
Te, min (°C) + 1 °C	22,2		22,3		

5.2.1.2.5 Corretores 1



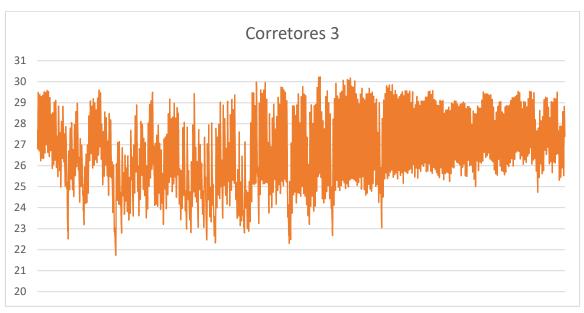
Corretores 1	T ext (°C)	T int max (°C)	T int min (°C)	Livello	S
Te, max	32,2	29,0			_
Te, max (°C) -1 °C	31,2				
Te, max (°C) -2 °C	30,2				
Te, min (°C) + 1 °C	22,2		21,6		

5.2.1.2.6 Corretores 2



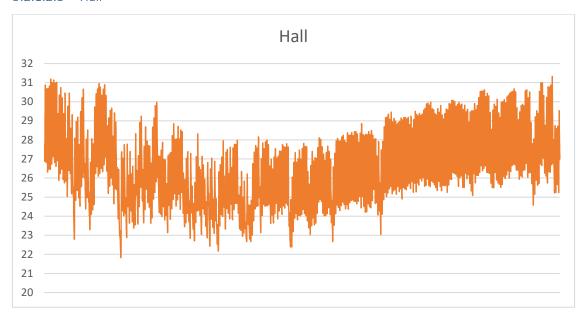
Corretores 2	T ext (°C)	T int max (°C)	T int min (°C)	Livello	S
Te, max	32,2	29,0			
Te, max (°C) -1 °C	31,2				
Te, max (°C) -2 °C	30,2				
Te, min (°C) + 1 °C	22,2		21,6		

5.2.1.2.7 Corretores 3



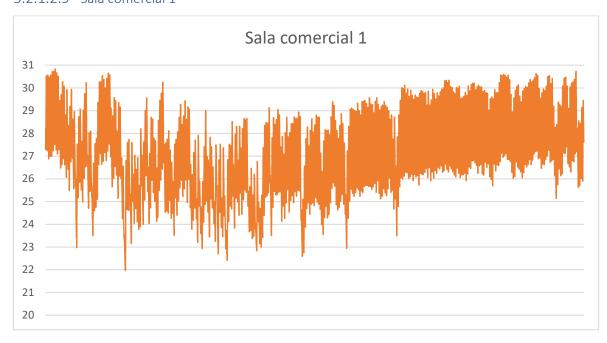
Corretores 3	T ext (°C)	T int max (°C)	T int min (°C)	Livello	I
Te, max	32,2	30,2			
Te, max (°C) -1 °C	31,2				
Te, max (°C) -2 °C	30,2				
Te, min (°C) + 1 °C	22,2		21,7		

5.2.1.2.8 Hall



Hall	T ext (°C)	T int max (°C)	T int min (°C)	Livello	М
Te, max	32,2	31,3			
Te, max (°C) -1 °C	31,2				
Te, max (°C) -2 °C	30,2				
Te, min (°C) + 1 °C	22,2		21,8		

5.2.1.2.9 Sala comercial 1



Sala comercial 1	T ext (°C)	T int max (°C)	T int min (°C)	Livello	I
Te, max	32,2	30,8			
Te, max (°C) -1 °C	31,2				
Te, max (°C) -2 °C	30,2				
Te, min (°C) + 1 °C	22,2		22,0		

5.2.1.2.10 Sala comercial 2



Sala comercial 2	T ext (°C)	T int max (°C)	T int min (°C)	Livello	I
Te, max	32,2	30,6			
Te, max (°C) -1 °C	31,2				
Te, max (°C) -2 °C	30,2				
Te, min (°C) + 1 °C	22,2		22,0		

5.2.1.2.11 Sala comercial 3



Sala comercial 3	T ext (°C)	T int max (°C)	T int min (°C)	Livello	I
Te, max	32,2	30,9			
Te, max (°C) -1 °C	31,2				
Te, max (°C) -2 °C	30,2				
Te, min (°C) + 1 °C	22,2		21,8		

5.2.1.2.12 Prestazioni dell'involucro edilizio

Si evince dai grafici e dalle tabelle nelle sezioni precedenti che tutti gli ambienti dell'Innovation Hub a esclusione della *biblioteca des objetos* rispettano un livello minimo di prestazione. Si riporta per semplicità di lettura in *Tabella 27* un resoconto dei livelli prestazionali dei singoli locali per cui è richiesta la simulazione.

Stanza	Livello di prestazione
Auditório	Superiore
Biblioteca des objetos	Non verificato il minimo
Café	Intermedio
Сора	Intermedio
Correttores 1	Superiore
Correttores 2	Superiore
Correttores 3	Intermedio
Hall	Minimo
Sala comercial 1	Intermedio
Sala comercial 2	Intermedio
Sala comercial 3	Intermedio

Tabella 27. Resoconto dei livelli di prestazione dell'involucro nei singoli locali

5.2.2 Verifica dell'illuminazione naturale mediante simulazione dinamica

La simulazione è eseguita con il software DesignBuilder, interfaccia grafica di EnergyPlus. Il modello utilizzato nella simulazione è lo stesso usato per la verifica della temperatura interna includendo anche i corridoi come locali separati poiché esistono dei requisiti per tali ambienti nella verifica mediante simulazione dell'illuminazione naturale. Il modello così modificato è esportato in un file BIM e utilizzato nel software per eseguire la simulazione come da normativa.

Sono riportati in *Tabella 28* i valori minimi di illuminazione a seconda del livello di prestazione come da normativa *NBR 15575-1*.

Locale		Illuminazione naturale (lux) requisiti per verifica con simulazione		
		I	S	
Soggiorno, stanza, cucina, aree di servizio	≥ 60	≥ 90	≥ 120	
Bagno, corridoio o scala (privati o ad uso comune), garage, parcheggio	-	≥ 30	≥ 45	
M= livello minimo di prestazione	· •			
I= livello intermedio di prestazione				
S= livello superiore di prestazione				

Tabella 28. Requisiti di illuminazione naturale

Per eseguire la simulazione la normativa fornisce i seguenti requisiti:

- 23 aprile ore 9:30,
- 23 ottobre ore 15:30,
- indice di nuvolosità pari a 50%,
- considerare il piano di lavoro al centro dell'ambiente, ad una altezza di 0,75 m rispetto al piano di calpestio,
- considerare il piano di lavoro al centro del corridoio, ad una altezza di 0,75 m rispetto al piano di calpestio.

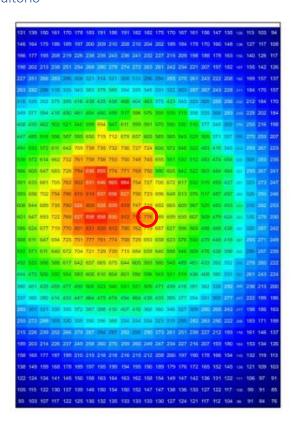
5.2.2.1 Output simulazione dinamica per i singoli locali

Si è considerato per il calcolo un indice di riflessione per le pareti e per il soffitto pari a 0,4 e per il pavimento pari a 0,7.

I risultati della *sala comercial 3* e della *hall* non sono precisi per la semplificazione dei *tijolo de vidro* descritta in precedenza.

Si riportano le mappe di illuminamento naturale ottenute per ogni locale ad eccezione di Deposito 1, Deposito 2 e Deposito 3 poiché non presentano aperture per l'illuminazione naturale.

5.2.2.1.1 Auditorio





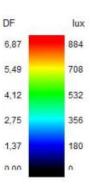
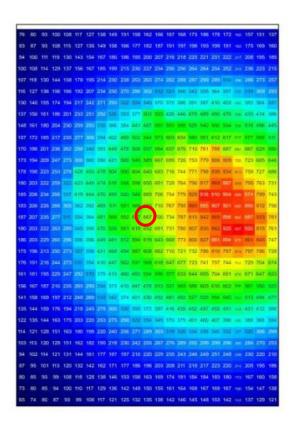


Figura 31. Livello di illuminamento 23 aprile





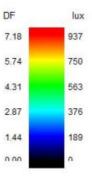


Figura 32. Livello di illuminamento 23 ottobre

5.2.2.1.2 Biblioteca des objetos

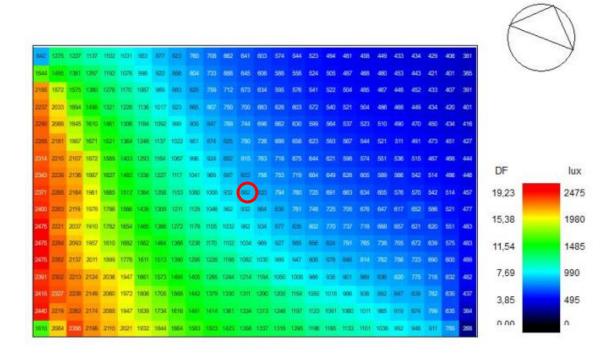


Figura 33. Livello di illuminamento 23 aprile

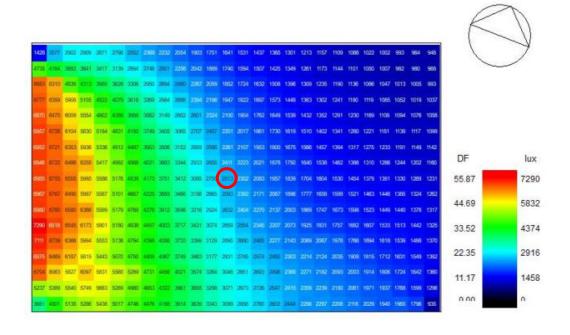


Figura 34. Livello di illuminamento 23 ottobre

5.2.2.1.3 Cafè

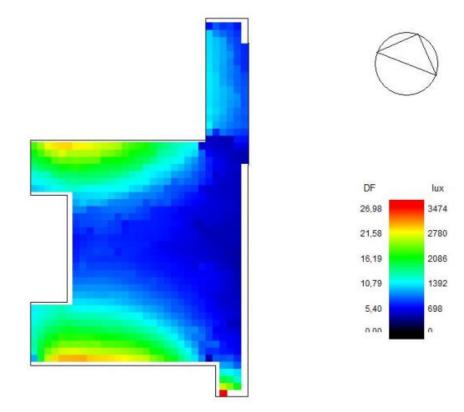


Figura 35. Livello di illuminamento 23 aprile

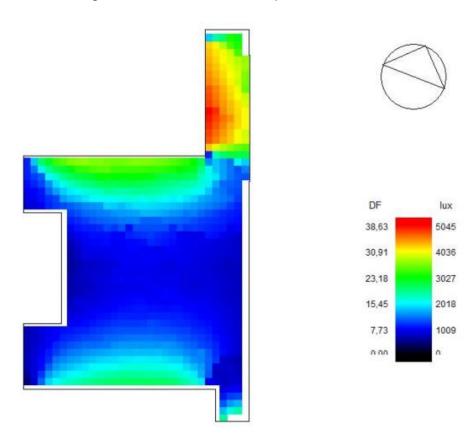
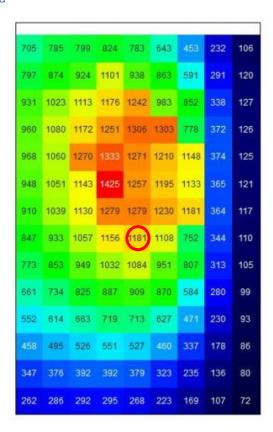


Figura 36. Livello di illuminamento 23 ottobre

5.2.2.1.4 Copa



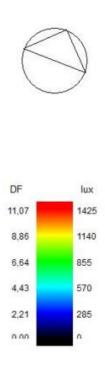
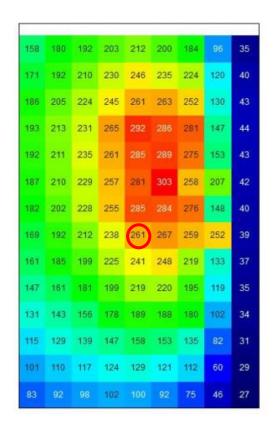


Figura 37. Livello di illuminamento 23 aprile



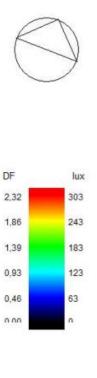
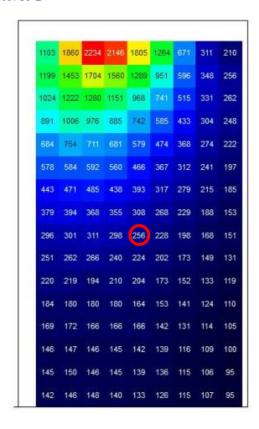


Figura 38. Livello di illuminamento 23 ottobre

5.2.2.1.5 Corretores 1



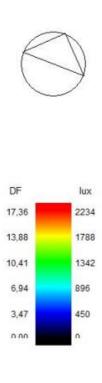
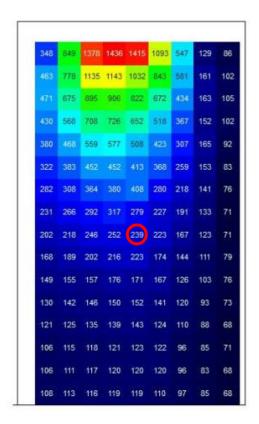


Figura 39. Livello di illuminamento 23 aprile





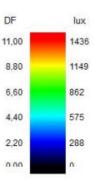
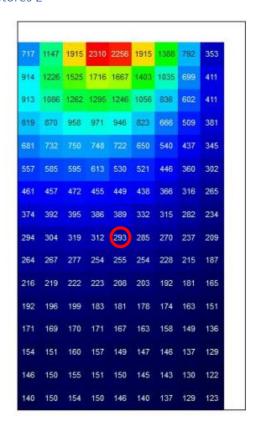


Figura 40. Livello di illuminamento 23 ottobre

5.2.2.1.6 Corretores 2





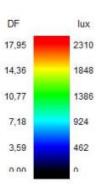
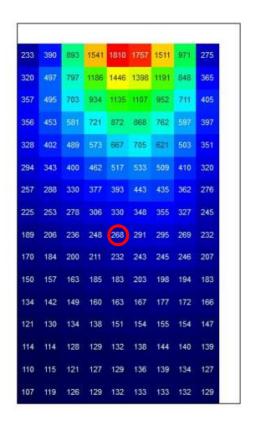


Figura 41. Livello di illuminamento 23 aprile





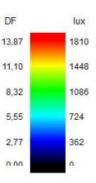
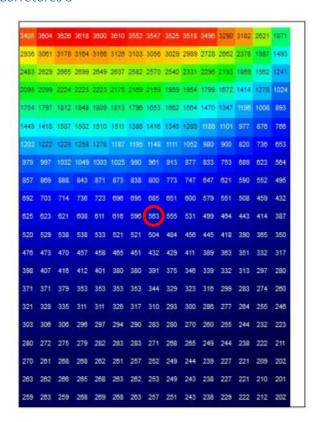


Figura 42. Livello di illuminamento 23 ottobre

5.2.2.1.7 Corretores 3





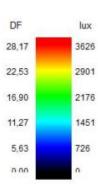
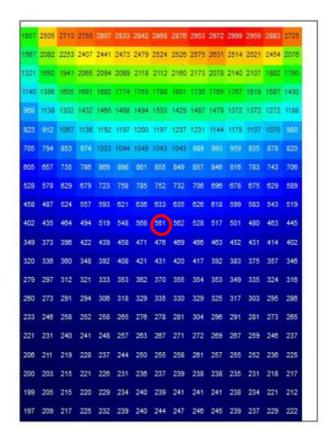


Figura 43. Livello di illuminamento 23 aprile





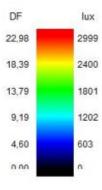


Figura 44. Livello di illuminamento 23 ottobre

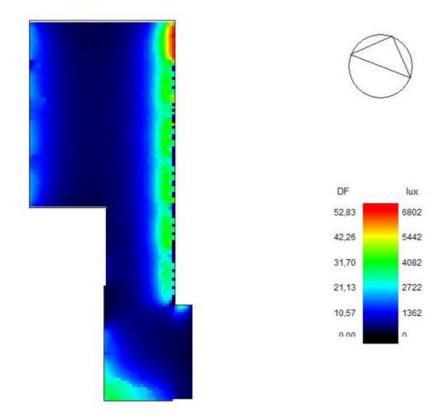


Figura 45. Livello di illuminamento 23 aprile

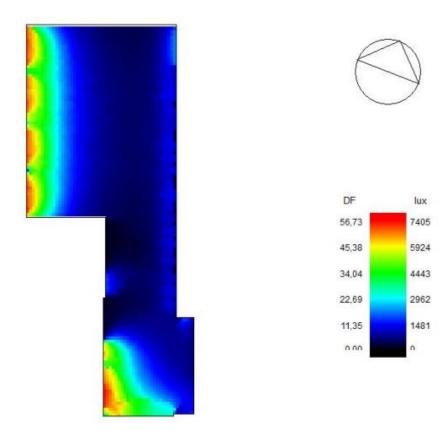


Figura 46. Livello di illuminamento 23 ottobre

5.2.2.1.9 Sala comercial 1

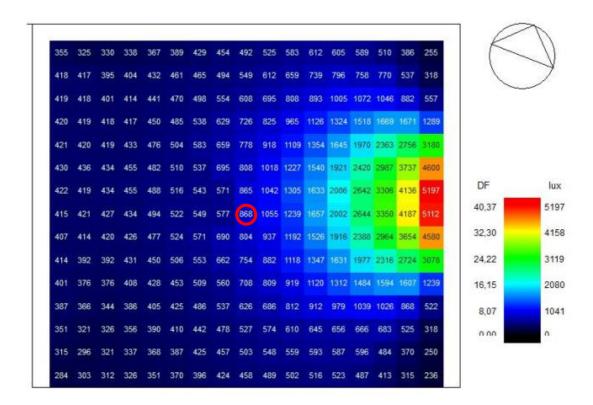


Figura 47. Livello di illuminamento 23 aprile

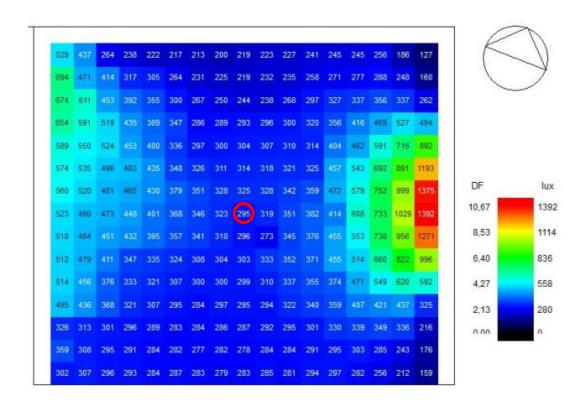


Figura 48. Livello di illuminamento 23 ottobre

5.2.2.1.10 Sala comercial 2

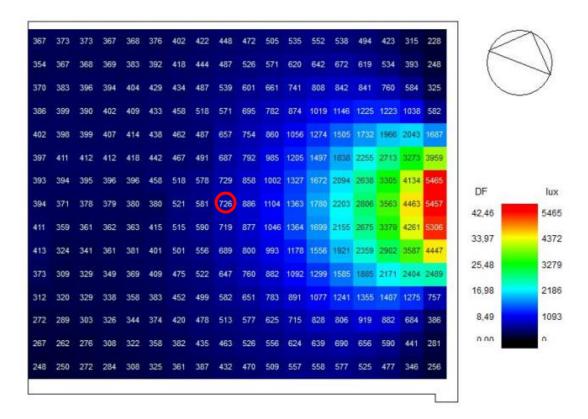


Figura 49. Livello di illuminamento 23 aprile

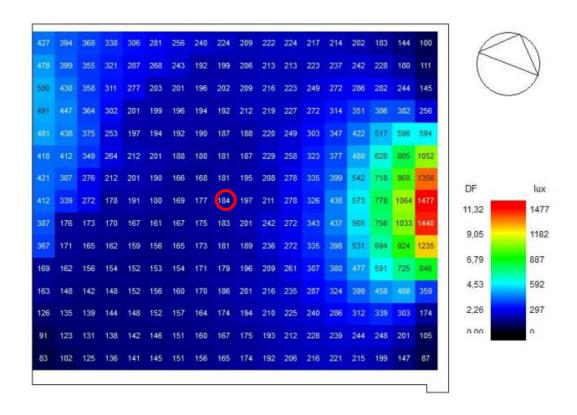


Figura 50. Livello di illuminamento 23 ottobre

5.2.2.1.11 Sala comercial 3

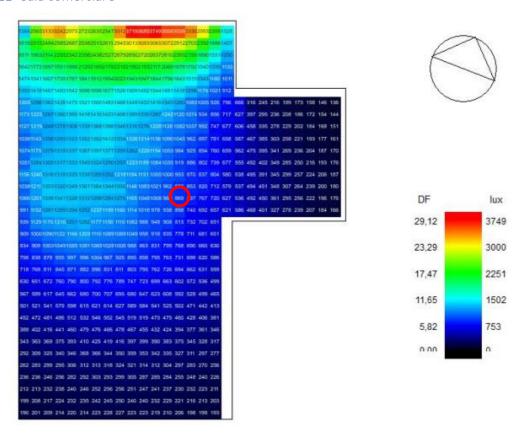


Figura 51. Livello di illuminamento 23 aprile

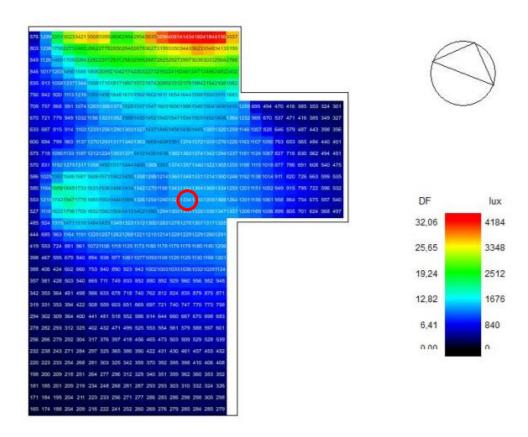


Figura 52. Livello di illuminamento 23 ottobre

5.2.2.1.12 WC PNE

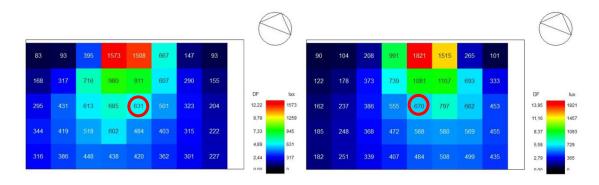


Figura 53. Livello di illuminamento 23 aprile

Figura 54. Livello di illuminamento 23 ottobre

5.2.2.1.13 WC 1 e Circulação 1

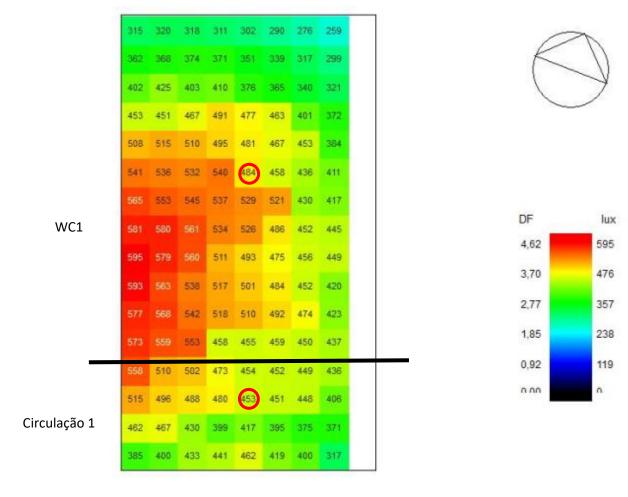


Figura 55. Livello di illuminamento 23 aprile

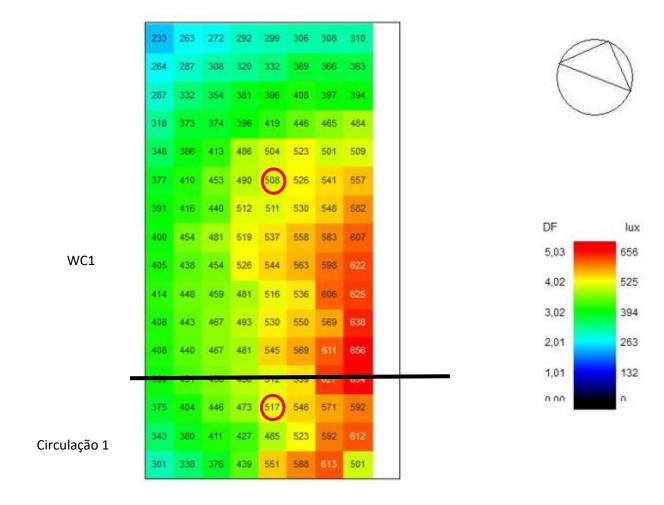


Figura 56. Livello di illuminamento 23 ottobre

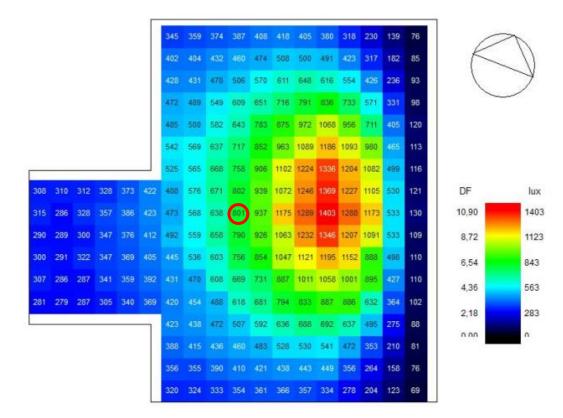


Figura 57. Livello di illuminamento 23 aprile

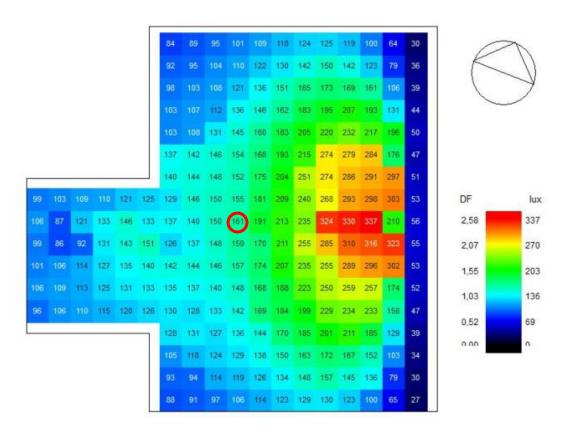


Figura 58. Livello di illuminamento 23 ottobre

5.2.2.1.15 Circulação 2

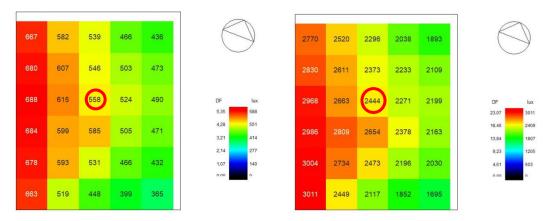


Figura 59. Livello di illuminamento 23 aprile

Figura 60. Livello di illuminamento 23 ottobre

5.2.2.1.16 Circulação 3

Si riporta in dettaglio solo la parte più problematica per quanto riguarda l'illuminazione naturale.

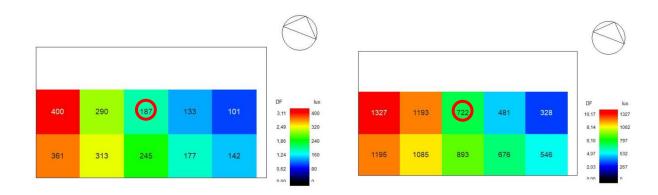


Figura 61. Livello di illuminamento 23 aprile

Figura 62. Livello di illuminamento 23 ottobre



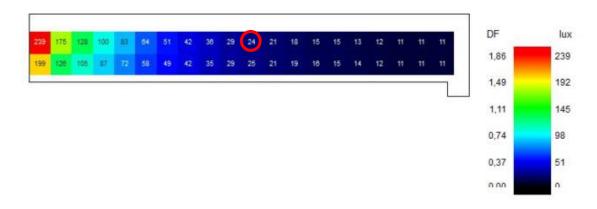


Figura 63. Livello di illuminamento 23 aprile



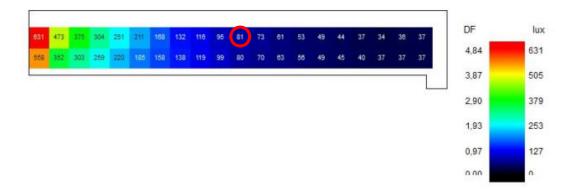


Figura 64. Livello di illuminamento 23 ottobre

5.2.2.1.18 Verifica normativa dei livelli di illuminamento

Si riportano nella *Tabella 29* e nella *Tabella 30* i resoconti dei livelli prestazionali per ogni locale dell'Innovation Hub, mostrando solo il valore minimo di illuminazione naturale e il livello di prestazione raggiunto.

Locale	Illuminamento minimo (lux)	Livello prestazione
Auditorio	776	Superiore
Biblioteca des objetos	882	Superiore
Cafè	441	Superiore
Сора	1181	Superiore
Corretores 1	256	Superiore
Corretores 2	293	Superiore
Corretores 3	563	Superiore
Hall	295	Superiore
Sala comercial 1	868	Superiore
Sala comercial 2	726	Superiore
Sala comercial 3	869	Superiore
WC PNE 1	631	Superiore
WC1	484	Superiore
WC2	801	Superiore
Circulação 1	453	Superiore
Circulação 2	558	Superiore
Circulação 3	187	Superiore
Circulação 4	24	Minimo

Tabella 29. Verifica livello di illuminazione minimo per il 23 aprile ore 9.30

Locale	Illuminamento minimo (lux)	Livello prestazione
Auditorio	667	Superiore
Biblioteca des objetos	2513	Superiore
Cafè	460	Superiore
Сора	261	Superiore
Corretores 1	239	Superiore
Corretores 2	268	Superiore
Corretores 3	561	Superiore
Hall	192	Superiore

Sala comercial 1	295	Superiore
Sala comercial 2	184	Superiore
Sala comercial 3	1354	Superiore
WC PNE	670	Superiore
WC1	508	Superiore
WC2	161	Superiore
Circulação 1	517	Superiore
Circulação 2	2444	Superiore
Circulação 3	722	Superiore
Circulação 4	81	Superiore

Tabella 30. Verifica livello di illuminazione minimo per il 23 ottobre ore 15.30

Dai dati ottenuti si evince che sia nel giorno di prova del 23 aprile sia del 23 ottobre vengono rispettati i requisiti minimi in ogni locale. I dati relativi al *cafè* e alla *hall* non sono strettamente quelli in centro al locale per difficoltà di lettura: si sono utilizzati i valori minimi ottenuti nella simulazione per tali ambienti senza avere indicazioni specifiche dal software sulla loro posizione nella mappa di illuminamento.

6 Energia elettrica

Mediante simulazione dinamica con *OpenStudio*, sono stimati i consumi energetici elettrici dell'illuminazione interna ed esterna, dell'impianto di condizionamento dell'aria e delle apparecchiature elettriche presenti nell'Innovation Hub.

Non avendo dati dettagliati sui consumi elettrici degli accessori dell'impianto idraulico, delle pompe dell'impianto antincendio, delle apparecchiature presenti all'interno e all'esterno dell'Innovation Hub e dell'illuminazione di emergenza, si è stimato un aumento dei consumi del 5% sul totale mensile. Tale valore è ipotizzato per eccesso per mantenere un margine di sicurezza, non avendo inoltre tutte apparecchiature elettriche a funzionamento continuo tra suddette categorie.

6.1 Stima dei consumi elettrici dell'edificio mediante simulazione dinamica

6.1.1 Illuminazione

La simulazione dinamica è la stessa utilizzata per le verifiche termiche dell'edificio. I consumi dell'illuminazione interna ed esterna sono stati stimati inserendo i dati presenti del progetto dell'Innovation Hub nella simulazione. Per l'illuminazione interna, è richiesto dal software il parametro di densità luminosa espresso in $\frac{W}{m^2}$. Per i calcoli sono impiegati i profili di utilizzazione standard da norma *ASHRAE 189.1-2009* in base alla destinazione d'uso dell'edificio. Per l'illuminazione esterna, invece, è richiesta la potenza totale installata espressa in W, mentre per i calcoli si impiega un profilo di utilizzazione coincidente con l'accensione totale al tramonto e lo spegnimento all'alba.

In *Tabella 31*, si riportano i valori di densità di potenza luminosa dei singoli ambienti simulati; sono omessi i corridoi poiché inclusi nella zona adiacente, calcolando il valore di densità di potenza totale come medie pesate sulle aree che compongono le zone simulate.

Zona simulata	W/m ²
AUDITÓRIO	11,6
BIBLIOTECA DES OBJETOS	14,6

CAFÉ	11,9
COPA	7,2
CORRETTORES 1	9,5
CORRETTORES 2	9,8
CORRETTORES 3	10,5
DEPÓSITO 1 - MATERIAL T. I	8,3
DEPÓSITO 2 - DML	6,9
DEPÓSITO 3 - DML	7,2
HALL	13,6
SALA COMERCIAL 1	12,2
SALA COMERCIAL 2	12,0
SALA COMERCIAL 3	11,0
WC 1	10,0
WC 2	8,3
WC PNE	4,7

Tabella 31. Densità di potenza delle zone simulate

In *Figura 65,* si riporta il profilo di utilizzazione dell'illuminazione dallo standard *ASHRAE* relativo a un edificio misto con uffici, dove sull'asse verticale è mostrata la percentuale di utilizzazione espressa in numero decimale.

Profilo di utilizzo dell'illuminazione interna

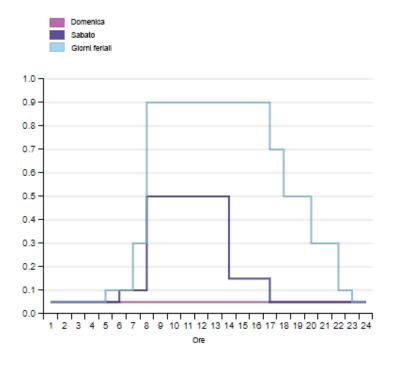


Figura 65. Profilo di utilizzo dell'illuminazione interna

In *Tabella 32* sono riportati i consumi di energia elettrica in kWh dell'Innovation Hub dovuti all'illuminazione interna.

Tabella in kWh	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Illuminazione interna	3309	3020	3432	3087	3432	3295	3224	3432	3210	3309	3295	3224

Tabella 32. Consumi mensili dovuti all'illuminazione interna dell'edificio

Per l'illuminazione esterna sono utilizzati quattro tipi diversi di sistemi di illuminazione: lampioni (con due lampade da 100~W ciascuno) e tre tipi di lampade da esterno diverse (con potenze di 20~W, 40~W e 110~W), con una potenza installata totale pari a 7440~W. Non si riporta il profilo di utilizzo perché calcolato giorno per giorno dal software in base ai dati di alba e tramonto. Si riportano in *Tabella 33* i consumi di energia elettrica dell'illuminazione esterna.

Tabella in kWh												
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Illuminazione esterna	2724	2470	2773	2691	2806	2734	2806	2796	2687	2740	2641	2713

Tabella 33. Consumi mensili dovuti all'illuminazione esterna dell'edificio

6.1.2 Apparecchiature elettriche

Come per l'illuminazione interna, l'energia elettrica consumata dalle apparecchiature elettriche è stimata dalla simulazione dinamica. Anche qui sono richiesti i valori di densità di potenza delle apparecchiature in $\frac{W}{m^2}$ e i profili di utilizzazione. Non avendo con precisione l'elenco delle apparecchiature interne presenti, sono utilizzati i valori dalla norma *ASHRAE 189.1-2009*, riportati in *Tabella 34*.

Zona simulata	W/m ²
AUDITÓRIO	4,0
BIBLIOTECA DES OBJETOS	5,8
CAFÉ	48,0
COPA	48,0
CORRETTORES 1	6,9
CORRETTORES 2	6,9
CORRETTORES 3	6,9
DEPÓSITO 1 - MATERIAL T. I	0,0
DEPÓSITO 2 - DML	0,0

DEPÓSITO 3 - DML	0,0
HALL	7,6
SALA COMERCIAL 1	41,4
SALA COMERCIAL 2	41,4
SALA COMERCIAL 3	41,4
WC 1	0,8
WC 2	0,8
WC PNE	0,8

Tabella 34. Densità di potenza delle zone simulate

I valori in *Tabella 34* sono ricavati in base alla destinazione d'uso della zona simulata. Si riportano in seguito quelli utilizzati dalla norma *ASHRAE 189.1-2009*:

- per l'auditòrio: i dati relativi a una sala conferenza;
- per la biblioteca des objetos: i dati relativi a un ufficio con consumi ridotti poiché oltre a funzionare come deposito degli oggetti, si ha la possibilità in questo locale di utilizzare gli oggetti perché concepito con appositi banchi di lavoro;
- per i tre depositi: i dati relativi a depositi;
- per café e copa: i dati relativi a sale destinate alla preparazione e consumo dei cibi;
- per i tre corretores: i dati relativi a un piccolo ufficio;
- per la hall: avendo destinazioni d'uso diverse, i dati relativi ad un ufficio openspace destinato a diverse attività;
- per i tre locali sala comercial: i dati relativi a un'area destinata alla vendita al dettaglio;
- per i WC: i dati relativi un bagno in un luogo pubblico.

Il profilo di utilizzazione selezionato, riportato in *Figura 66*, proviene dalla stessa norma da cui sono ricavati i dati della densità di potenza delle apparecchiature. Anche per le apparecchiature elettriche si è utilizzato il profilo relativo a un edificio misto con uffici.

Profilo di utilizzo delle apparacchiature elettriche

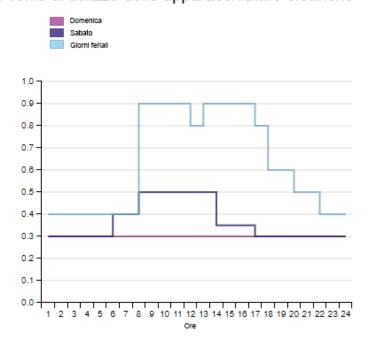


Figura 66. Profilo di utilizzo delle apparecchiature elettriche

In *Tabella 35*, sono riportati i consumi di energia elettrica dell'illuminazione interna in kWh nell'Innovation Hub.

Tabella in kWh												
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Apparecchiature	6343	5755	6467	6007	6467	6230	6245	6467	6131	6343	6230	6245

Tabella 35. Consumi mensili dovuti alle apparecchiature interne presenti nell'edificio

6.1.3 Aria condizionata

I dati relativi al consumo di energia elettrica dei sistemi di aria condizionata sono stimati modellando nella simulazione dinamica i sistemi di condizionamento presi dal progetto dell'Innovation Hub. Per limitazioni dovute al software, ogni singolo dispositivo presente nell'impianto è stato modellato come un dispositivo composto da diversi componenti singoli, cioè un dispositivo per il prelievo e l'immissione dell'aria in ambiente e un componente che simula uno scambiatore di calore; in questo modo si riesce a simulare l'unità interna di un sistema di condizionamento (Benne, 2014).

Si mostra in Figura 67 il modello di unità interna del sistema di condizionamento dell'aria.

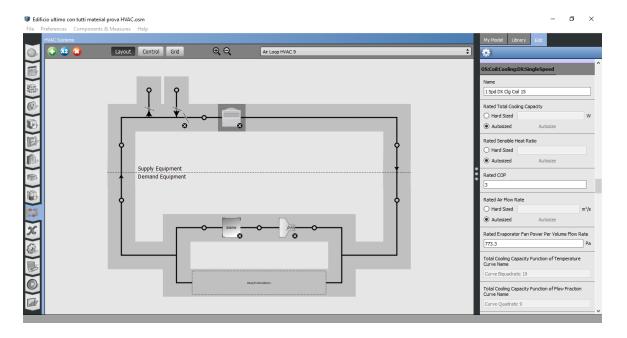


Figura 67. Modello dell'unità interna del sistema di condizionamento dell'aria

Dopo la modellazione di tutte le unità nei diversi ambienti, si è impostato l'intervallo di temperatura a cui l'impianto di condizionamento deve lavorare; si è scelto di utilizzare i dati dalla norma ASHRAE non avendo specifiche nelle norme brasiliane per quanto riguarda la temperatura interna dei locali climatizzati. In *Figura 68*, si può vedere il grafico del range di temperatura per il raffrescamento dei locali.

Raffrescamento

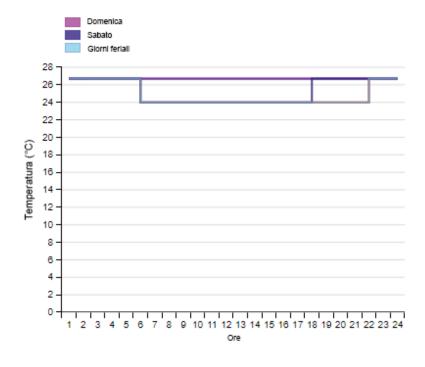


Figura 68. Range temperatura raffrescamento locali climatizzati

In Tabella 36, sono riportati i consumi dell'impianto di condizionamento dell'edificio.

Tabella in kWh												
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Condizionamento aria	9815	7847	7826	6612	6889	7146	7094	8177	8831	9329	9879	9862

Tabella 36. Consumi mensili dovuti all'impianto di condizionamento dell'edificio

6.1.4 Consumi elettrici totali

Dopo il calcolo dei consumi stimati dalla simulazione dinamica, si è scelto di aggiungere un margine di sicurezza del 5% ai consumi totali non conoscendo con esattezza quali apparecchiature si trovano all'interno dell'edificio e quali *smart solutions*¹³ saranno installate all'esterno dell'edificio. Inoltre, in tale aumento di consumo di energia elettrica, si stimano i consumi degli accessori dell'impianto antincendio¹⁴ e dell'impianto idraulico.

Si riporta in *Figura 69* il resoconto dei consumi elettrici stimati per ogni mese.

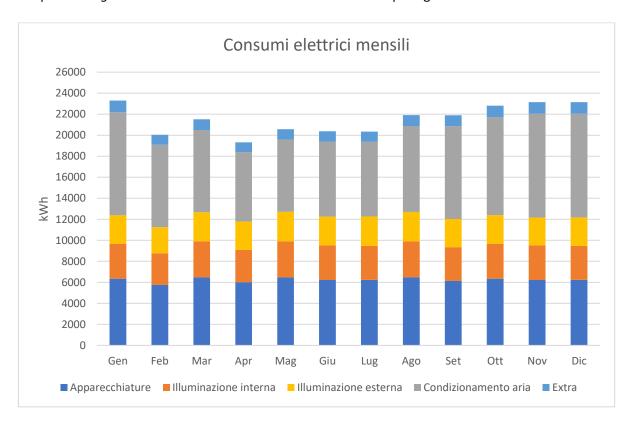


Figura 69. Consumi elettrici mensili dell'Innovation Hub

¹³ Panchine intelligenti, smart lighting e stazioni di ricarica di veicolo *soft mobility* elettrici

 $^{^{14}}$ Le pompe e luci di emergenza sono senza una programmazione di utilizzo costante e fissa

In Tabella 37, sono inoltre mostrati i consumi con i valori dettagliati.

Tabella in kWh	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot
Apparecchiature	6343	5755	6467	6007	6467	6230	6245	6467	6131	6343	6230	6245	74928
Illuminazione	3309	3020	3432	3087	3432	3295	3224	3432	3210	3309	3295	3224	39269
interna													
Illuminazione	2724	2470	2773	2691	2806	2734	2806	2796	2687	2740	2641	2713	32582
esterna													
Condizionamento	9815	7847	7826	6612	6889	7146	7094	8177	8831	9329	9879	9862	99307
aria													
Extra 5%	1104	950	1020	915	974	965	963	1038	1038	1081	1097	1097	12244

Tabella 37. Consumi elettrici mensili e totali annuali

Da questi dati si ottiene il consumo di energia elettrica totale annuale dell'Innovation Hub che risulta essere pari a $258390,64 \ kWh$.

6.2 Studio di fattibilità di produzione di energia elettrica mediante fonti rinnovabili

In seguito alla stima dei consumi di energia elettrica dell'edificio, sono eseguiti calcoli preliminari di fattibilità tecnica di impianti di micro-eolico e fotovoltaico.

6.2.1 Utilizzo dell'eolico

Per la possibilità di un eventuale impianto di micro-eolico, si parte dall'analisi della velocità del vento. Sono stati utilizzati i dati meteorologici della simulazione dinamica dell'edificio estratti dal file relativo con il software *Climate Consultant 6.0*¹⁵.

In *Figura 70*, è mostrato l'andamento della velocità del vento nel sito di interesse e, in *Figura 71*, è mostrata la rosa dei venti.

 $^{^{15}\,} S caricabile\, gratuitamente\, da\, \underline{http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/climate-consultant/request-climate-consultant.php}$

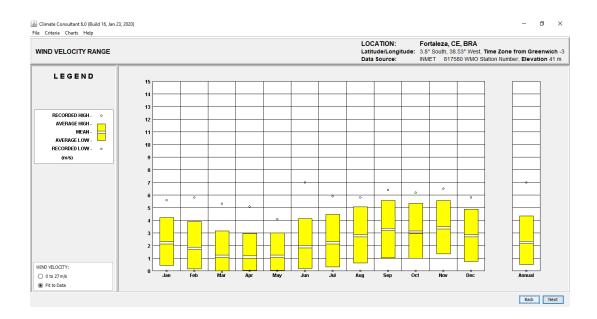


Figura 70. Andamento della velocità del vento

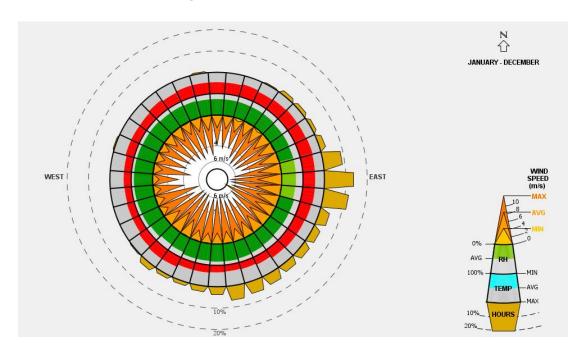


Figura 71. Rosa dei venti

Dalle figure precedenti si nota che l'andamento della velocità del vento è costante durante l'anno e la direzione prevalente è verso l'Est.

Nei calcoli per gli impianti eolici non si può utilizzare la velocità media del vento poiché la potenza di un impianto eolico è proporzionale alla terza potenza della velocità. Si utilizza, invece, la distribuzione statistica di Weibull¹⁶ per il calcolo della producibilità di un impianto eolico,

88

¹⁶ Dal nome del matematico svedese Waloddi Weibull che la descrisse nel 1951.

poiché è l'approssimazione più adatta per le frequenze delle velocità medie del vento (ABB, 2011).

Mediante l'ambiente di calcolo numerico MATLAB, si esegue la distribuzione di Weibull mostrata in Figura~72, la quale dimostra che, durante l'anno, la velocità del vento nel sito dove è costruito l'Innovation Hub non supera i 10~m/s, mentre, si ha un'elevata probabilità che abbia un valore inferiore ai 5~m/s.

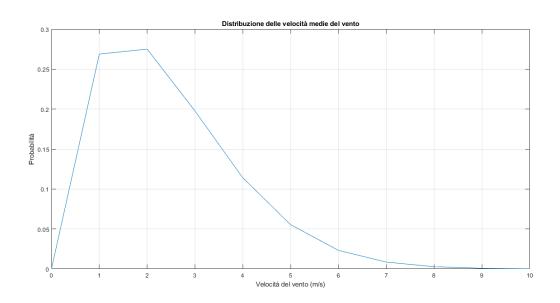


Figura 72. Distribuzione di Weibull ottenuta con MATLAB

Per un generatore eolico, sia ad asse orizzontale sia ad asse verticale, sono presenti dei limiti di velocità:

- velocità minima del vento (*cut-in*), con valori tipici di $3 \div 5 m/s$,
- velocità nominale di progetto, alla quale l'aerogeneratore eroga la potenza nominale, con valori tipici di $10 \div 15 \ m/s$,
- velocità massima del vento (*cut-off*), limite di sicurezza oltre a cui la turbina viene frenata per evitare sollecitazioni meccaniche troppo elevate, con valori tipici di circa $20 \div 25 \, m/s$.

Da questi dati sui generatori eolici e dai dati meteo della zona di interesse, si può concludere che la velocità del vento è troppo bassa per poter utilizzare un impianto micro-eolico, cioè non è possibile raggiungere la potenza nominale di progetto.

6.2.2 Fotovoltaico

Per il dimensionamento dell'impianto fotovoltaico, si utilizza il metodo proposto dall'ENEA¹⁷ nel suo volume "Progettare e installare un impianto fotovoltaico" pubblicato nel 2008 in collaborazione con la Regione Sicilia (Vivoli, 2008).

Tale volume basa i calcoli sulle norme *UNI 10349*, *UNI 8477* e *IEC 60904* riconosciute in Brasile, il quale non ha una norma specifica per la progettazione degli impianti fotovoltaici.

Il metodo valuta l'energia producibile dal fotovoltaico calcolando la radiazione incidente sulla superficie dei moduli fotovoltaici.

Si calcola quindi la radiazione incidente partendo dalla radiazione sul piano orizzontale deducibile dai dati metereologici. Si è utilizzato in questo calcolo il database di radiazione solare PVGIS-NSRDB frutto della collaborazione tra il PVGIS¹⁸ e il NREL¹⁹ (European Commission Joint Research Centre, 2019).

Si riporta in Figura 73 l'irraggiamento solare globale sul piano orizzontale necessario per i calcoli.

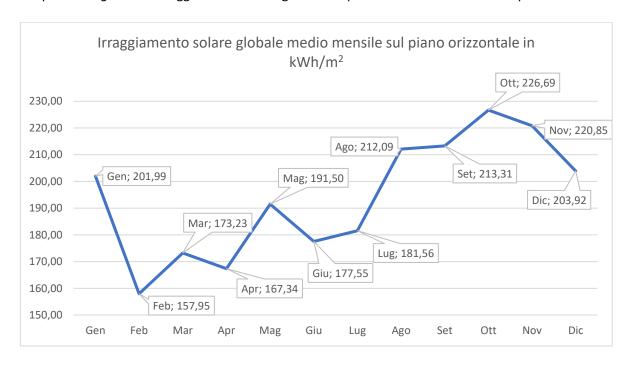


Figura 73. Irraggiamento solare globale sul piano orizzontale

-

¹⁷ Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

¹⁸ Photovoltaic Geographical Information System sviluppato dal centro di ricerca della commissione Europea

¹⁹ National Renewable Energy Laboratory degli USA

È necessario inoltre conoscere le singole componenti che compongono la radiazione solare:

- componente diretta (beam radiation) H_b ,
- componente diffusa (diffuse radiation) H_d,
- componente riflessa (albedo) H_a .

Per conoscere le singole componenti bisogna prima calcolare le componenti sul piano orizzontale:

- componente diretta (beam radiation) H_{bo},
- componente diffusa (diffuse radiation) H_{do} .

In *Figura 74* sono presenti i dati necessari per ottenere la componente diffusa sul piano orizzontale partendo dalla componente globale.

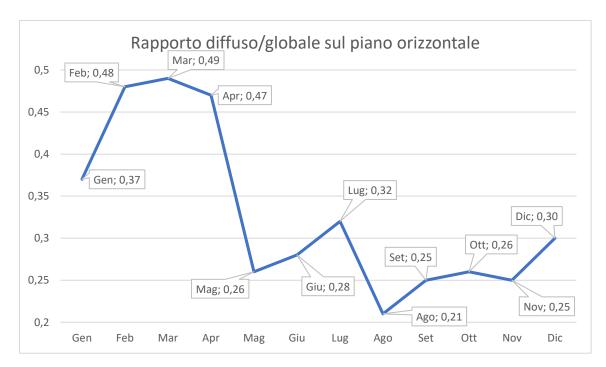


Figura 74. Rapporto tra componente diffusa e radiazione globale sul piano orizzontale

Dopo aver calcolato la componente diffusa H_{do} , si può quindi calcolare la componente diretta dalla relazione $H_{bo}=H_{go}-H_{do}$.

Si riassumono in *Tabella 38* i valori calcolati sul piano orizzontale.

kWh/m²	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
H_{go}	201,99	157,95	173,23	167,34	191,50	177,55	181,56	212,09	213,31	226,69	220,85	203,92
H_{do}	74,74	75,82	84,88	78,65	49,79	49,71	58,10	44,54	53,33	58,94	55,21	61,18

 H_{bo} 127,25 82,13 88,35 88,69 141,71 127,84 123,46 167,55 159,98 167,75 165,64 142,74

Tabella 38. Valori delle componenti della radiazione solare sul piano orizzontale

Da questi valori si possono ora calcolare le componenti su piani con un angolo rispetto all'orizzontale: tale angolo prende il nome di angolo di tilt e si indica con la lettera greca β .

Inoltre, si ipotizza che i moduli fotovoltaici siano perfettamente esposti a Nord, avendo quindi un angolo di azimut γ pari a 0°.

Per calcolare i valori sul piano non orizzontale si utilizzano le seguenti relazioni:

- $H_b=H_{bo} imes R_b$, dove R_b è un coefficiente che dipende dall'angolo di $tilt~\beta$, dalla latitudine del sito ϕ , dalla declinazione solare δ e dal rapporto ${}^{H_f}\Big/_{H_{o,f}}$, il quale rappresenta un coefficiente per la radiazione extra atmosferica,
- $H_d = H_{do} \times \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right)$,
- $H_b = H_{go} \times a \times \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right)$, dove a è il coefficiente di albedo, nei calcoli dell'Innovation Hub è pari a 0,27, il quale è il valore di una parete scura di un edificio (copertura in malta dell'edificio).

Prima dei calcoli delle singole componenti, si è dovuto scegliere l'angolo di tilt utilizzando una relazione empirica che tiene conto del luogo di installazione e della necessità di variare l'angolo in funzione del periodo dell'anno. Tale relazione approssima la scelta ottimale degli angoli a un polinomio di terzo grado. Si riporta qui di seguito la relazione relativa all'emisfero meridionale nel quale si trova l'edificio del caso studio, dove φ è la latitudine del sito in esame (Jacobson & Jadhav, 2018):

$$[-0.41657 + \varphi \times (1.4216 + \varphi \times (0.024051 + \varphi \times 0.00021828))]$$

Trovandosi a una latitudine di -3.8° , si ottiene un angolo ottimale di tilt pari a $\beta=5.5^\circ$. Si è scelto come angolo finale $\beta=10^\circ$ per i pannelli, poiché tale valore permette alla pioggia di lavarli naturalmente. Tale compromesso è necessario per evitare perdite maggiori dovute allo sporco che si accumula sul vetro del pannello fotovoltaico.

Per quanto riguarda il coefficiente R_b , le tabelle presenti nella norma *UNI 10349-1:2016* forniscono i valori del coefficiente mese per mese per entrambi gli emisferi in funzione della latitudine del sito φ e del coefficiente $(\varphi - \beta)$.

Si riportano in *Tabella 39* i valori delle componenti della radiazione solare e il totale su una superficie inclinata rispetto all'orizzontale di 10° .

kWh/m²	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
H_b	114,15	76,96	87,25	92,91	155,46	142,80	136,75	177,30	161,20	160,54	150,33	126,70
H_d	74,17	75,24	84,24	78,05	49,41	49,34	57,66	44,20	52,92	58,49	54,79	60,71
H_a	0,41	0,32	0,36	0,34	0,39	0,36	0,37	0,43	0,44	0,46	0,45	0,42
H_{tot}	188,73	152,53	171,85	171,31	205,26	192,50	194,78	221,93	214,56	219,50	205,58	187,83

Tabella 39. Valori della radiazione solare su una superficie inclinata di 10° rispetto all'orizzontale esposta con faccia a Nord

Oltre che nei calcoli relativi alla radiazione solare, l'angolo di tilt è utilizzato per calcolare il rapporto tra la distanza e l'altezza massima delle file di pannelli fotovoltaici $\frac{D}{A}$. Il risultato è un compromesso tra l'ombreggiamento reciproco delle file e l'eccessiva distanza tra le stesse. Si riporta la formula utilizzata, dove β è l'angolo di tilt e φ è la latitudine del sito in esame:

$$\frac{D}{A} = \sin \beta \times \tan(23.5 + \varphi) + \cos \beta$$

In questo caso studio di ottiene $\frac{D}{A} = 1,05$.

6.2.2.1 Progetto preliminare sfruttando la massima area disponibile per l'impianto

Per calcolare l'energia producibile, è necessario conoscere la superficie disponibile, le perdite totali dell'impianto e l'efficienza dei moduli fotovoltaici. I pannelli si dispongono in file parallele nell'area disponibile.

Per poter avere le superfici dei pannelli totalmente esposte a Nord, si ha a disposizione sul tetto dell'edificio l'area evidenziata in blu in *Figura 75*. Si è scelta questa parte del tetto così da non avere ombreggiamenti che ridurrebbero in modo notevole l'energia producibile con fotovoltaico. Si riassumono in *Tabella 40* le dimensioni dell'area disponibile.

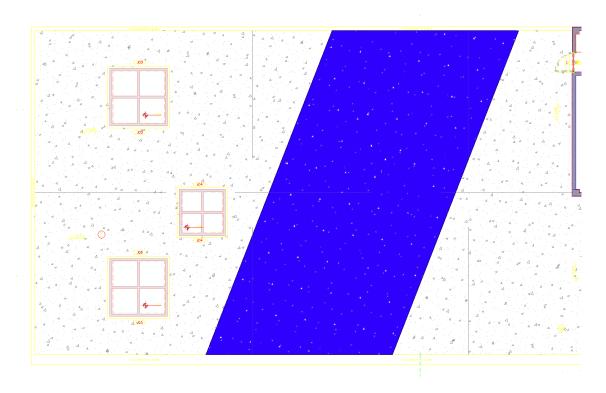


Figura 75. Area disponibile per i pannelli fotovoltaici sul tetto

Superficie disponibile di tetto orientata a N	229,85	m ²
Larghezza fascia disponibile di tetto	11,50	m
Larghezza tetto	19,99	m

Tabella 40. Dimensioni dell'area adibita ai pannelli fotovoltaici sul tetto

Per il calcolo delle perdite totali dell'impianto, si è utilizzato il metodo proposto da *PVWatts*, un simulatore online di impianti fotovoltaici sviluppato dal NREL (The National Renewable Energy Laboratory, 2021).

Il metodo calcola le perdite totali dalla seguente formula:

Losses =
$$100\% \times (1 - (1-a) \times (1-b) \times (1-c) \times (1-d) \times (1-e) \times (1-f) \times (1-g) \times (1-h) \times (1-i) \times (1-j))$$

Dove:

- a sono le perdite dovuto allo sporco che impedisce alla radiazione solare di raggiungere
 il modulo fotovoltaico, per cui si utilizza il valore predefinito pari al 2%;
- b sono le perdite dovute agli ombreggiamenti, per cui, non avendo a disposizione dati specifici, si utilizza il valore predefinito pari al 3%;

- c sono le perdite dovute alla presenza di accumulo di neve sulla superficie del pannello fotovoltaico, per cui si utilizza il valore pari allo 0% perché non si verificano fenomeni di neve nella località dove è costruito l'edificio in questione;
- d sono le perdite di mismatch, cioè quando non tutti i moduli che compongono il pannello fotovoltaico sono perfettamente identici per cui presentano caratteristiche di tensione e corrente leggermente diverse che portano a perdite, per cui si utilizza il valore predefinito pari al 2%;
- e sono le perdite dovute alle resistenze dei cablaggi sia dalla parte in corrente continua sia da quella in corrente alternata, per cui si utilizza il valore predefinito pari al 2%;
- f sono le perdite dovute ai collegamenti tra le diverse parti che compongono il sistema, per cui si utilizza il valore predefinito pari allo 0,5%;
- g sono le perdite dovute alla degradazione da parte della luce delle celle fotovoltaiche nei primi mesi di utilizzo, per cui si utilizza il valore predefinito pari al 1,5%;
- h sono le perdite dovute alla non perfetta corrispondenza tra la potenza nominale di targa e la potenza nominale reale, per cui si utilizza il valore predefinito pari al 1%;
- i sono gli effetti dell'invecchiamento dei moduli fotovoltaici, per cui si utilizza il valore predefinito pari allo 0% perché non si vedono effetti reali dovuti all'invecchiamento dei pannelli fotovoltaici;
- j sono le perdite dovute alla non totale disponibilità del sistema per eventuali fermo impianti dovuti a manutenzioni ordinare o straordinarie, per cui si utilizza il valore predefinito pari al 3%.

Si ottiene quindi un valore delle perdite pari al $L_{imp}=14,08\%$, valore comunemente selezionato come valore predefinito nei calcoli delle perdite degli impianti fotovoltaici.

A queste perdite si devono sommare inoltre:

- le perdite dovute all'efficienza dell'inverter, scelta pari al 96% che è un valore molto comune tra i diversi produttori di inverter,
- le perdite dovute all'angolo di incidenza della radiazione solare,
- le perdite dovute agli effetti spettrali,
- le perdite dovute alla temperatura e all'irradianza bassa rispetto alle condizioni standard.

Tali perdite sono calcolate con il metodo proposto dal PVGIS che risulta in un valore di perdite aggiuntive pari al $L_{rad}=13{,}15\%$ (European Commission Joint Research Centre, 2019).

Per il calcolo è stato scelto il pannello fotovoltaico policristallino UP-M350P (UpSolar, 2020) prodotto dalla UpSolar certificato dalla INMETRO²⁰ per il Brasile come dispositivo di classe A (INMETRO, 2020).

Si riportano in *Tabella 41* i principali dati utili al calcolo.

Dimensioni pannello	Lunghezza	1,956	m
	Larghezza	0,992	m
	Lunghezza orizzontale	1,926	m
	Numero moduli	72	
	% moduli rispetto ad area totale	90%	
	Potenza nominale pannello (STC)	350	Wp
	Eff, _{mod} (efficienza modulo fotovoltaico)	18%	
	A (altezza massima delle file)	0,340	m
	D (distanza tra le file)	0,356	m
Dimensione moduli di forma quadrata	Lato	0,156	m
Spazio occupato da singolo pannello	Lunghezza	2,282	m
	Larghezza	0,992	m

Tabella 41. Dati del pannello fotovoltaico UpSolar UP-M350P

Nell'area disponibile partendo dai dati dimensionali dello spazio occupato dal singolo pannello, si evince che possono essere installate 5 file da 20 pannelli fotovoltaici per un totale di potenza installata pari a 35 kWp²¹.

Dalle dimensioni in *Tabella 41*, si trova che l'area totale dei moduli fotovoltaici installati è pari a $S_{tot,moduli}=175,22\ m^2.$

Utilizzando la seguente formula con questi dati e quelli di radiazione solare totale incidente, si ottengono i valori di energia producibile dai pannelli fotovoltaici:

$$E_{producibile,mensile} = H_{tot,mensile} \times S_{tot,moduli} \times Eff_{mod} \times (1 - (L_{imp} + L_{rad}))$$

Si mostrano i valori ottenuti in Tabella 42 e in Figura 76.

 21 kWp cioè calcolati in condizioni standard STC: irradianza pari a 1000 W/m², temperatura di 25°C e AM=1,5

²⁰ Istituto Nazionale di Metrologia, Normalizzazione e Qualità Industriale del Brasile

Tabella in kWh	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Energia producibile	4332	3501	3944	3932	4711	4418	4470	5094	4924	5038	4718	4311

Tabella 42. Energia producibile dai pannelli fotovoltaici nel sito in esame

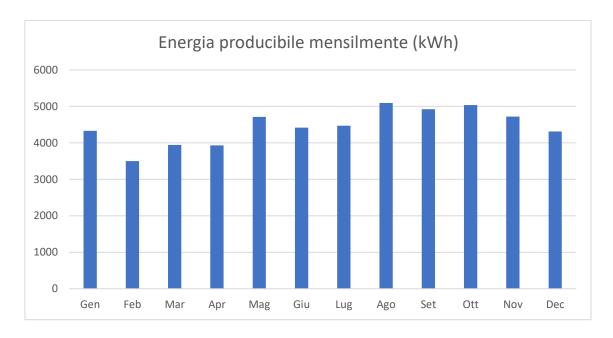


Figura 76. Resoconto dell'energia producibile dall'impianto fotovoltaico

Il valore di produzione di energia elettrica da fotovoltaico annuale ottenuto è pari a $53392,54 \, kWh$, il quale corrisponde a un valore di TEP^{22} risparmiate annualmente pari a $15,48 \, TEP$.

Si è dimensionato un impianto fotovoltaico *on-grid*, cioè direttamente collegato alla rete elettrica; nel caso si volesse installare un impianto *off-grid*, cioè con un accumulo di energia elettrica e senza collegamento alla rete elettrica, si dovrebbe inoltre progettare il sistema di accumulo.

6.2.2.1.1 Verifica etichetta energetica con RTQ-C

In seguito allo studio di fattibilità tecnica di un impianto di produzione di energia elettrica mediante una fonte rinnovabile, si è eseguito nuovamente il calcolo dell'etichetta energetica mediante RTQ-C.

_

²² Tonnellate equivalenti di petrolio in Brasile, 1 kWh elettrico = 0,000290 TEP (Patusco, 1998)

Avendo ora a disposizione la possibilità di produrre energia mediante fotovoltaico, si possono ottenere punti bonus nel calcolo del punteggio finale.

Il bonus richiede una percentuale minima del 10% di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili (eolico o fotovoltaico) sul totale dell'energia elettrica consumata annualmente (Eletrobrás/Procel, Eletrobrás, & UFSC, 2017).

In *Tabella 43,* si mostrano i valori annuali di energia elettrica consumata dall'Innovation Hub e il valore di energia elettrica producibile dall'impianto fotovoltaico.

	kWh/anno
Energia elettrica consumata	258390,64
Energia elettrica producibile da fotovoltaico	53392,54

Tabella 43. Valori annuali di energia elettrica

Dai valori in *Tabella 43,* si calcola la percentuale di energia prodotta con fotovoltaico rispetto al totale, la quale risulta essere pari al 20,66%, per cui maggiore del minimo richiesto per ottenere il punteggio bonus.

Si procede con il calcolo della nuova etichetta energetica per l'edificio.

Restano invariati i valori dell'involucro edilizio, dei sistemi di illuminazione, di condizionamento dell'aria e del comfort nei locali non condizionati, riportati in *Tabella 44*.

Identificazione	Classificazione
Involucro edilizio	С
Illuminazione	С
Condizionamento aria	Α
Comfort locali non condizionati	Α

Tabella 44. Valori di classe energetica per i singoli componenti del calcolo RTQ-C

Il punteggio totale per l'edificio ottenuto con i valori soprariportati è pari a 3,74 che corrispondeva a un'etichetta energetica B.

Avendo ora una percentuale di energia da fonte rinnovabile maggiore del 10%, si ottiene un bonus pari a 1 punto sul totale precedentemente calcolato.

In Tabella 45 si mostra il punteggio totale e la classe energetica dell'edificio.

Punteggio finale	4,74
Classificazione finale	Α

Tabella 45. Classificazione dell'Innovation Hub secondo RTQ-C

6.2.2.2 Dimensionamento economico del fotovoltaico

Il dimensionamento precedente è eseguito con lo scopo di ottimizzare al massimo la produzione sfruttando al massimo l'area disponibile. Si esegue ora un dimensionamento con l'obbiettivo di produrre da fonti rinnovabili il 10% dell'energia totale consumata, così da ottimizzare l'impatto economico mentre si mantiene il diritto ai bonus per l'etichetta energetica dell'edificio RTQ-C.

I dati di partenza sono gli stessi del dimensionamento precedente: angolo di *tilt* pari a 10°, valore della radiazione solare precedentemente calcolato e dati dei pannelli fotovoltaici relativi al modello UP-M350P prodotto dalla UpSolar. Il calcolo però, in questo caso, parte dal valore del 10% dell'energia consumata annualmente dall'Innovation Hub, pari a 25839,06 *kWh* (Eletrobrás/Procel, Eletrobrás, & UFSC, 2017).

Dal dato di energia elettrica necessaria, conoscendo l'efficienza dei moduli fotovoltaici e il valore delle perdite, si calcola l'area necessaria per rispettare il vincolo dell'energia minima da produrre nell'anno applicando la seguente relazione:

$$S_{tot,moduli} = \frac{E_{necessaria,annuale}}{H_{tot,annuale} \times Eff_{mod} \times (1 - (L_{imp} + L_{rad}))}$$

dove il valore $H_{tot,annuale}$ è la somma dei valori nei singoli mesi ed è pari a 2326,34 $^{kWh}/_{m^2}$.

Dalla relazione precedente, si ottiene un'area dei moduli necessaria pari a $S_{tot,moduli}=84,80\ m^2$; in seguitosi calcola il numero necessario di pannelli fotovoltaici necessari, conoscendo i dati dimensionali dei moduli che compongono il pannello fotovoltaico e le dimensioni del pannello stesso. Si riportano in *Tabella 46* i valori necessari per il calcolo e il risultato ottenuto.

Dimensione pannello	Lunghezza	1,956 m
	Larghezza	0,992 m
	% moduli rispetto ad area totale	90%
Numero minimo di panno	elli necessari per il 10%	49

Tabella 46. Numero di pannelli fotovoltaici necessari e dimensioni dello stesso

Utilizzando la seguente formula con i dati dei pannelli fotovoltaici installati, l'area dei moduli e quelli di radiazione solare totale incidente, si ottengono i valori di energia producibile dai pannelli fotovoltaici:

$$E_{producibile,mensile} = H_{tot,mensile} \times S_{tot,moduli} \times Eff_{mod} \times (1 - (L_{imp} + L_{rad}))$$

Si mostrano i valori ottenuti in Tabella 47 e in Figura 77.

Tabella in kWh	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Energia producibile	2096	1694	1909	1903	2280	2138	2163	2465	2383	2438	2283	2086

Tabella 47. Energia producibile dai pannelli fotovoltaici nel sito in esame

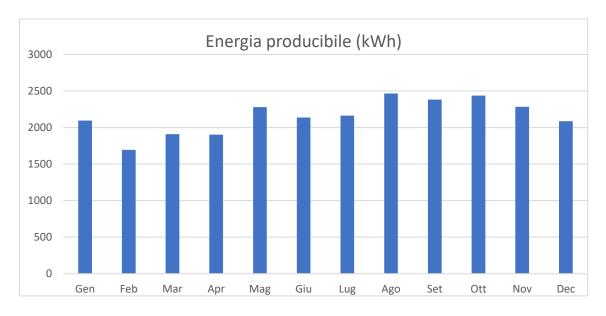


Figura 77. Resoconto dell'energia producibile dall'impianto fotovoltaico

Il valore di produzione di energia elettrica da fotovoltaico annuale ottenuto è pari a $25839,06\,kWh$, il quale corrisponde a un valore di TEP risparmiate annualmente pari a $7,49\,TEP$.

7 Analisi dell'etichetta energetica secondo RTQ-C al variare dei dispositivi dell'impianto di condizionamento

Nella sezione seguente è eseguita un'analisi dei cambiamenti dell'etichetta energetica dell'edificio al variare dei dispositivi che compongono l'impianto di condizionamento, poiché non ancora noti quali saranno usati nella realizzazione finale dell'edificio, e poiché l'etichetta dell'impianto di condizionamento pesa maggiormente sul punteggio finale rispetto alle altre che compongono il calcolo.

Nel primo esempio di calcolo dell'etichetta, vedi capitolo 3.3, tutti i dispositivi ipotizzati hanno l'etichetta energetica di classe A e le tubazioni presentano l'isolamento minimo necessario richiesto dal regolamento RTQ-C.

Si esegue quindi un calcolo dell'etichetta al variare dell'etichetta energetica dei dispositivi e alla presenza o meno dell'isolante delle tubazioni. Inoltre, è considerato per completezza l'eventuale punto bonus ottenibile dall'utilizzo di fonti rinnovabili per la produzione di energia elettrica.

Si riportano in *Tabella 48* le diverse efficienze con il relativo valore di etichetta energetica (Eletrobrás/Procel, Eletrobrás, & UFSC, 2017).

	Split	Classe energetica	Cassetta	Classe energetica
СОР	3,5	А	3	Α
СОР	3,2	В	2,7	В
СОР	3	С	2,5	С
СОР	2,8	D	2,4	D
СОР	2,5	Е	2,2	Е

Tabella 48. Efficienza e relativa etichetta energetica dei dispositivi dell'impianto di condizionamento dell'aria

Per quanto riguarda il resto del calcolo non ci sono ipotesi differenti da quelle usate in precedenza, si riassumono in *Tabella 49*.

Identificazione	Classificazione
Involucro edilizio	С
Illuminazione	С
Comfort locali non condizionati	А

Tabella 49. Valori di classe energetica dei singoli componenti che compongono l'etichetta energetica

7.1 Analisi senza considerare l'eventuale punteggio bonus per energie rinnovabili

Si riportano in *Tabella 50* i risultati finali al variare dell'etichetta energetica dei componenti dell'impianto di condizionamento. Si considera sia il caso in cui è assente l'isolamento delle tubazioni sia il caso in cui è presente. Sono stati ipotizzati inoltre due casi in cui si hanno diverse etichette a seconda del tipo di dispositivo installato.

		Isolamento tubazioni assente		Isolamento tubazioni presente	
Etichetta	Etichetta	Punteggio	Classificazione	Punteggio	Classificazione
split	cassetta	Finale	finale	Finale	finale
Α	А	3,37	С	3,74	В
В	В	3,37	С	3,37	С
С	С	3,01	С	3,01	С
D	D	2,64	С	2,64	С
E	Е	2,28	D	2,28	D
В	А	3,37	С	3,65	В
А	В	3,46	С	3,46	С

Tabella 50. Punteggio finale e classificazione finale dell'edificio

7.2 Analisi considerando l'eventuale punteggio bonus per energie rinnovabili

Si riportano in *Tabella 51* i risultati finali al variare dell'etichetta energetica dei componenti dell'impianto di condizionamento. Si considera sia il caso in cui è assente l'isolamento delle tubazioni sia il caso in cui è presente. Sono stati ipotizzati inoltre due casi in cui si hanno diverse etichette a seconda del tipo di dispositivo installato.

Qui si è considerato il bonus ottenibile per il punteggio finale grazie all'utilizzo di fonti rinnovabili per la produzione di energia elettrica. I risultati seguenti sono validi sia per il caso in cui si considera l'ottimizzazione energetica sia per quello in cui si considera l'ottimizzazione economica.

		Isolamento tubazioni assente		Isolamento tubazioni presente	
Etichetta	Etichetta	Punteggio	Classificazione	Punteggio	Classificazione
split	cassetta	Finale	finale	Finale	finale
Α	А	4,37	В	4,74	А
В	В	4,37	В	4,37	В
С	С	4,01	В	4,01	В
D	D	3,64	В	3,64	В
Е	Е	3,28	С	3,28	С
В	А	4,37	В	4,65	А
Α	В	4,46	В	4,46	В

Tabella 51. Punteggio finale e classificazione finale dell'edificio

8 Conclusioni

L'analisi eseguita nella presente tesi aveva come obiettivo di creare una verifica delle prestazioni termiche per l'edificio principale della *smart city* di Aquiraz in Brasile, in fase di progettazione e costruzione da parte di Planet Smart City.

Si è eseguita la verifica delle prestazioni termiche mediante calcoli dei diversi requisiti minimi da normativa *NBR* 15575, l'edificio non verificava i requisiti termici sulla copertura e di illuminazione naturale in molteplici ambienti. Tali requisiti sono stati quindi verificati mediante simulazione dinamica oraria dell'edificio, concludendo che il progetto rispetta per tutti i locali i requisiti termici, ad esclusione del locale *biblioteca des objetos*, il quale, è un locale a permanenza prolungata ma adibito come deposito di materiale e per piccoli lavori, e prevede un sistema di condizionamento che fa sì che vengano rispettate le condizioni di comfort. Per quanto riguarda i requisiti di illuminazione naturale, è rispettato il livello prestazionale migliore possibile in tutti i locali dell'edificio.

In seguito, vedi capitolo 3.3, si è eseguito il calcolo dell'etichetta energetica dell'edificio secondo il regolamento *RTQ-C*, trovando una classificazione di livello B.

La seconda parte della tesi aveva come obiettivo di eseguire un progetto preliminare di fattibilità di un impianto di produzione di energia elettrica sfruttando una fonte di energia rinnovabile, con l'obbiettivo aggiuntivo di ottenere un'etichetta energetica dell'edificio eccellente di livello A. Sono stati eseguiti i calcoli preliminari per la produzione di energia elettrica da un impianto eolico e da fotovoltaico. Per l'impianto eolico, dall'analisi preliminare delle condizioni del sito è risultato evidente che l'energia producibile non giustificava l'installazione di tale tipo di impianto.

Per l'impianto fotovoltaico, è stata eseguita un'analisi preliminare per ottenere una produzione di energia elettrica da fotovoltaico ipotizzando di utilizzare tutta l'area disponibile non ombreggiata in copertura, ottenendo una produzione di energia che copre oltre il 20% del fabbisogno dell'edificio. La seconda analisi ha valutato invece quanto fotovoltaico era necessario installare per poter coprire il 10% del fabbisogno dell'edificio con l'energia prodotta da fonti rinnovabili. Tale percentuale garantirebbe l'ottenimento dei punti bonus necessari ad accedere a un'etichetta energetica dell'edificio di livello A secondo l'indice RTQ-C.

Tale analisi ha evidenziato come secondo il sistema di etichettatura energetica brasiliano il punteggio bonus pesi molto sul totale. Infatti, si partiva da un punteggio di 3,74 (livello B) senza

l'apporto di utilizzo di energia derivante da fonti rinnovabile e si arriva ad avere un punteggio finale di 4,74 (livello A) coprendo almeno il 10% del fabbisogno energetico dell'edificio con energia da fonti rinnovabili.

Si sono infine analizzati i diversi punteggi ottenibili per l'etichetta energetica dell'edificio in funzione del possibile bonus ottenibile dallo sfruttamento delle energie rinnovabili e in funzione dei dispositivi dell'impianto di condizionamento. Essendo l'edificio in fase di progettazione, quindi non avendo ancora definito le forniture dei dispositivi che compongono l'impianto di condizionamento, e quindi le loro efficienze, si sono ipotizzati diversi scenari, i quali sono stati quindi valutati utilizzando diversi COP per i componenti dell'impianto e secondo la presenza o meno dell'isolamento delle tubazioni. I risultati ottenuti, sintetizzati nelle *Tabella 50* e *Tabella 51*, mostrano come l'etichetta possa variare in base ai diversi scenari. Nonostante le variazioni di punteggio dell'etichetta energetica dovute al variare dell'efficienza dei componenti dell'impianto di condizionamento, si nota che il punteggio bonus derivante dalle fonti di energia rinnovabile ha un peso nettamente maggiore sul punteggio finale e, quindi, sull'etichetta energetica ottenibile dall'edificio.

9 Bibliografia

- ABB. (2011). Quaderni di applicazione tecnica N.13 Impianti eolici. Bergamo: ABB SACE.
- ABNT/CB-02- Comitê Brasileiro de Construção Civil. (2003). NBR 15220 Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Benne, K. (2014, Dicembre 14). HVAC Template for standard Split AC Unmet Hours. Tratto da Unmet Hours: https://unmethours.com/question/1814/hvac-template-for-standard-split-ac/
- Eletrobrás/Procel, Eletrobrás, E. d., & UFSC, C. B.-C. (2017). *Manual para Aplicação do RTQ-C.*Tratto da PBE Edifica:

 http://pbeedifica.com.br/sites/default/files/Manual_20170411_Notas_T%C3%A9cnicas%2BCapa.pdf
- European Commission Joint Research Centre. (2019, Ottobre 15). *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. Tratto da Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS): https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis
- Fogiatto, M. A. (2015). Avaliação da transmitância térmica de blocos de concreto e cerâmica utilizados na construção civil. Tratto da UFPR :: Departamento de Engenharia Mecânica:

 http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16305/1/PG_DAMEC_2015_1_03.pd f
- Fritz, R., & McNeil, A. (2019, gennaio 4). *About Radiance Radsite*. Tratto da Radiance Radsite: https://www.radiance-online.org/
- INMETRO. (2020, Febbraio 13). Avaliação da Conformidade. Tratto da Portal de Serviços do Inmetro: http://registro.inmetro.gov.br/consulta/detalhe.aspx?pag=1&NumeroRegistro=00088 6/2020
- Instituto nacional de metrologia, qualidade e tecnologia (Inmetro). (2021). *Portaria n° 42 de 24 de fevriero 2021.*
- Jacobson, M. Z., & Jadhav, V. (2018). World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels. Stanford, USA: Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University.
- MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. (2013). Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas. Tratto da PBE Edifica: http://pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloa ds/Port372-2010_RTQ_Def_Edificacoes-C_rev01.pdf
- OpenStudio Coalition. (2020). *OpenStudio Application Interface Guide*. Tratto da OpenStudio Coalition User Docs: https://openstudiocoalition.org/

- Patusco, J. A. (1998, Settembre 22). NOTA TÉCNICA CGEI nº 01 /98 22/09/98. *ELETRICIDADE NO BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL BEN*.
- PBE Edifica. (2020). *Manuais | PBE Edifica*. Tratto da PBE Edifica: http://www.pbeedifica.com.br/etiquetagem/comercial/manuais
- Planet Smart City. (2019). *Analisi della normativa fisico tecnica ed energetica per edifici residenziali (Brasile).*
- Planet Smart City. (2019). *Laguna Verifica della conformità alla normativa tecnica unità abitative*.
- Planet Smart City. (2019). Laguna Verifiche termiche e di illuminazione naturale unità abitative tramite simulazione energetica dinamica.
- Planet Smart City. (2021). Planet Smart City. Tratto da https://www.planetsmartcity.com/
- Seves Glass Block. (2021). Tratto da Seves Glass Block: https://www.sevesglassblock.com/
- Solaripedia | Resource. (2008). Tratto da Solaripedia | Green Architecture and Renewable Energy: https://www.solaripedia.com/259/3166/tool.html
- The National Renewable Energy Laboratory. (2021, Marzo 29). *PVWatts Calculator*. Tratto da PVWatts Calculator: https://pvwatts.nrel.gov/index.php
- U.S. Department of Energy. (2020, settembre 29). *EnergyPlus™ Version 9.4.0 Documentation Getting Started*. Tratto da EnergyPlus: https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.4.0/GettingStarted.pdf
- UpSolar. (2020). *UpSolar Polycrystalline PV module 72 cells.* Tratto da Solar Brasil: https://www.solarbrasil.com.br/wp-content/uploads/2021/03/DATASHEET_UPSolar-Poly-72-EN-P03-04-325W-350W-35mm.pdf
- Vivoli, F. P. (2008). Progettare e installare un impianto fotovoltaico. Roma: ENEA.
- Weather Data | EnergyPlus. (2021). Tratto da EnergyPlus: https://energyplus.net/weather