



**Politecnico  
di Torino**

## Politecnico di Torino

Corso di Laurea di secondo livello in Ingegneria Elettrica

A.a. 2025/2026

Sessione di Laurea Marzo 2026

# **Riqualficazione dell'infrastruttura elettrica e integrazione di un sistema fotovoltaico nel Guenete Leul Palace di Addis Abeba**

Relatore:

Prof. Paolo Di Leo

Correlatore:

Prof. Filippo Spertino

Candidato:

Lorenzo Viassone 332833

## Ringraziamenti

*Giunto al termine di questo lungo percorso, desidero ringraziare le persone che hanno reso possibile questo traguardo.*

*Il mio pensiero più profondo va a mia nonna Enza. La tua forza è stata il mio insegnamento più prezioso in questi anni. Mi hai spinto a tirare fuori ancora più energia proprio quando a te mancava. Grazie per essere sempre stata la mia prima sostenitrice. Questo momento è dedicato a te.*

*Allo stesso modo, dedico questo successo a mio nonno Fino. Renderti orgoglioso di me è stato uno dei motivi principali che mi ha spinto a non fermarmi mai e a superare ogni ostacolo. Spero di continuare a renderti fiero del nipote e dell'uomo che sono diventato.*

*A mia mamma. Grazie per aver sopportato le mie ansie e per essermi stata vicina mentre studiavo ore e ore, senza mai farmi mancare il tuo supporto. Sapere di averti reso orgogliosa ripaga ogni mio sforzo. Hai visto che ce l'ho fatta?*

*A tutti i miei familiari. So di non essere stato facile da sopportare. La tensione di questi anni mi ha reso spesso intrattabile, ma voi avete saputo guardare oltre il mio malumore.*

*Ai miei amici più intimi e ai miei amici "di Santa". Grazie per essere stati la mia boccata d'aria fresca, per le risate che hanno spazzato via la tensione e per avermi ricordato, giorno dopo giorno, che la vita è fatta di legami che vanno ben oltre un voto.*

*Ad Alu. La nostra è un'amicizia che non ha data di scadenza. La distanza non ha mai rappresentato un problema e non lo diventerà di certo ora. Dicono che a volte basti uno sguardo per capirsi, ma a noi non serve neanche quello.*

*Ai miei compagni di università, Matteo e Lorenzo (o meglio, Barbe e Rubi). Senza di voi, il peso di questi cinque anni al Politecnico sarebbe stato decisamente più difficile da sostenere. Grazie per aver reso questi cinque anni al Politecnico un'esperienza di vita condivisa, rendendo leggere anche le giornate universitarie più intense.*

*A Mia. Il nostro legame non si spiega a parole.*

*A Me, per non aver mai mollato, anche quando la montagna sembrava insormontabile.*

# Indice

|                                                                                                          |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Sommario .....</b>                                                                                    | <b>5</b>  |
| <b>1. Analisi del contesto storico relativo al Guenete Leul Palace.....</b>                              | <b>7</b>  |
| 1.1. La genesi architettonica tra committenza imperiale e influenze europee.....                         | 8         |
| 1.1.1..... Ernst W. Kametz e l'Eclettismo .....                                                          | 8         |
| 1.2. Il centro del potere dell'occupazione italiana .....                                                | 10        |
| 1.2.1..... I Viceré al Guenete Leul Palace.....                                                          | 10        |
| 1.2.2..... La rete elettrica e la CONIEL .....                                                           | 11        |
| 1.3. Il ritorno dell'Imperatore e il trauma del 1960 .....                                               | 11        |
| 1.3.1..... Il Colpo di Stato del 1960 e il massacro nel Salone Verde .....                               | 12        |
| 1.4. La genesi dell'Università e il dono all'istruzione .....                                            | 13        |
| 1.5. Integrazione nel campus e nella città .....                                                         | 13        |
| 1.6. Analisi architettonica .....                                                                        | 14        |
| 1.7. Analisi funzionale della Biblioteca .....                                                           | 16        |
| 1.8. Il palazzo tra accademia e turismo .....                                                            | 17        |
| 1.9. Collaborazione Italia-Etiopia .....                                                                 | 17        |
| <b>2. Standard normativi internazionali e metodologie di intervento nel restauro impiantistico .....</b> | <b>19</b> |
| 2.1. Analisi della rete, dimensionamento dei componenti e cabine di trasformazione .....                 | 20        |
| 2.1.1..... Trasformatori e correnti di cortocircuito.....                                                | 20        |
| 2.1.2..... Classificazione delle forniture e continuità del servizio ...                                 | 21        |
| 2.2. Sistemi di elevazione .....                                                                         | 22        |
| 2.3. Gestione dell'ambiente interno .....                                                                | 23        |

|            |                                                                            |           |
|------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.       | Requisiti fondamentali per le installazioni (CEI 64-8 e IEC 60364)         | 24        |
| 2.4.1..... | Selezione dei cavi e modalità di posa .....                                | 24        |
| 2.4.2..... | Impianto di terra e protezione contro i fulmini .....                      | 25        |
| 2.4.3..... | Sistema di distribuzione TN-S (CEI 64-8).....                              | 25        |
| 2.4.4..... | IEC 60364-4-41: protezione contro lo shock elettrico.....                  | 26        |
| 2.5.       | Integrazione del sistema fotovoltaico .....                                | 26        |
| 2.5.1..... | Connessione alla rete e Standard CEI 0-21 .....                            | 27        |
| 2.6.       | I sistemi speciali.....                                                    | 27        |
| 2.6.1..... | Rilevazione Incendi (UNI 9795 e EBCS 13).....                              | 27        |
| 2.6.2..... | Allarme Vocale ed Emergenza (EN 54-16 e CEI EN 50849)<br>.....             | 27        |
| 2.6.3..... | IEC 62676: Videosorveglianza (CCTV).....                                   | 28        |
| <b>3.</b>  | <b>Analisi comparativa e stima parametrica dei costi per corpo d'opera</b> | <b>30</b> |
| 3.1.       | Analisi del caso studio Castello Carrarese .....                           | 31        |
| 3.1.1..... | Determinazione delle superfici e dei perimetri .....                       | 32        |
| 3.1.2..... | Attualizzazione dei costi .....                                            | 32        |
| 3.1.3..... | Parametrizzazione scalare (scaling up) .....                               | 33        |
| 3.1.4..... | Adattamenti tecnici e variabili ambientali .....                           | 34        |
| 3.2.       | Analisi del caso studio Casa Miroglio .....                                | 35        |
| 3.2.1..... | Confronto degli indici parametrici.....                                    | 36        |
| 3.3.       | Confronto tra i due casi studio e validazione finale.....                  | 37        |
| <b>4.</b>  | <b>Modellazione e dimensionamento dell'impianto elettrico .....</b>        | <b>40</b> |
| 4.1.       | Stima della potenza di progetto.....                                       | 40        |
| 4.2.       | Cabina di trasformazione e dimensionamento del trasformatore.....          | 41        |
| 4.2.1..... | Quadro di commutazione .....                                               | 42        |
| 4.2.2..... | Declassamento del trasformatore .....                                      | 43        |
| 4.2.3..... | Vincoli per il dimensionamento del trasformatore .....                     | 45        |

|                                                                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2.4. .... Il baricentro elettrico .....                                                                      | 46        |
| 4.3. Scelta del gruppo elettrogeno.....                                                                        | 47        |
| 4.4. Suddivisione dei carichi in base alla loro natura.....                                                    | 49        |
| 4.4.1. Carico degli ascensori .....                                                                            | 49        |
| 4.4.2. Potenza dei sistemi speciali.....                                                                       | 52        |
| 4.4.3. Potenza dei calcolatori .....                                                                           | 53        |
| 4.4.4. Potenza delle unità trattamento aria e delle pompe di calore.....                                       | 54        |
| 4.5. Dimensionamento del sistema di continuità statica (UPS) .....                                             | 57        |
| 4.6. Dimensionamento dei quadri primari .....                                                                  | 59        |
| 4.6.1. Quadri di funzione .....                                                                                | 59        |
| 4.6.2. Quadri di zona .....                                                                                    | 60        |
| 4.7. Dimensionamento dei cavi.....                                                                             | 62        |
| 4.7.1. Cavo in aria libera, distanziato dalla parete/soffitto o su passerella<br>(posa 13 CEI-UNEL 35026)..... | 64        |
| 4.7.2. Cavi in tubi interrati (posa 61 CEI-UNEL 35026).....                                                    | 65        |
| 4.7.3. Criteri di dimensionamento.....                                                                         | 67        |
| 4.7.4. Conduttori di Neutro e di Protezione (sistema TN-S).....                                                | 71        |
| 4.8. Dimensionamento dei dispositivi di protezione.....                                                        | 73        |
| 4.8.1. Criteri e vincoli da rispettare.....                                                                    | 73        |
| 4.8.2. Anelli di guasto e correnti di cortocircuito .....                                                      | 74        |
| 4.8.3. Protezione contro i contatti indiretti.....                                                             | 77        |
| <b>5. Integrazione e ottimizzazione fotovoltaica.....</b>                                                      | <b>81</b> |
| 5.1. L'influenza della vicinanza all'equatore .....                                                            | 81        |
| 5.1.1. .... Analisi della producibilità dei moduli a Nord.....                                                 | 82        |
| 5.1.2. .... Analisi della producibilità dei moduli rivolti a Sud.....                                          | 83        |
| 5.2. Analisi tecnico-economica dell'impianto fotovoltaico .....                                                | 83        |
| 5.3. Pro e contro del fotovoltaico in Etiopia .....                                                            | 87        |
| 5.4. Predisposizione dei moduli .....                                                                          | 87        |
| 5.4.1. .... Sistema di ancoraggio alle falde del corpo principale .....                                        | 90        |

|                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.4.2..... Sistemi a zavorra su superfici piane.....                  | 90         |
| 5.5. Scelta dei moduli: modello AE MD-132BD da 490Wp .....            | 91         |
| 5.6. Scelta dell'inverter .....                                       | 94         |
| 5.6.1..... Derating termico .....                                     | 95         |
| 5.6.2..... Sicurezza attiva AFCI e protezione dalle sovratensioni ... | 96         |
| 5.6.3..... Installazione, manutenzione e monitoraggio .....           | 97         |
| 5.6.4..... Scheda tecnica dell'inverter Huawei SUN2000-100KTL-M2..... | 98         |
| 5.7. Caratteristiche elettriche dell'array fotovoltaico.....          | 99         |
| 5.8. Verifica degli accoppiamenti elettrici .....                     | 100        |
| 5.9. Interruttore di manovra-sezionatore (IMS) lato DC .....          | 103        |
| 5.10. Dimensionamento cavi lato DC .....                              | 104        |
| 5.11. Dimensionamento dei componenti lato AC .....                    | 106        |
| 5.11.1... Dimensionamento dei conduttori lato AC .....                | 106        |
| 5.11.2... Dimensionamento protezioni lato AC .....                    | 108        |
| <b>6. Sistemi speciali.....</b>                                       | <b>110</b> |
| 6.1. Prevenzione incendi .....                                        | 111        |
| 6.2. Videosorveglianza (CCTV) e controllo accessi.....                | 112        |
| 6.3. Sistema EVAC .....                                               | 113        |
| 6.4. Cablaggio strutturato ad alte prestazioni.....                   | 115        |
| <b>7. Conclusione.....</b>                                            | <b>116</b> |
| <b>Bibliografia .....</b>                                             | <b>118</b> |

# Sommario

La riqualificazione impiantistica del patrimonio edilizio storico costituisce una delle sfide più ardue e stimolanti dell'ingegneria contemporanea. Non si tratta di un semplice adeguamento normativo, bensì di un atto critico di interpretazione dell'architettura esistente, volto a proiettarne la funzionalità nel futuro senza tradirne la memoria. Nel contesto specifico, tale sfida assume una connotazione ancora più profonda, poiché il Guenete Leul Palace di Addis Abeba rappresenta un simbolo tangibile della sovranità etiopica, della modernizzazione imperiale e, successivamente, della trasformazione accademica e culturale del Paese. Il presente elaborato di tesi documenta lo sviluppo del progetto relativo alla riqualifica dell'infrastruttura elettrica e l'integrazione di un sistema fotovoltaico. L'intervento, inquadrato in un programma di cooperazione internazionale tra il Politecnico di Torino e l'Agenzia Italiana per la Cooperazione allo Sviluppo (AICS), si fonda sul paradigma dell'ingegneria della compatibilità. Tale approccio impone la sintesi tra le stringenti necessità prestazionali di un moderno polo museale e i vincoli di reversibilità e minima invasività dettati dalla natura monumentale del palazzo.

Prima di procedere con la fase di progettazione impiantistica, è stata compiuta un'analisi parametrica-comparativa che ha permesso di stimare il quadro economico complessivo dell'intervento. Utilizzando come benchmark i progetti di restauro del Castello Carrarese e di Casa Miroglio, opportunamente aggiornati e riscalati, è stato derivato un indice di costo globale in linea con la destinazione museale del Guenete Leul Palace che, in quanto tale, esige l'utilizzo di componenti conformi agli standard IEC/ISO.

Una volta definito il perimetro economico, la progettazione dell'infrastruttura elettrica si è dovuta confrontare con le criticità operative e ambientali del sito, come la destinazione d'uso e la frequente instabilità che caratterizza la rete di distribuzione etiopica. Per ovviare a tali problematiche, è stata adottata una filosofia di progetto che classifica tutti i carichi come "privilegiati". Di conseguenza, l'impianto è stato potenziato con un gruppo elettrogeno dimensionato per garantire l'autonomia energetica integrale del Guenete Leul Palace, assicurando la piena operatività e la salvaguardia del patrimonio culturale anche a fronte di blackout prolungati. Il dimensionamento

è stato inoltre influenzato dalle peculiari condizioni ambientali del sito. La città di Addis Abeba, situata a circa 2.355 metri di altitudine, impone vincoli termodinamici critici legati alla rarefazione dell'aria, fenomeno che riduce l'efficienza dello scambio termico convettivo. Sebbene il regime climatico subtropicale d'altopiano, caratterizzato da una mitezza costante, abbia permesso di ridurre la densità di potenza grazie al minor fabbisogno energetico dei sistemi HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning), la quota ha comportato un declassamento termico del trasformatore. In conformità alla normativa internazionale, è stato applicato un coefficiente di derating, comportando dunque un declassamento complessivo delle prestazioni della macchina non trascurabile.

Parte integrante di tale progetto è stato il dimensionamento del sistema fotovoltaico, la cui potenza di picco è stata individuata mediante un workflow di Generative Design (basato sull'algoritmo genetico NSGA-II) sviluppato dall'Ing. Corrado Serato nel proprio lavoro di tesi. La configurazione scelta per massimizzare l'autoconsumo del Guenete Leul prevede l'installazione di un campo fotovoltaico in grado di garantire una produzione superiore ai 350 MWh annui. Le analisi finanziarie documentano un tempo di ritorno dell'investimento relativamente contenuto, confermando dunque l'eccezionale fattibilità tecnica della tecnologia solare nel contesto equatoriale della città, in cui l'irraggiamento elevato è accompagnato da un regime climatico vantaggioso per la produzione fotovoltaica.

Infine, il progetto include l'integrazione dei sistemi speciali, sviluppati in prevalenza dal collega Edoardo Graziano. L'architettura prevede una protezione stratificata che combina rilevazione fumi, videosorveglianza IP, sistemi EVAC e un'infrastruttura dati che assicuri la piena sicurezza che necessita un edificio museale storico all'avanguardia.

## **Capitolo 1**

# **1. Analisi del contesto storico relativo al Guenete Leul Palace**

Il Guenete Leul Palace, il cui nome aramaico evoca il "Paradiso dei Principi", rappresenta un complesso documento storico stratificato, un palinsesto in cui si sono sedimentate le fasi cruciali della formazione dello stato etiope moderno. L'edificio, situato nell'attuale distretto di Sidist Kilo, incarna fisicamente la dialettica tra la tradizione imperiale della dinastia salomonide e la spinta verso la modernizzazione tecnica e amministrativa che ha caratterizzato il lungo regno di Haile Selassie I. La sua traiettoria funzionale ha viaggiato nel tempo da residenza privata della famiglia imperiale a centro di comando dell'occupazione fascista, da teatro di sanguinosi conflitti interni a culla dell'istruzione superiore etiope. Tale evoluzione offre dunque una lente privilegiata attraverso cui esaminare le trasformazioni sociopolitiche del Corno d'Africa nel XX secolo.

La rilevanza del palazzo trascende il suo valore puramente estetico o stilistico. L'edificio si pone come testimonianza tangibile delle complesse relazioni diplomatiche, culturali e belliche intercorse negli anni tra l'Etiopia e l'Italia. Se da un lato l'architettura del palazzo riflette l'eclettismo di un'epoca che guardava all'Europa pur mantenendo le tradizioni locali, dall'altro le sue mura portano ancora i segni, visibili e invisibili, dell'occupazione italiana dal 1936 al 1941 e delle successive fasi di riappropriazione nazionale. In questo capitolo si procede ad una disamina dettagliata delle fasi costruttive, del ruolo dell'edificio nelle dinamiche di potere durante e dopo l'occupazione, e della sua definitiva consacrazione a luogo di sapere con la fondazione dell'Università, evidenziando come le eredità infrastrutturali e culturali si siano intrecciate in modo indissolubile.

## **1.1. La genesi architettonica tra committenza imperiale e influenze europee**

Agli albori degli anni Trenta, Addis Abeba, già allora capitale dell’Etiopia, era una città in profonda mutazione. Fondata alla fine del XIX secolo dall'Imperatore Menelik II, la città stava gradualmente abbandonando la struttura dell'accampamento militare permanente per assumere la fisionomia di una capitale moderna, dotata di infrastrutture stabili e di edifici in muratura che affiancavano le tradizionali costruzioni in legno e fango. L'ascesa al trono di Haile Selassie I nel 1930 accelerò questo processo: il sovrano intendeva proiettare un'immagine di stabilità e progresso, necessaria per legittimare l'Etiopia come membro sovrano della Società delle Nazioni.



*Figura 1 - L'Imperatore Haile Selassie I*

In questo scenario, la costruzione del Guenete Leul Palace rispondeva all'esigenza della famiglia imperiale di disporre di una residenza che fosse distinta dal Grande Palazzo di Menelik II (noto anche come Imperial Palace o Ghebbi), sede tradizionale e austera del governo. Il nuovo Guenete Leul Palace avrebbe dovuto offrire standard abitativi di stampo europeo, pur mantenendo la solennità richiesta dalla tradizione. La scelta del sito, nel quartiere Sidist Kilo, non fu casuale: situato ad una certa distanza dal centro commerciale e politico della vecchia Addis Abeba, l'area permetteva lo sviluppo di vasti giardini e parchi, elemento essenziale della concezione del "Paradiso dei Principi" [1].

### **1.1.1. Ernst W. Kametz e l'Eclettismo**

Un aspetto cruciale per la comprensione storico-artistica dell'edificio, spesso oggetto di confusione nelle fonti divulgative, riguarda l'attribuzione del progetto. È fondamentale distinguere il Guenete Leul Palace dal successivo Jubilee Palace. Quest'ultimo, edificato nel 1955 per il venticinquesimo anniversario dell'incoronazione e oggi sede della presidenza della Repubblica, è opera

dell'architetto italiano Raffaele Petrone e si caratterizza per un linguaggio più dichiaratamente neoclassico e monumentale.



*Figura 2 - Jubilee Palace*

Il Guenete Leul fu invece progettato dall'architetto tedesco Ernst W. Kametz, attivo in Etiopia negli anni '30 come ingegnere e architetto presso il Ministero dei Lavori Pubblici e figura chiave nella definizione del volto istituzionale di Addis Abeba in quel decennio. Oltre al Guenete Leul Palace, a lui si deve il progetto del Parlamento etiopico, dimostrando una capacità di adattare i canoni dell'architettura istituzionale europea alle specificità locali. L'architettura dell'edificio si distacca dal rigore razionalista che avrebbe poi caratterizzato gli interventi italiani successivi, abbracciando invece uno stile eclettico che fonde la solidità volumetrica della tradizione tedesca con elementi decorativi e materiali locali. L'uso della pietra vulcanica locale (trachite e basalto), lavorata con maestria dagli artigiani etiopi, conferisce all'edificio una connessione cromatica con il paesaggio dell'altopiano. La struttura fu completata intorno al 1934-1935, poco prima che le nubi della guerra italo-etiope si addensassero sull'orizzonte.



*Figura 3 – Guenete Leul Palace*

## **1.2. Il centro del potere dell'occupazione italiana**

L'ingresso delle truppe italiane ad Addis Abeba il 5 maggio 1936 segnò una cesura traumatica nella storia del palazzo. Con la fuga dell'Imperatore Haile Selassie I in esilio e la proclamazione dell'Impero dell'Africa Orientale Italiana, il palazzo subì un immediato processo di appropriazione simbolica e funzionale da parte degli invasori. L'edificio, che fino a pochi mesi prima ospitava la corte imperiale, fu requisito per divenire la residenza ufficiale e il centro amministrativo del Viceré e Governatore Generale dell'Africa Orientale Italiana. Questa trasformazione non fu solo logistica, ma profondamente politica. Il regime fascista intendeva cancellare la memoria della sovranità etiope per sovrapporvi quella imperiale romana. Un atto emblematico di questa *damnatio memoriae* fu l'abbattimento dei leoni che vivevano nel parco del palazzo, animali simbolo della monarchia salomonide, un gesto di violenza simbolica volto a marcare il passaggio di potere.

### **1.2.1. I Viceré al Guenete Leul Palace**

Durante il quinquennio dell'occupazione italiana, il palazzo ospitò le massime autorità coloniali, ciascuna delle quali lasciò un'impronta sulla gestione dello spazio.

Il primo Viceré fu Pietro Badoglio che, pur rimanendo in carica per breve tempo, supervisionò la fase iniziale dell'occupazione militare. Inizialmente le truppe italiane furono sistemate nei giardini del palazzo, trasformando il "Paradiso dei Principi" in un accampamento militare, prima che Badoglio si stabilisse provvisoriamente nella Legazione Italiana.

In seguito, toccò a Rodolfo Graziani assumere il controllo del potere dell'Africa Orientale Italiana. Successore di Badoglio, Graziani scelse il Guenete Leul Palace come sua residenza operativa. Fu da qui che orchestrò le brutali campagne di repressione contro la popolazione locale, specialmente in seguito all'attentato fallito (a lui rivolto) avvenuto nel febbraio 1937. Sotto il suo governatorato, il palazzo divenne un luogo sinistro, centro nevralgico di un'amministrazione militare spietata che utilizzava l'architettura imperiale preesistente per legittimare la propria autorità.

Infine, il potere passò nelle mani di Amedeo di Savoia-Aosta. Con l'arrivo del Duca d'Aosta nel 1937 (noto per un approccio più diplomatico e meno brutale rispetto a Graziani), il palazzo subì ulteriori adattamenti per renderlo consono al rango di un membro della casa reale italiana. Il Duca trasferì definitivamente la

residenza vicereale al Guenete Leul Palace, apportando modifiche agli interni per adeguarli al gusto dell'aristocrazia europea e alle esigenze di rappresentanza del "nuovo Impero" [2].

### **1.2.2. La rete elettrica e la CONIEL**

L'occupazione italiana, pur nella sua brevità e violenza, comportò un massiccio investimento infrastrutturale che trasformò il volto tecnico di Addis Abeba. Tra il 1935 e il 1940, l'Italia investì circa 53 miliardi di lire in opere pubbliche e militari, una cifra enorme che superava addirittura il bilancio annuale dello stato italiano stesso. Questa smania di modernizzazione, sebbene finalizzata al controllo coloniale, lasciò in eredità sistemi tecnici che il palazzo ereditò e che condizionano ancora oggi gli interventi di restauro [3].

Uno dei tanti aspetti legati alla suddetta modernizzazione fu l'elettrificazione. La gestione dell'energia fu affidata alla CONIEL (Compagnia Nazionale Imprese Elettriche), un ente parastatale italiano creato per sviluppare la rete elettrica nell'Africa Orientale Italiana (Eritrea, Etiopia e Somalia). Gli standard introdotti riflettevano la complessa situazione elettrotecnica italiana dell'epoca: tensioni di distribuzione spesso a 120V o 127V per l'illuminazione e 220V per la forza motrice, con frequenze che potevano variare (talvolta 42 Hz o 50 Hz) prima della standardizzazione post-bellica. Il Guenete Leul Palace fu integrato in questa nuova rete elettrica, ricevendo aggiornamenti impiantistici che sostituirono o potenziarono i generatori autonomi precedenti. L'uso di due livelli di tensione e di prese differenziate (tipo "L" da 10A e 16A) divenne comune negli edifici di prestigio dell'epoca. Questa stratificazione elettrica ereditata dal passato, sebbene complessa, funge da punto di partenza per una modernizzazione che mira finalmente alla stabilità. Se l'epoca coloniale ha introdotto i primi standard tecnici, la sfida odierna è quella di superare la storica precarietà della rete locale attraverso l'integrazione di sistemi di continuità e fonti rinnovabili, garantendo al palazzo una resilienza energetica mai raggiunta nelle sue fasi precedenti [4].

### **1.3. Il ritorno dell'Imperatore e il trauma del 1960**

Nel 1940, l'Africa Orientale Italiana si trovava isolata dalla madrepatria e circondata dai possedimenti inglesi. La campagna di liberazione del 1941 non fu una semplice invasione convenzionale, ma il risultato di una strategia combinata. Ci fu un'azione esterna compiuta dalle forze del Commonwealth, che lanciarono un'offensiva a tenaglia. Dal Sudan (nord), il Generale Platt sfondò le difese italiane nella sanguinosa battaglia di Keren; dal Kenya (a sud dell'Etiopia), il Generale

Cunningham condusse una rapida avanzata attraverso la Somalia e l'Ogaden, sfruttando la mobilità per disarticolare le difese italiane. Contemporaneamente ci fu anche un'azione interna: fondamentale fu il ruolo degli Arbegnoch (i Patrioti etiopi), coordinati dalla "Gideon Force" del Maggiore Wingate e galvanizzati dal ritorno in patria dell'Imperatore Haile Selassie I nel gennaio 1941. La guerriglia tagliò le linee di rifornimento italiane e minò il morale delle truppe coloniali.

Di fronte all'avanzata inarrestabile e all'ostilità della popolazione, il Viceré Duca d'Aosta dichiarò Addis Abeba "città aperta" per evitarne la distruzione e si ritirò sulle montagne. Le truppe britanniche entrarono nella capitale il 6 aprile 1941. L'evento simbolico culminante avvenne il 5 maggio 1941: esattamente cinque anni dopo l'ingresso delle truppe fasciste nella città, l'Imperatore Haile Selassie I rientrò trionfalmente nella capitale. La decisione di rioccupare il Guenete Leul Palace come residenza principale non fu solo pratica, ma densa di significato politico. Riabitare le stanze usate dai Viceré italiani significava infatti "purificare" lo spazio e riaffermare la continuità della dinastia salomonide, cancellando la parentesi coloniale italiana. Il palazzo tornò dunque ad essere il cuore pulsante della vita di corte, ospitando la famiglia reale e i dignitari internazionali.

### **1.3.1. Il Colpo di Stato del 1960 e il massacro nel Salone Verde**

La storia residenziale del Guenete Leul Palace si concluse tragicamente nel dicembre 1960. Durante una visita di stato dell'Imperatore in Brasile, la Guardia Imperiale, guidata dai fratelli Mengistu e Germane Neway, tentò un colpo di stato di matrice progressista. I ribelli presero il controllo del palazzo e vi rinchiusero come ostaggi i più alti funzionari del governo, ministri e membri dell'aristocrazia fedeli a Haile Selassie I.

Quando le truppe lealiste dell'esercito e dell'aviazione iniziarono a prevalere assediando il palazzo, i golpisti, ormai senza via di scampo, perpetrarono un massacro nel Salone Verde (Green Salon) del palazzo. Numerosi dignitari furono mitragliati a sangue freddo prima che i ribelli si dessero alla fuga o si suicidassero. Al suo rientro, Haile Selassie I trovò la sua residenza trasformata in un luogo di morte e dolore. L'impatto psicologico di questo evento fu tale che l'Imperatore decise di non risiedere più in tale edificio, luogo di orrori inimmaginabili. Sebbene la sede del governo fosse già ufficialmente nel nuovo Jubilee Palace (completato pochi anni prima, nel 1955), anche la residenza privata fu trasferita nel medesimo palazzo. Il Guenete Leul rimase pertanto vuoto della presenza imperiale, pronto per una nuova destinazione d'uso.

## **1.4. La genesi dell'Università e il dono all'istruzione**

La trasformazione del palazzo in università non fu un evento improvviso, ma il culmine di un processo avviato decenni prima. Già nel 1945, Haile Selassie I, riconoscendo la necessità di formare una classe dirigente moderna per l'Etiopia post-bellica, si rivolse ai Gesuiti canadesi. La figura centrale di questa operazione fu Dr. Lucien Matte, un educatore gesuita visionario. Quest'ultimo lavorò a stretto contatto con l'Imperatore per riorganizzare il sistema scolastico (di cui ne è un esempio la Tafari Makonnen School) e, nel 1950, fondò l'University College of Addis Ababa (UCAA). Inizialmente un college biennale, l'UCAA operava sotto la direzione gesuita ma con una vocazione laica e statale, introducendo standard accademici occidentali e affiliandosi successivamente all'Università di Londra. L'influenza gesuita fu determinante nell'impostare un rigore accademico che avrebbe caratterizzato l'istituzione per i decenni successivi.

Nel 1961, l'University College of Addis Ababa ottenne lo status di università completa, venendo rinominata Haile Selassie I University. In un gesto di munificenza senza precedenti, l'Imperatore donò il Guenete Leul Palace e l'intero parco circostante all'ateneo, affinché ne divenissero il campus principale (oggi noto come Campus di Sidist Kilo). Questa donazione sancì la definitiva desacralizzazione del palazzo come luogo di potere e la sua consacrazione come luogo pubblico del sapere. Gli spazi interni furono adattati: i saloni di ricevimento si trasformarono nelle sale del Museo Etnografico (Institute of Ethiopian Studies), fondato nel 1963. Le stanze private dell'Imperatore furono invece preservate come testimonianza storica, mentre la sala conferenze inferiore fu rinominata Ras Makonnen Hall, in onore del padre dell'Imperatore, mantenendo una funzione cerimoniale e accademica. Il palazzo divenne così il nucleo fisico e simbolico dell'istruzione superiore etiope, un ruolo che ha mantenuto anche durante il regime del Derg e fino ad oggi.

## **1.5. Integrazione nel campus e nella città**

Il Guenete Leul Palace rappresenta il fulcro generatore del campus dell'Addis Ababa University, nel quartiere Sidist Kilo. La sua posizione geografica lo colloca in un punto nevralgico della capitale etiope, in diretta relazione visiva e simbolica con il Yekatit 12, monumento che commemora le vittime del massacro del 1937.



*Figura 4 – Monumento Yekatit 12*

Oggi, lo stato di fatto urbanistico è caratterizzato da una forte tensione tra il nucleo storico imperiale e l'espansione aggressiva delle infrastrutture accademiche circostanti. Il palazzo è inserito in un recinto che funge da campus, accessibile attraverso portali monumentali che regolano un flusso continuo di studenti, ricercatori, personale amministrativo e turisti internazionali. La permeabilità del sito è controllata ma intensa: ciò che un tempo era un'enclave privata della monarchia, ora è uno spazio pubblico soggetto alle pressioni antropiche tipiche di una grande università.

Negli ultimi anni, il contesto architettonico dell'università è mutato radicalmente con la costruzione di nuovi complessi accademici, come il massiccio edificio multifunzionale (torre uffici, auditorium, laboratori) realizzato dalla YOTEK Construction. Questo intervento, sebbene necessario per le esigenze didattiche, ha alterato lo skyline e le relazioni prospettive, introducendo una scala volumetrica che compete con la preminenza gerarchica del palazzo storico. L'analisi dello stato di fatto deve quindi registrare questa compressione spaziale, in cui il patrimonio storico è assediato dalla necessità di espansione edilizia.

## **1.6. Analisi architettonica**

L'edificio si presenta come un volume imponente in stile eclettico, che fonde elementi neoclassici europei con decorazioni e sensibilità locali, tipico dell'architettura di potere del primo Novecento in Etiopia. La struttura portante è in muratura di pietra e cemento armato, materiali che hanno garantito una notevole resilienza strutturale nel corso dei decenni.



*Figura 5 - Ingresso del Guenete Leul Palace*

La facciata principale è scandita da un ritmo regolare di aperture, con un portico d'ingresso monumentale fiancheggiato dalle statue del Leone di Giuda, simbolo della dinastia salomonica. Queste statue non sono meri elementi decorativi, ma costituiscono parte integrante dell'identità storica dell'edificio, essendo state testimoni di eventi cruciali come il tentativo di colpo di Stato del 1960. Attualmente, l'involucro esterno dell'edificio mostra i segni del tempo: patine biologiche, dilavamento delle superfici lapidee e ossidazione degli elementi metallici, fenomeni fisiologici che richiedono interventi di pulitura conservativa [5].

L'interno del palazzo conserva gran parte delle finiture originali, il cui stato di fatto è cruciale per comprendere il valore patrimoniale dell'immobile. Un esempio è il pavimento in legno di Wanza (*Cordia africa*). Questo materiale, pregiato per la sua durezza e venatura, copre ampie superfici delle sale principali e dei corridoi. Lo stato di conservazione varia a seconda delle zone: nelle aree a basso inquinamento antropico mantiene la sua lucentezza, mentre nelle zone di passaggio (ingresso biblioteca, scale) presenta segni di usura meccanica, graffi e perdita dello strato protettivo superficiale. La preservazione diventa dunque, non soltanto un atto di tutela estetica, ma un aspetto vincolante per la progettazione impiantistica. La necessità di non alterare le superfici storiche impone che ogni nuova infrastruttura elettrica debba seguire la logica del “minimo impatto”, trasformando il progetto in una sfida di integrazione invisibile dove la tecnologia è asservita all'architettura senza mai sovrastarla.



*Figura 6 - Ras Makonnen Hall*

Un altro elemento di notevole valore sono “Le sale di rappresentanza”, in particolare l'ex Sala dei Banchetti (oggi Biblioteca IES) e la Ras Makonnen Hall, entrambe dotate di elaborati soffitti a cassettoni. Questi elementi lignei non svolgono solo una funzione estetica, ma contribuiscono all'acustica degli ambienti, rappresentando contestualmente un punto critico per il sistema antincendio.

## **1.7. Analisi funzionale della Biblioteca**

L' Institute of Ethiopian Studies (ex Sala dei Banchetti) rappresenta il cuore intellettuale del palazzo. Fondato nel 1963, ha trasformato la residenza imperiale nel più importante centro mondiale per gli studi etiopici. Lo stato di fatto della Biblioteca IES è quello di una struttura di eccellenza di contenuti, custodendo oltre 60.000 volumi, periodici e tesi. Il fiore all'occhiello è il Woldämäskäl Memorial Research Center, una biblioteca non-lending (ovvero di sola consultazione). L'ambiente di studio è silenzioso e serio, spesso saturo già nelle prime ore del mattino, a testimonianza dell'intensa domanda da parte di studenti e ricercatori. Tale locale, tuttavia, presenta anche alcune criticità: la mancanza di un sistema di climatizzazione centralizzato espone i manoscritti a fluttuazioni di umidità e

temperatura. Inoltre, l'illuminazione naturale, sebbene suggestiva, richiede una gestione attenta per evitare il degrado fotochimico degli inchiostri e delle carte.

## **1.8. Il palazzo tra accademia e turismo**

Lo stato di fatto del Guenete Leul è definito anche dalla sua dimensione immateriale e sociale. L'edificio vive una duplice identità: oltre ad essere un campus universitario aperto, nel corso degli anni è divenuto anche una destinazione turistica. Per i visitatori internazionali, il palazzo è una tappa obbligata per comprendere la storia etiopica. Le recensioni evidenziano un forte interesse per la figura di Haile Selassie I e per l'arte sacra, ma anche una certa frustrazione per la qualità dei servizi (bookshop, caffetteria, guide) che non sempre rispecchiano gli standard internazionali. L'interazione tra il flusso veloce e pragmatico degli studenti e quello lento e contemplativo dei turisti crea frizioni gestionali (come rumore, affollamento) che l'attuale configurazione spaziale fatica a mediare.

## **1.9. Collaborazione Italia-Etiopia**

Oggi, il Guenete Leul Palace è al centro di un rinnovato legame tra Etiopia e Italia, che supera le ombre del passato coloniale per abbracciare la collaborazione scientifica e culturale. Il governo etiopico, attraverso l'Addis Ababa University, ha avviato un ambizioso progetto di restauro e riqualificazione del palazzo e del Museo Etnografico, affidandosi all'esperienza italiana nel campo della conservazione dei beni culturali e della contestuale innovazione tecnologica.



*Figura 7 - Render 3D del nuovo Guenete Leul Palace*

Il progetto, finanziato dall'Agencia Italiana per la Cooperazione allo Sviluppo con un budget complessivo di quattro milioni di euro, vede il Politecnico di Torino come guida scientifica e tecnica. La missione, guidata dal Dipartimento di Architettura e Design (DAD) sotto la direzione del Prof. Michele Bonino e della Vicerettrice Francesca De Filippi, coinvolge un team multidisciplinare che include esperti di restauro, strutturisti e ingegneri elettrici del Dipartimento Energia (DENERG).



*Figura 8 - Delegazione del Politecnico al Guenete Leul Palace*

Congiuntamente al Politecnico, opera il Centro Conservazione e Restauro della Venaria Reale, portando competenze specifiche nel trattamento delle superfici storiche e delle collezioni museali. L'obiettivo del progetto non è un semplice ripristino estetico, ma una rifunzionalizzazione energetica e museale: trasformare il museo in un hub moderno, sicuro e sostenibile, capace di attrarre studenti e visitatori internazionali, risolvendo le criticità impiantistiche ereditate da decenni di stratificazioni non coordinate. Questo intervento rappresenta un esempio paradigmatico di diplomazia culturale, dove l'esperienza tecnica italiana viene messa al servizio della salvaguardia della memoria storica etiope.

## **Capitolo 2**

# **2. Standard normativi internazionali e metodologie di intervento nel restauro impiantistico**

Definita la complessità fisica e funzionale del Guenete Leul Palace, si rende necessario delineare il perimetro normativo entro cui deve muoversi l'intervento di riqualificazione, armonizzando le disposizioni locali con i più elevati standard internazionali. La progettazione degli impianti tecnologici per un complesso monumentale di elevata importanza storica e culturale come il Guenete Leul Palace ad Addis Abeba richiede una sintesi metodologica rigorosa tra le disposizioni legislative vigenti nella Repubblica Federale Democratica d'Etiopia e le norme tecniche internazionali di eccellenza.

Il quadro normativo etiope per il settore delle costruzioni ha subito un'accelerazione significativa nell'ultimo decennio, passando da regolamenti frammentari a un sistema di codici nazionali armonizzati, noti come Ethiopian Building Code Standards (EBCS). Tali provvedimenti costituiscono l'architrave tecnica della legislazione edilizia nazionale. Sviluppati sotto l'egida del Ministero dello Sviluppo Urbano e delle Infrastrutture, i codici attualmente in vigore rappresentano il risultato di un processo di riforma volto all'allineamento con gli standard internazionali. La loro struttura è dichiaratamente derivata dagli Eurocodici (EN), dai quali recepiscono la filosofia prestazionale e i criteri di sicurezza, integrandoli con specifici allegati nazionali che tengono conto delle peculiarità geografiche e ambientali dell'altopiano etiope.

L'Ethiopian Building Code Standards trae ispirazione dalle migliori pratiche europee e nordamericane per garantire standard di sicurezza e affidabilità paragonabili a quelli dei paesi industrializzati. La sfida principale in questo contesto risiede nel saper navigare tra l'obbligatorietà dei codici locali e la necessità di applicare standard internazionali laddove le specifiche locali richiedano

integrazioni per gestire la complessità di una destinazione d'uso museale, caratterizzata da requisiti stringenti di conservazione preventiva e sicurezza pubblica.

Per quanto concerne la struttura del sistema normativo etiopico, attualmente la gerarchia vede al vertice il Ministero dello Sviluppo Urbano e delle Infrastrutture, precedentemente noto come Ministero delle Opere e dello Sviluppo Urbano. Questo organismo detiene il potere legale (derivante dal Proclama n. 41/1993 e successive modifiche) di preparare i codici edilizi del paese, emettere standard per il design e la costruzione e supervisionarne l'attuazione. L'obiettivo primario di tali standard è garantire la conformità degli edifici ai requisiti minimi di sicurezza, salute ed economia, armonizzando la pratica professionale nazionale.

## **2.1. Analisi della rete, dimensionamento dei componenti e cabine di trasformazione**

La fase iniziale di un progetto elettrico per un complesso monumentale prevede l'analisi della fornitura di energia e la definizione dei parametri di guasto. In Etiopia, la fornitura è gestita dalla Ethiopian Electric Utility (EEU), che amministra linee di sub-trasmissione a 45 kV e 66 kV, oltre alla distribuzione capillare in media e bassa tensione. Per un carico significativo come quello di un museo dotato di climatizzazione e sistemi speciali, l'alimentazione avviene in media tensione, con una cabina di trasformazione dedicata.

### **2.1.1. Trasformatori e correnti di cortocircuito**

La progettazione e le specifiche dei trasformatori di potenza devono rispondere rigorosamente alla serie normativa IEC 60076 (recepita localmente come ES IEC 60076), la quale disciplina i requisiti prestazionali e costruttivi delle macchine elettriche di trasformazione. Per interventi in contesti monumentali e museali ad alto afflusso di pubblico, la normativa impone l'adozione di trasformatori a secco con isolamento in resina epossidica, in piena conformità alla IEC 60076. Questa scelta tecnologica rappresenta una misura di prevenzione incendi fondamentale: l'eliminazione dei liquidi isolanti infiammabili (tipici dei trasformatori in olio) azzerava il carico d'incendio all'interno del locale tecnico e previene potenziali danni ambientali derivanti da sversamenti. Inoltre, i materiali isolanti utilizzati presentano spiccate proprietà autoestinguenti, garantendo l'incolumità del patrimonio storico e delle persone anche in condizioni di guasto [6].

Parallelamente, la verifica della sicurezza dell'intero impianto richiede un calcolo analitico e rigoroso delle correnti di cortocircuito, da eseguirsi secondo la norma CEI EN 60909-0 (equivalente alla IEC 60909-0). Tale standard definisce i metodi di calcolo per determinare due parametri critici: la corrente di cortocircuito massima e minima. La prima si rende necessaria per il dimensionamento del potere di interruzione coordinato dei dispositivi di protezione, assicurando che l'interruttore possa estinguere il guasto senza subire danni strutturali, mentre la seconda è indispensabile per la verifica della protezione contro i contatti indiretti. L'impedenza dell'anello di guasto deve essere sufficientemente bassa da permettere l'intervento automatico della protezione entro i tempi di sicurezza prescritti dalla norma (5 secondi per i circuiti appartenenti alla distribuzione primaria e 0,4 secondi per i circuiti terminali) [7].

L'applicazione di questi metodi nel contesto di Addis Abeba richiede un'attenzione specifica all'infrastruttura dell'ente distributore Ethiopian Electric Utility (EEU). Il calcolo deve infatti integrare l'impedenza della rete di media tensione a monte, la cui gravosità dei guasti è variabile e fortemente influenzata dalla vicinanza elettrica alle sottostazioni primarie della capitale.

### **2.1.2. Classificazione delle forniture e continuità del servizio**

In virtù della sua funzione istituzionale di polo museale, il Guenete Leul Palace è classificato come un'utenza per la quale l'affidabilità e la continuità del vettore energetico rappresentano requisiti tecnici imprescindibili. La necessità di garantire la protezione costante dei reperti e delle persone impone lo sviluppo di una gerarchia di alimentazione resiliente, basata sulla coordinazione tra generatore d'emergenza e sistema di continuità statica (UPS).

In linea con quanto prescritto dalla norma IEC 60364-5-56, i servizi di sicurezza e i carichi critici (server di gestione dati, sistemi di rilevazione incendi e apparecchiature per la conservazione preventiva) devono essere asserviti a sorgenti di sicurezza capaci di intervenire con tempi di commutazione nulli o trascurabili. In questo scenario, il sistema UPS garantisce l'alimentazione sicura per i carichi digitali sensibili alle micro-interruzioni (inferiori a 150 ms), mentre l'integrazione di un gruppo elettrogeno assicura l'autonomia energetica prolungata dell'intero complesso a fronte dei blackout critici che caratterizzano la rete locale di Addis Abeba [8].

Sotto il profilo della qualità della fornitura, l'impianto deve rispondere ai parametri definiti dalla norma IEC 60038, che stabilisce le tensioni nominali standard e le tolleranze ammissibili per le reti di distribuzione in bassa e media

tensione, prevenendo così l'usura precoce o il malfunzionamento delle utenze terminali. Parallelamente, la stabilità operativa dell'infrastruttura è subordinata al rispetto dei requisiti di compatibilità elettromagnetica (EMC) prescritti dalla serie IEC 61000. Tale normativa risulta determinante in un contesto museale moderno per mitigare l'impatto di disturbi condotti come armoniche, flicker e transitori di tensione, che potrebbero compromettere l'integrità dei sistemi di sicurezza IP e delle strumentazioni elettroniche di precisione asservite al palazzo.

## **2.2. Sistemi di elevazione**

La rifunionalizzazione del Guenete Leul Palace in polo museale moderno impone il superamento delle barriere architettoniche strutturali attraverso l'integrazione di sistemi di elevazione verticale (ascensori e montacarichi). In linea con la tendenza normativa etiope di armonizzazione agli standard internazionali, la progettazione di tali impianti deve fare riferimento rigoroso alla UNI EN 81, recepita come benchmark di sicurezza e funzionalità.

Nello specifico, la norma UNI EN 81-20 definisce i requisiti di sicurezza per la costruzione e l'installazione, introducendo criteri stringenti per la robustezza meccanica delle porte di piano e di cabina, la gestione degli spazi di rifugio in fossa e in testata per i manutentori, e la protezione contro i movimenti incontrollati della cabina [9]. Parallelamente, per garantire la fruizione del patrimonio culturale a tutti i visitatori, l'impianto deve rispondere alla UNI EN 81-70 riguardante l'accessibilità universale. Questa norma specifica non solo le dimensioni minime della cabina per consentire la manovra di una carrozzina, ma anche i dettagli ergonomici fondamentali: il posizionamento e il contrasto cromatico delle pulsantiere, i tempi di permanenza delle porte aperte per facilitare l'ingresso, e la dotazione di sintesi vocale e segnali acustici per l'orientamento degli ipovedenti [10].

Dal punto di vista elettrico, l'alimentazione degli elevatori richiede una progettazione mirata che tenga conto delle dinamiche di carico dei motori elettrici. La linea di alimentazione deve essere dedicata e protetta da interruttori magnetotermici con una curva di intervento che eviti scatti intempestivi durante le fasi di spunto, dove la corrente può superare significativamente quella nominale per brevi intervalli. Infine, l'impianto deve essere integrato nel sistema di gestione dell'energia del palazzo: in caso di interruzione della rete elettrica principale, il sistema di soccorso deve garantire l'alimentazione d'emergenza necessaria per la manovra di ritorno automatico al piano e l'apertura delle porte, scongiurando il

rischio di intrappolamento degli utenti in conformità alle procedure di sicurezza antincendio e di evacuazione.

### **2.3. Gestione dell'ambiente interno**

La conversione del palazzo in sede museale e biblioteca di ricerca impone l'adozione di sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC) che rispondano sia al comfort degli utenti che alle esigenze di conservazione dei reperti. In tale contesto, l'installazione deve seguire un approccio non invasivo, in linea con le normative europee di riferimento per il patrimonio culturale.

La norma EN 15759-1 fornisce le linee guida per la gestione del clima negli edifici storici. Per il Guenete Leul Palace, che ospita manoscritti antichi e arredi in legno pregiato, è essenziale prevenire gli sbalzi repentini di umidità relativa. I materiali igroscopici, infatti, reagiscono alle variazioni di vapore acqueo nell'aria con movimenti dimensionali che possono causare cricche, fessurazioni o distacchi irreversibili nelle fibre del legno e nelle pergamene. Il sistema HVAC deve quindi operare con logiche di controllo graduale, mantenendo parametri ambientali entro intervalli di tolleranza ristretti [11].

Per quanto concerne le aree destinate specificamente alla conservazione e all'archiviazione, la norma EN 16893:2018 specifica i requisiti per la qualità dell'aria e la ventilazione. Oltre al controllo termico, la norma impone l'abbattimento degli inquinanti atmosferici (particolato e gas acidi) attraverso sistemi di filtrazione ad alta efficienza, necessari per prevenire il degrado chimico delle collezioni. Inoltre, la norma introduce il concetto di sicurezza antincendio integrata, richiedendo che i sistemi di ventilazione siano coordinati con serrande tagliafuoco e sistemi di rilevamento precoce per evitare che i canali dell'aria diventino vettori di propagazione fumi.

Data l'estensione planimetrica del palazzo e la natura energivora dei sistemi HVAC e di illuminazione museale, la progettazione elettrica deve integrare i principi della norma IEC 60364-8-1, dedicata all'efficienza energetica delle installazioni. La norma guida la scelta di sistemi di misura e monitoraggio dell'energia (BMS). Attraverso l'installazione di analizzatori di rete e sensori di presenza, è possibile ottimizzare i consumi in tempo reale, modulando l'intensità luminosa e la ventilazione in base all'effettiva affluenza dei visitatori o alle ore di irraggiamento solare, massimizzando così l'autoconsumo garantito dal nuovo impianto fotovoltaico [12].

## **2.4. Requisiti fondamentali per le installazioni (CEI 64-8 e IEC 60364)**

La norma CEI 64-8, essendo la trasposizione italiana della serie IEC 60364, rappresenta lo standard di riferimento avanzato per la progettazione e l'esecuzione degli impianti. Essa copre gli aspetti fondamentali di protezione contro i contatti diretti e indiretti, protezione contro gli effetti termici e le sovratensioni. Nel contesto del Guenete Leul Palace, l'applicazione della CEI 64-8 assicura una protezione superiore rispetto ai requisiti minimi dell'EBCS 10, specialmente per quanto riguarda la selettività delle protezioni e la protezione contro l'incendio di origine elettrica [13].

Per quanto concerne i quadri elettrici, la progettazione deve conformarsi alla IEC 61439. Tale norma definisce i requisiti di costruzione, i test di tipo e le verifiche individuali per i sistemi di distribuzione. Per un museo, i rapporti tecnici di design in Etiopia suggeriscono un IP43 minimo per i quadri principali con porte chiuse e un IP23 per i quadri appartenenti ai livelli di distribuzione secondaria e terziaria installati in ambienti protetti [14].

### **2.4.1. Selezione dei cavi e modalità di posa**

La selezione dei conduttori rappresenta un punto cardine della progettazione elettrica per il Guenete Leul Palace, richiedendo una valutazione che coniughi le prestazioni tecniche con le rigide prescrizioni normative locali e internazionali. All'interno del contesto infrastrutturale etiope, le specifiche tecniche per le opere pubbliche e i restauri di pregio proibiscono tassativamente l'impiego di conduttori in alluminio, imponendo l'uso esclusivo del rame ad alta conducibilità. Tale scelta è dettata dalla necessità di garantire una maggiore affidabilità delle connessioni nel tempo, riducendo i rischi di allentamento dei morsetti dovuto ai cicli termici e minimizzando le cadute di tensione, fattore critico data l'estensione planimetrica del complesso. I cavi devono essere conformi alla norma internazionale IEC 60502-1, che disciplina i requisiti per cavi di potenza con isolamento estruso per tensioni nominali da 1 kV a 30 kV, privilegiando materiali termoplastici o termoindurenti avanzati come l'EPR (gomma etilenpropilenica) o l'XLPE (polietilene reticolato), capaci di sostenere temperature operative fino a 90 °C e garantire un'elevata resistenza agli sforzi elettrodinamici in caso di cortocircuito [15].

La determinazione della portata dei cavi non può prescindere da un calcolo analitico che consideri le temperature e le condizioni di posa. Si fa riferimento alle tabelle delle norme CEI UNEL 35024 e CEI UNEL 35026, applicando i necessari

fattori di correzione K per la temperatura ambiente e il raggruppamento dei circuiti. Nel progetto del palazzo, il collegamento tra la cabina e il quadro generale di bassa tensione avviene tramite condotti interrati, configurazione che ricade nella modalità di posa 61 della norma CEI UNEL 35026, in cui la dissipazione termica è influenzata dalla resistività termica del terreno argilloso locale. Al contrario, per la dorsale principale che serve i locali interni, si predilige la posa in aria su passerelle forate o mensole all'interno di cavedi e controsoffitti, identificata dalla modalità di posa 13. Quest'ultima permette una ventilazione naturale superiore e facilita le operazioni di manutenzione e implementazione futura [16].

In un edificio di tale valore storico, la sicurezza antincendio legata ai conduttori assume un rilievo primario. Oltre alla portata termica, la scelta del tipo di guaina deve rispondere ai requisiti di bassa emissione di fumi opachi e assenza di gas acidi corrosivi (LSZH - Low Smoke Zero Halogen) in conformità alle norme IEC 61034 e IEC 60754. Questa precauzione è indispensabile non solo per la salvaguardia degli occupanti, ma soprattutto per la protezione dei manoscritti e delle opere d'arte custodite nel museo, che potrebbero essere irrimediabilmente danneggiati dai vapori acidi sprigionati dalla combustione di cavi in PVC tradizionale.

#### **2.4.2. Impianto di terra e protezione contro i fulmini**

Addis Abeba sorge su un terreno di origine vulcanica, caratterizzato da un'elevata resistività specifica  $\rho$ . In tali condizioni, ottenere un'impedenza dell'anello di guasto  $Z_s$  sufficientemente bassa per garantire la protezione delle persone attraverso l'intervento delle protezioni magnetotermiche è una sfida progettuale. Il codice normativo etiope, in linea con la IEC 60364-5-54, impone l'integrazione di dispersori di profondità  $e$ , dove necessario, l'utilizzo di composti chimici migliorativi della conduttività del suolo per stabilizzare la resistenza di terra  $R_E$  al di sotto dei valori limite di sicurezza.

Inoltre, data l'elevata frequenza di scariche atmosferiche sull'altopiano etiope, la protezione contro i fulmini del Guenete Leul Palace deve essere progettata secondo la serie IEC 62305 (CEI EN 62305), eseguendo l'analisi del rischio per determinare il livello di protezione (LPL) necessario e l'eventuale installazione di limitatori di sovratensione (SPD).

#### **2.4.3. Sistema di distribuzione TN-S (CEI 64-8)**

La Parte 1 della norma CEI 64-8 definisce l'architettura del sistema elettrico. Per il Guenete Leul Palace, si è deciso di adottare un sistema di distribuzione TN-S, ovvero con conduttore di neutro e di protezione separati.

Questa configurazione, sebbene più costosa in termini di conduttori rispetto al TN-C (terra e neutro in comune), è l'unica compatibile con le moderne esigenze di compatibilità elettromagnetica (EMC). In un museo che integra sistemi di sicurezza IP, server di gestione e apparati audiovisivi, l'assenza di correnti di neutro circolanti sul conduttore di protezione (PE) è fondamentale per prevenire interferenze sui segnali dati e interventi intempestivi dei differenziali.

#### **2.4.4. IEC 60364-4-41: protezione contro lo shock elettrico**

Ai sensi della IEC 60364-4-41, la protezione addizionale tramite dispositivi differenziali con  $I_{\Delta n} \leq 30 \text{ mA}$  è prevista per tutti i circuiti terminali che non rispettano la disequazione:

$$Z_S \cdot I_a \leq U_0$$

Dove  $Z_S$  rappresenta l'anello di guasto,  $I_a$  la corrente di cortocircuito minima (ossia nel caso di guasto a fondo linea) e  $U_0$  il valore di tensione monofase, pari a 220 V. A seconda della natura del carico, il progetto specifica l'uso di RCD (Residual Current Device) di Tipo B o F.

Un'innovazione normativa introdotta nel progetto è l'uso dei dispositivi AFDD (Arc Fault Detection Devices), come raccomandato dalla IEC 60364-4-42. In un edificio storico con solai in legno e strutture combustibili, il rischio di archi elettrici "serie" (che un normale magnetotermico non può rilevare) rappresenta la principale causa di innesco di incendi elettrici. L'implementazione di AFDD sui circuiti che alimentano le sale espositive eleva drasticamente il livello di sicurezza del patrimonio culturale [17].

## **2.5. Integrazione del sistema fotovoltaico**

La progettazione del sistema fotovoltaico deve seguire criteri tecnici rigorosi per la sicurezza della generazione e per la stabilità della connessione. La Sezione 27 dell'EBCS 10 fornisce le linee guida per i sistemi fotovoltaici in Etiopia. In particolare, la tensione massima a vuoto del generatore fotovoltaico deve essere calcolata considerando la  $U_{OC}$  in giornate fredde per prevenire guasti all'inverter in tali condizioni meteorologiche. Inoltre, i conduttori devono essere dimensionati per almeno il 125% della corrente di cortocircuito  $I_{CC}$  dei moduli. La caduta di tensione massima ammessa tra i moduli e l'inverter è del 5%, sebbene per ragioni di efficienza energetica (IEC 60364-8-1) si tenda a limitarla al 3%. Infine, è richiesta

la protezione contro i guasti d'arco DC per prevenire incendi causati da connessioni deteriorate [18].

### **2.5.1. Connessione alla rete e Standard CEI 0-21**

La normativa italiana CEI 0-21 è il riferimento tecnico d'eccellenza per la connessione di sistemi di produzione alla rete BT e, in fase preliminare, può essere utilizzata per eseguire un corretto dimensionamento dell'impianto. Essa definisce le soglie di tensione e frequenza per il dispositivo di interfaccia (DDI) e i tempi di riconnessione dopo un'anomalia. In Etiopia, l'EEU sta implementando politiche di net metering basate sulla fornitura di energia da sistemi rinnovabili se la generazione non eccede il consumo medio mensile dell'utente [19].

L'uso di inverter con funzionalità avanzate (smart inverters) è essenziale per supportare la rete locale instabile e gestire transitori di tensione senza disconnessioni non necessarie.

## **2.6. I sistemi speciali**

In ambito museale, gli impianti speciali costituiscono il cuore della protezione della vita umana e delle collezioni. La normativa etiopica EBCS 13:2014 (Fire Precautions) stabilisce i criteri generali per i sistemi di allarme e controllo fumo.

### **2.6.1. Rilevazione Incendi (UNI 9795 e EBCS 13)**

L'impianto di rilevazione deve essere progettato secondo la norma UNI 9795. Questo standard dettaglia il numero e la posizione dei rilevatori (fumo, calore, fiamma o aspirazione) in funzione dell'altezza del soffitto e della complessità architettonica delle sale del Guenete Leul Palace. Per aree museali di pregio, si preferiscono sistemi di rilevazione ad aspirazione (ASD) con campionamento d'aria, meno invasivi esteticamente e più rapidi nel rilevare principi di incendio [20].

### **2.6.2. Allarme Vocale ed Emergenza (EN 54-16 e CEI EN 50849)**

Al fine di garantire un'evacuazione del pubblico ordinata e sicura, la gestione delle emergenze all'interno del polo museale deve essere affidata a sistemi di diffusione sonora per scopi di sicurezza (EVAC), i quali permettono di trasmettere istruzioni vocali tempestive e mirate, riducendo sensibilmente i tempi di reazione

rispetto ai segnali acustici tradizionali. La progettazione di tali infrastrutture è governata in primis dalla norma EN 54-16, che stabilisce i requisiti rigorosi per le unità di controllo e segnalazione vocale, ovvero il cuore del sistema che deve essere in grado di gestire le priorità dei messaggi e monitorare costantemente l'integrità di ogni singolo componente [21].

Per incrementare la resilienza dell'impianto a fronte di eventi critici, si applica la norma CEI EN 50849, la quale definisce le specifiche per i sistemi audio di emergenza, imponendo l'adozione di topologie a loop ridondanti o linee monitorate; tale accorgimento tecnico garantisce che il sistema rimanga pienamente operativo anche in presenza di un guasto o di un'interruzione fisica dei cavi in un ramo della distribuzione [22].

Un aspetto di fondamentale importanza per un edificio storico come il Guenete Leul Palace, caratterizzato da ampie sale con soffitti elevati e superfici riflettenti in pietra o legno che generano elevata riverberazione, è la verifica dell'intelligibilità del parlato, disciplinata dalla norma IEC 60268-16. Tale standard definisce le metodologie per il calcolo e la misurazione dell'indice STIPA (Speech Transmission Index for Public Address), un parametro oggettivo che quantifica la degradazione del messaggio vocale causata dal rumore di fondo e dalle distorsioni acustiche dell'ambiente. Nelle aree destinate all'evacuazione del palazzo, è richiesto il raggiungimento di un valore STIPA superiore a 0.50, soglia critica per assicurare che le istruzioni di emergenza siano perfettamente comprensibili dai visitatori, permettendo una fuga rapida e consapevole anche in condizioni di forte stress ambientale.

### **2.6.3. IEC 62676: Videosorveglianza (CCTV)**

La progettazione del sistema CCTV segue la IEC 62676, adottando il criterio DORI (Detection, Observation, Recognition, Identification) per definire la densità di pixel necessaria in ogni area. La rete dati deve supportare non solo la gestione amministrativa, ma anche i servizi multimediali per i visitatori (app, schermi LED e realtà aumentata) e il trasporto dei flussi video di sicurezza su IP. Per quanto concerne le classi di prestazione, si farà riferimento alla ISO/IEC 11801 Class EA (Categoria 6A), che garantisce supporto per 10 Gigabit Ethernet. Questo standard è necessario per prevenire l'obsolescenza precoce dell'infrastruttura, dato che la ricablatura di un edificio storico è un'operazione estremamente invasiva e costosa che non si può ripetere frequentemente [23].

La norma europea EN 50174-2, spesso usata in congiunzione con ISO/IEC 11801, detta le distanze minime di separazione tra cavi dati e cavi di potenza per

garantire l'immunità elettromagnetica. Negli edifici storici, dove i cavedi sono spesso saturi o condivisi con altri impianti, l'uso di cavi dati schermati (S/FTP) e compartimentazioni metalliche nei canali è una prescrizione progettuale essenziale derivata da questa norma.

## **Capitolo 3**

# **3. Analisi comparativa e stima parametrica dei costi per corpo d'opera**

Prima di procedere con la fase di progettazione, è stata svolta un'analisi preliminare volta alla determinazione del quadro economico per la componente impiantistica del museo, strutturata secondo un approccio parametrico-comparativo per corpi d'opera. Tale strategia si è resa necessaria a fronte dell'assenza di prezzi ufficiali nel contesto locale e della contestuale esigenza di garantire standard qualitativi conformi alle normative internazionali IEC e ISO. L'impossibilità di fare affidamento su indici di costo territoriali ha orientato la ricerca verso la selezione di casi studio analoghi per complessità tecnologica e pregio architettonico, individuando nel recupero impiantistico del Castello Carrarese e nell'integrazione tecnologica di Casa Miroglio i benchmark di riferimento più idonei. Questi progetti hanno permesso di ricavare indici di costo al metro quadrato (€/m<sup>2</sup>) affidabili, capaci di riflettere le sfide poste dall'integrazione di sistemi elettrici avanzati in contesti storici vincolati, similmente a quanto previsto per l'intervento presso il Guenete Leul Palace.

Il processo estimativo ha richiesto una fase di normalizzazione dei dati per rendere i valori storici dei benchmark direttamente trasponibili alla realtà del progetto in esame. Questa procedura ha previsto, in primo luogo, l'attualizzazione dei costi per compensare l'inflazione settoriale e le fluttuazioni di mercato intercorse tra la realizzazione dei modelli sorgente e la data attuale. Parallelamente, è stato necessario operare un adattamento geometrico e dimensionale, utilizzando coefficienti correttivi capaci di riflettere la diversa scala delle superfici e la densità dei punti di erogazione. Attraverso questa trasposizione parametrica, è stato possibile definire una base di costo unitaria coerente, poi applicata alla volumetria specifica dell'edificio museale di Addis Abeba.

Un elemento di discontinuità rispetto ai modelli di riferimento europei è rappresentato dalla necessità di un adattamento tecnico-climatico delle voci di costo. L'ubicazione geografica del sito, a 2.355 metri di altitudine, ha imposto una ricalibrazione delle specifiche dei componenti principali, integrando nei costi i sovrapprezzi derivanti dai fenomeni di declassamento termico.

La fase finale di validazione ha previsto la sintesi dei dati attraverso una media ponderata dei casi studio analizzati, permettendo di minimizzare le distorsioni legate alle specificità singolari di ogni intervento di riferimento. Questo processo di sintesi analitico-comparativa ha portato dunque alla definizione di un budget previsionale solido e verificabile, in grado di coniugare l'affidabilità prestazionale dell'infrastruttura elettrica con i vincoli di sostenibilità finanziaria dell'opera.

### **3.1. Analisi del caso studio Castello Carrarese**

Il principale riferimento adottato per la costruzione del modello di costo è il progetto esecutivo relativo alla ristrutturazione di un'ala del Castello Carrarese, situato a Padova, nel Nord Italia. La scelta di questo specifico caso studio risponde a precisi criteri di comparabilità: destinazione d'uso e completezza documentale. Si tratta infatti di ambienti museali, espositivi o di pregio storico, che richiedono un livello di finitura e complessità impiantistica analogo a quello previsto per il Guenete Leul Palace. Inoltre, la disponibilità di un computo metrico estimativo dettagliato ha permesso di scendere nel particolare di ogni singola voce di capitolato [24].



*Figura 9 - Vista aerea del Castello Carrarese di Padova*

### **3.1.1. Determinazione delle superfici e dei perimetri**

In fase preliminare, è stata condotta un'analisi dimensionale sugli elaborati grafici del Castello Carrarese per definire con precisione le superfici di riferimento. È stata calcolata l'area complessiva interessata dall'intervento di ristrutturazione, tenendo conto della distribuzione su più piani dell'edificio storico. Dall'analisi planimetrica è emerso un valore pari a circa 2.900 m<sup>2</sup>.

Il computo metrico estimativo originale è quindi stato sottoposto a un processo di disaggregazione funzionale. Le voci di costo sono state raggruppate in macrocategorie corrispondenti ai diversi corpi d'opera, permettendo di isolare le incidenze economiche delle singole tecnologie. Le categorie analizzate sono:

- cabina di trasformazione MT/BT;
- impianto di messa a terra;
- distribuzione primaria in bassa tensione;
- distribuzione secondaria;
- impianto di illuminazione (ordinaria e scenografica);
- illuminazione di sicurezza ed emergenza;
- rivelazione fumi e impianto antincendio;
- impianti di sicurezza (antifurto e videosorveglianza CCTV);
- impianti speciali (telefonia, dati, EVAC).

### **3.1.2. Attualizzazione dei costi**

Poiché il progetto riferito alla ristrutturazione del Castello Carrarese risale all'anno 2018, i costi unitari presenti nel computo metrico originale non potevano essere applicati tali e quali al contesto attuale. Va tenuta in considerazione l'inflazione, così come l'aumento del costo delle materie prime (in particolare dei componenti elettronici) verificatosi negli ultimi anni. Per rendere i valori economici coerenti con l'orizzonte temporale del progetto oggetto di questa tesi, è stato dunque applicato un fattore di attualizzazione economica  $i$  del 4% per un periodo  $n$  di 7 anni.

La formula utilizzata per l'attualizzazione del costo di ogni singola voce  $C_{2018}$  al valore corrente  $C_{2025}$  è la seguente:

$$C_{2025} = C_{2018} \cdot (1 + i)^n$$

Questo passaggio ha permesso di allineare i prezzi storici ai livelli di mercato odierni.

| <b>CASTELLO CARRARESE</b>         |                                                     |                            |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------|
| VOCE DI COSTO                     | INDICE DI COSTO<br>ATTUALIZZATO [€/m <sup>2</sup> ] | COSTO PER<br>CORPO D'OPERA |
| Cabina di trasformazione MT/BT    | 6,47                                                | 38.820 €                   |
| Impianto di distribuzione BT      | 53,93                                               | 323.580 €                  |
| Quadri elettrici BT               | 15,46                                               | 92.760 €                   |
| Impianto di illuminazione         | 41,46                                               | 248.760 €                  |
| Illuminazione d'emergenza         | 13,49                                               | 80.940 €                   |
| Impianto di terra                 | 0,22                                                | 1.320 €                    |
| Impianto di protezione da fulmini | 0,73                                                | 4.380 €                    |
| Audio e annunci EVAC              | 10,59                                               | 63.540 €                   |
| Telefonia e dati                  | 9,83                                                | 58.980 €                   |
| Antintrusione                     | 4,69                                                | 28.140 €                   |
| Antincendio                       | 15,23                                               | 91.380 €                   |
| CCTV                              | 6,23                                                | 37.380 €                   |
| GE                                | 13,27                                               | 105.000 €                  |
| <b>TOT</b>                        | <b>191,61</b>                                       | <b>1.174.980€</b>          |

*Tabella 1 - Riassunto del computo metrico del progetto esecutivo di Castello Carrarese*

I valori dei costi per corpo d'opera riportati nella tabella 1 si basano sul computo metrico del Castello Carrarese ma sono riferiti già alla superficie del Guenete Leul Palace, circa doppia rispetto al benchmark di riferimento. Tale processo è sviscerato nel paragrafo successivo.

### **3.1.3. Parametrizzazione scalare (scaling up)**

Successivamente all'attualizzazione dei costi, si è proceduto all'adeguamento delle quantità e dei costi totali in funzione della differenza di scala tra i due edifici, il Guenete Leul Palace e il Castello Carrarese. Il museo di Addis Abeba presenta una superficie complessiva pari a circa 6.000 m<sup>2</sup>, circa il doppio rispetto al caso studio preso come riferimento. È stato pertanto determinato il fattore di scala  $K_s$  tra le superfici:

$$K_s = \frac{S_{Guenete Leul}}{S_{Castello Carrarese}} = \frac{6.000 \text{ m}^2}{2.900 \text{ m}^2} = 2,07$$

In linea teorica generale, il costo del progetto obiettivo  $C_{Guenete Leul}$  è stato calcolato come:

$$C_{Guenete Leul} = K_s \cdot C_{Castello Carrarese}$$

Tuttavia, l'applicazione indiscriminata di questo coefficiente lineare avrebbe introdotto parecchi errori. Pertanto, si è reso necessario un affinamento tecnico descritto nel paragrafo successivo.

### 3.1.4. Adattamenti tecnici e variabili ambientali

L'analisi critica delle differenze tecnologiche e ambientali tra il sito di Padova (Nord Italia) e quello di Addis Abeba (Etiopia, fascia equatoriale) ha imposto una differenziazione nel metodo di calcolo per specifici corpi d'opera. Non tutte le voci di costo, infatti, crescono linearmente con la superficie o sono indipendenti dalle condizioni di contorno. Si sono individuate tre categorie di comportamento dei costi.

- 1) Costi variabili linearmente. Per l'impianto di distribuzione primaria o gli impianti di illuminazione, rivelazione incendi e videosorveglianza (CCTV), la quantità di dispositivi è strettamente proporzionale ai metri quadri. Per queste voci, l'applicazione del fattore  $K_s$  è stata mantenuta integrale.
- 2) Costi fissi. Alcuni componenti infrastrutturali non dipendono direttamente dalla dimensione dell'edificio, ma dall'esistenza stessa dell'impianto, come nel caso della cabina di trasformazione MT/BT. La componentistica di media tensione e i quadri generali di piano appartenenti al livello di distribuzione primaria hanno costi che non raddoppiano necessariamente al raddoppiare della superficie, ma seguono logiche a gradino. Per queste voci, le quantità e i costi sono stati mantenuti sostanzialmente invariati o adeguati con coefficienti ridotti rispetto al fattore  $K_s$ , evitando sovrastime e, di conseguenza, sovraccosti.
- 3) Costi influenzati dalla diversità del clima. Una discrepanza significativa è stata rilevata nel dimensionamento delle linee di alimentazione per la climatizzazione. Il Castello Carrarese, infatti, è situato in zona climatica E e dunque richiede impianti di riscaldamento e raffrescamento energivori. Al contrario, Addis Abeba, godendo di un clima sempre mite tutto l'anno

(chiamato anche l'"eterna primavera"), presenta carichi termici, sia di riscaldamento che di raffreddamento, inferiori rispetto al caso studio preso a paragone. Di conseguenza, le voci relative all'allacciamento forza motrice sono state drasticamente ridotte nel computo per Addis Abeba. Meno potenza richiesta si traduce in costi sensibilmente inferiori delle macchine stesse, oltre che sezioni di cavo inferiori e interruttori di protezione di taglia più piccola, abbattendo così il costo specifico anche per questo corpo d'opera.

### **3.2. Analisi del caso studio Casa Miroglio**

Per mitigare il rischio di bias derivante dall'utilizzo di un'unica fonte dati, è stato introdotto un secondo termine di paragone: il progetto di ristrutturazione di Casa Miroglio, un edificio museale di dimensioni più contenute situato ad Alba, in provincia di Cuneo. La porzione di edificio oggetto a tale intervento ha una superficie pari a circa 800 m<sup>2</sup>, significativamente inferiore rispetto sia al primo caso studio (Castello Carrarese), sia al progetto relativo al Guenete Leul Palace.



*Figura 5 - Esterno di Casa Miroglio ad Alba*

Dal punto di vista impiantistico, la differenza sostanziale rispetto al Castello Carrarese risiede nella modalità di fornitura energetica: l'edificio Casa Miroglio è alimentato direttamente in bassa tensione dalla rete pubblica. Ciò implica l'assenza, nel computo di riferimento, dei costi relativi alla cabina di trasformazione e alla relativa componentistica in media tensione [25].



Figura 6 - Render 3D dell'interno di Casa Miroglio

### 3.2.1. Confronto degli indici parametrici

Nonostante la non trascurabile differenza di superfici tra i due casi studio presi come modelli di riferimento, l'analisi degli indici di costo al metro quadro ( $\text{€}/\text{m}^2$ ) ha evidenziato una notevole convergenza per le tipologie impiantistiche standard. Confrontando i valori ricavati da Castello Carrarese con quelli di Casa Miroglio, si sono riscontrati scostamenti minimi per gli impianti di distribuzione terminale in bassa tensione, messa a terra, sicurezza (antintrusione, CCTV), rivelazione incendi, rete dati e telefonia. Questa coerenza statistica tra due progetti diversi ha validato la robustezza dell'approccio parametrico lineare per queste categorie di impianti.

| <b>CASA MIROGLIO</b>        |                                                           |                                |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------|
| <b>CORPO D'OPERA</b>        | <b>INDICE DI COSTO [<math>\text{€}/\text{m}^2</math>]</b> | <b>COSTO PER CORPO D'OPERA</b> |
| Distribuzione primaria BT   | 28,17                                                     | 22.364 €                       |
| Distribuzione secondaria BT | 31,63                                                     | 25.117 €                       |
| Impianto di illuminazione   | 111,71                                                    | 88.700 €                       |
| Impianto di terra           | 0,14                                                      | 112 €                          |
| Quadri elettrici BT         | 16,45                                                     | 13.061 €                       |
| Telefonia e dati            | 12,57                                                     | 9.977 €                        |
| Antincendio                 | 16,99                                                     | 13.489 €                       |
| Antintrusione               | 7,39                                                      | 5.865 €                        |
| CCTV                        | 11,18                                                     | 8.880 €                        |
| Illuminazione d'emergenza   | 9,81                                                      | 7.787 €                        |
| <b>TOT</b>                  | <b>246,04</b>                                             | <b>195.356 €</b>               |

Tabella 2 - Riassunto del computo metrico del progetto esecutivo di Casa Miroglio

### **3.3. Confronto tra i due casi studio e validazione finale**

La definizione del quadro economico relativo al complesso museale di Addis Abeba ha richiesto l'adozione di una strategia di stima ibrida, finalizzata a coniugare la precisione dei dati storici con le necessità specifiche della nuova installazione. Tale approccio si è reso necessario per superare i limiti di una semplice proiezione lineare, preferendo una valutazione puntuale per ogni singolo corpo d'opera. Per le categorie impiantistiche caratterizzate da una sostanziale uniformità tecnica e funzionale tra i progetti di riferimento (distribuzione in bassa tensione, impianto di terra, sistemi di sicurezza, antincendio e reti dati) si è proceduto alla determinazione di un indice di costo medio ponderato. Questo valore, espresso in €/m<sup>2</sup>, è stato ricavato bilanciando i pesi economici del Castello Carrarese e di Casa Miroglio, permettendo di derivare il costo per il Guenete Leul Palace attraverso la formula:

$$I_{Guenete\ Leul} = \frac{I_{Castello\ Carrarese} + I_{Casa\ Miroglio}}{2}$$

Parallelamente, per i corpi d'opera che presentano divergenze tecniche inconciliabili o lacune informative in uno dei due benchmark, la modellazione economica si è basata esclusivamente sui dati derivanti dal Castello Carrarese, opportunamente aggiornati e scalati in base alla superficie del Guenete Leul. Tale scelta ha interessato in primis la cabina di trasformazione MT/BT (elemento assente nel modello di Casa Miroglio) e i sistemi di diffusione sonora e annunci EVAC per i quali non era disponibile un dettaglio analitico sufficiente nel secondo termine di paragone. Una riflessione analoga è stata estesa al comparto illuminotecnico: l'analisi dei costi di Casa Miroglio ha infatti evidenziato indici parametrici eccessivamente elevati, dettati da scelte artistiche e installazioni di design non coerenti con i requisiti funzionali e con la scala del museo di Addis Abeba, rendendo necessaria una correzione basata sulla configurazione più rappresentativa del Castello Carrarese.

L'integrazione sistematica di questi valori ha permesso di consolidare il bilancio preventivo complessivo, dal quale è stato infine estratto l'indice parametrico globale dividendo il montante totale per la superficie di riferimento. Questo indicatore finale costituisce il pilastro per la successiva fase di progettazione, durante la quale il budget dovrà essere armonizzato tra i vari corpi d'opera.

*Analisi comparativa e stima parametrica dei costi per corpo d'opera*

|                                                    | <b>CASTELLO<br/>CARRARESE</b>          | <b>CASA MIROGLIO</b>                   | <b>CASTELLO<br/>CARRARESE</b> | <b>CASA MIROGLIO</b>       | <b>GUENETE LEUL</b>                    |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------------------|
| VOCE DI COSTO                                      | INDICE DI<br>COSTO [€/m <sup>2</sup> ] | INDICE DI COSTO<br>[€/m <sup>2</sup> ] | COSTO PER CORPO<br>D'OPERA    | COSTO PER CORPO<br>D'OPERA | MEDIA DI COSTO<br>PER CORPO<br>D'OPERA |
| Cabina di trasformazione MT/BT                     | 6,47                                   | NO CABINA                              | 38.820 €                      | NO CABINA                  | <b>38.820 €</b>                        |
| Impianto di distribuzione BT                       | 53,93                                  | 59,80                                  | 323.580 €                     | 358.800 €                  | <b>341.190 €</b>                       |
| Quadri elettrici BT                                | 15,46                                  | 16,45                                  | 92.760 €                      | 98.700 €                   | <b>95.730 €</b>                        |
| Impianto di illuminazione                          | 41,46                                  | -                                      | 248.760 €                     | -                          | <b>248.760 €</b>                       |
| Illuminazione d'emergenza                          | 13,49                                  | 9,81                                   | 80.940 €                      | 58.860 €                   | <b>69.900 €</b>                        |
| Impianto di terra                                  | 0,22                                   | 0,15                                   | 1.320 €                       | 900 €                      | <b>1.110 €</b>                         |
| Audio e annunci EVAC                               | 10,59                                  | -                                      | 63.540 €                      | -                          | <b>63.540 €</b>                        |
| Telefonia e dati                                   | 9,83                                   | 12,57                                  | 58.980 €                      | 75.420 €                   | <b>67.200 €</b>                        |
| Antintrusione                                      | 4,69                                   | 7,39                                   | 28.140 €                      | 44.340 €                   | <b>36.240 €</b>                        |
| Antincendio                                        | 15,23                                  | 16,99                                  | 91.380 €                      | 101.940 €                  | <b>96.660 €</b>                        |
| CCTV                                               | 6,23                                   | 11,18                                  | 37.380 €                      | 67.080 €                   | <b>52.230 €</b>                        |
| GE                                                 | 17,50                                  | -                                      | 105.000 €                     | -                          | <b>105.000 €</b>                       |
| <b>TOT (INCLUSO cabina, quadri elettrici e GE)</b> |                                        |                                        |                               |                            | <b>1.191.012 €</b>                     |
| <b>TOT (ESCLUSO cabina, quadri elettrici e GE)</b> |                                        |                                        |                               |                            | <b>976.830 €</b>                       |

*Tabella 3 – Riassunto dei due casi studio e applicazione dei risultati ottenuti al Guenete Leul Palace*

$$I_{TOT} = \frac{C_{TOT}}{A} = \frac{1.191.012 \text{ €}}{5.750 \text{ m}^2} = 207 \text{ €/m}^2$$

Si evidenzia dunque che l'incidenza economica parametrica dell'infrastruttura elettrica e dei sistemi speciali per il Guenete Leul Palace si attesta su un valore di poco superiore ai 200 €/m<sup>2</sup>. Tale valore rappresenta una sintesi analitica che assorbe l'intero spettro delle opere necessarie alla completa funzionalità energetica del complesso. In questo indicatore risulta pienamente integrato l'impatto finanziario delle infrastrutture di potenza pesanti, a partire dalla fornitura e posa della cabina di trasformazione MT/BT equipaggiata con trasformatore in resina, fino ai sistemi di protezione e sezionamento del quadro generale di media e di bassa tensione. La stima include inoltre le dotazioni fondamentali per la resilienza e la continuità del servizio, contemplando l'acquisto del gruppo elettrogeno e i relativi oneri installativi. Quest'ultimi comprendono non solo i dispositivi di interfaccia, come il quadro di commutazione rete/gruppo con logica di scambio automatizzata, ma anche le opere accessorie quali le dorsali di potenza in conduttori unipolari e i cavidotti interrati.

Il valore ottenuto riflette dunque la peculiarità di un intervento in ambito museale, dove l'integrazione di sistemi speciali ad alta tecnologia (antincendio, sicurezza e automazione illuminotecnica) richiede standard realizzativi sensibilmente superiori a quelli dell'edilizia civile ordinaria. Sebbene tale l'indice ottenuto mantenga una natura cautelativa e previsionale (poiché derivata da un processo di trasposizione da modelli benchmark analoghi), costituisce una base di pianificazione finanziaria solida e tecnicamente motivata. L'indicatore finale risulta infatti depurato dalle distorsioni statistiche e ricalibrato sulle sfide ambientali di Addis Abeba, garantendo una copertura economica coerente con le necessità di sovradimensionamento degli apparati e con la complessità architettonica del progetto.

## **Capitolo 4**

# **4. Modellazione e dimensionamento dell'impianto elettrico**

Sulla base dei criteri normativi precedentemente analizzati, il presente capitolo sviluppa l'ossatura tecnica dell'intervento di riqualificazione impiantistica. Si procede al dimensionamento della distribuzione primaria dell'edificio, analizzando ogni componente dal punto di consegna in media tensione fino ai principali quadri di distribuzione, con l'obiettivo di garantire un'infrastruttura elettrica resiliente e capace di supportare le nuove funzioni museali e accademiche del palazzo, nel contesto precario della rete elettrica del Paese.

### **4.1. Stima della potenza di progetto**

La determinazione della potenza di progetto è stata condotta attraverso l'applicazione del metodo statistico-parametrico della densità di potenza, un approccio consolidato nella pratica ingegneristica per la stima preliminare dei carichi in assenza di piani di carico definitivi. Inizialmente, in coerenza con i benchmark internazionali per le destinazioni d'uso museali, è stata assunta una densità di potenza nominale pari a  $50 \text{ VA/m}^2$ . Tale parametro, tuttavia, è stato oggetto di una ricalibrazione analitica che ne ha ridotto il valore operativo a  $45 \text{ VA/m}^2$ . La presente correzione si rende necessaria per allineare il calcolo alle specificità termofisiche del sito di intervento: la collocazione geografica ad Addis Abeba, caratterizzata da un regime climatico sub-tropicale d'altopiano stabilmente temperato, determina una riduzione non trascurabile del fabbisogno energetico legato ai sistemi di HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning). Rispetto ai canoni europei, l'assenza di estremi termici stagionali abbatte l'incidenza dei carichi per il riscaldamento e per il raffrescamento, permettendo un dimensionamento più aderente ai reali profili di carico.

Dopo aver calcolato il valore complessivo di carico convenzionale  $C_c$  dell'edificio moltiplicando la densità di potenza per la superficie del Guenete Leul

(circa 5.750 m<sup>2</sup>), si passa alla definizione della potenza di progetto  $S_P$ . Il calcolo integra due parametri correttivi fondamentali: il coefficiente di perdita  $C_p$  e il coefficiente di elasticità  $C_e$ . Il primo fattore computa le inefficienze intrinseche della rete di distribuzione e degli apparati di trasformazione, mentre il secondo funge da margine di riserva, garantendo la resilienza dell'impianto a fronte di futuri ampliamenti o riconfigurazioni degli spazi espositivi. Le relazioni analitiche utilizzate sono sintetizzate nelle seguenti espressioni:

$$C_c = \delta \cdot A$$

$$S_P = C_c \cdot C_e \cdot C_p$$

| POTENZA DI PROGETTO  |                             |                            |                               |                         |                           |
|----------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Area Guenete Leul    | Densità di potenza $\delta$ | Carico convenzionale $C_c$ | Coeff. di espandibilità $C_e$ | Coeff. di perdita $C_p$ | Potenza di progetto $S_P$ |
| 5.750 m <sup>2</sup> | 45 VA/m <sup>2</sup>        | <b>259 kVA</b>             | 1,10                          | 1,05                    | <b>299 kVA</b>            |

Tabella 4 - Calcolo del carico convenzionale e della potenza di progetto

## 4.2. Cabina di trasformazione e dimensionamento del trasformatore

Il progetto prevede l'impiego di una cabina elettrica di trasformazione monoblocco di tipo prefabbricato (Figura 12) posizionata nel cortile esterno sul retro dell'edificio (Tavola 06).



Figura 7 - Cabina elettrica di trasformazione in prefabbricato

La cabina integra al suo interno un locale adibito ai gruppi di misura (Meter Room), un locale che alloggia il quadro generale di media tensione MVSW

(Medium Voltage SWitchgear) e un vano dedicato al trasformatore e al quadro di scambio ATS. Infine, a supporto della resilienza energetica del sistema, accanto al prefabbricato sarà posizionato il gruppo elettrogeno, interfacciato al quadro di scambio mediante un cavo interrato posato entro apposite tubazioni corrugate.

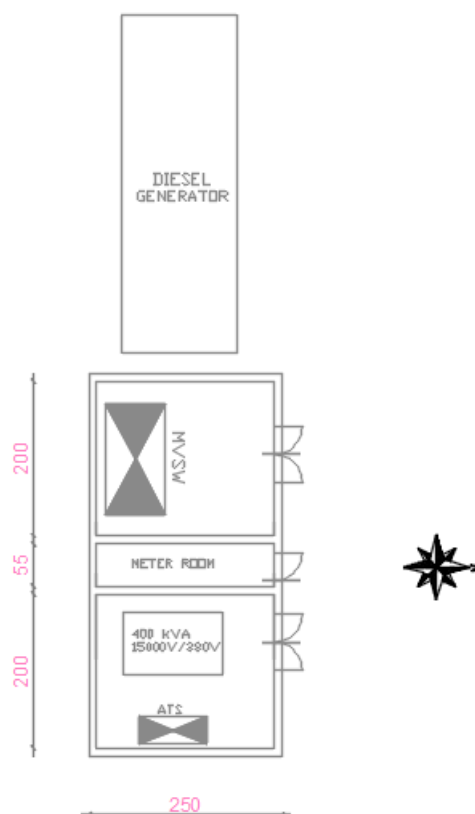


Figura 8 - Predisposizione interna della cabina in prefabbricato

#### 4.2.1. Quadro di commutazione

Per la gestione delle alimentazioni, si prevede l'installazione di un quadro di scambio equipaggiato con una centralina di commutazione automatica che gestisce l'apertura e la chiusura degli interruttori che sezionano le due linee, quella proveniente dal trasformatore e quella che collega il generatore. Questa soluzione tecnica assicura che l'inserimento del gruppo elettrogeno possa avvenire solo previa apertura e messa in sicurezza del sezionatore lato rete, eliminando il rischio che il generatore lavori in parallelo alla rete. La logica di interblocco è integrata nello schema funzionale della cabina, come illustrato in Figura 9. In particolare, in caso di interruzione o degrado della tensione di rete, il controllore elettronico, dopo aver verificato che l'anomalia persista oltre un tempo di ritardo impostato volto a filtrare

transitori o micro-interruzioni, invia il segnale di avviamento al gruppo elettrogeno. Una volta che l'alternatore ha raggiunto il regime nominale di tensione e frequenza, il sistema esegue in automatico la manovra di scambio, assicurando che i due interruttori non siano simultaneamente chiusi e garantendo la mutua esclusione delle sorgenti.

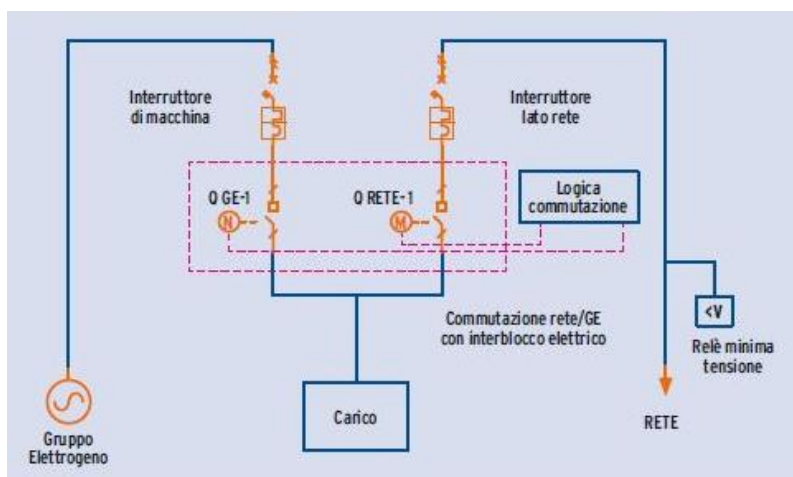


Figura 9 - Logica di commutazione trasformatore/gruppo elettrogeno

L'inserimento dei carichi avviene secondo una sequenza temporizzata e gerarchica, atta a mitigare gli effetti dei transitori di inserzione che potrebbero destabilizzare il gruppo elettrogeno in una zona dove la riserva di coppia motrice è già penalizzata dalla quota. Una volta ripristinata la stabilità della rete principale, il sistema ATS non esegue il rientro immediato, ma avvia un ciclo di monitoraggio della tensione di rete per assicurarne l'effettiva stabilità. Solo al termine di questa fase avviene la commutazione di ritorno verso il trasformatore, seguita da un periodo di funzionamento a vuoto del gruppo elettrogeno per permettere il raffreddamento graduale delle componenti termiche prima dello spegnimento definitivo, preservando così l'efficienza meccanica del sistema nel lungo periodo.

#### 4.2.2. Declassamento del trasformatore

La scelta dei componenti elettrici di potenza non può prescindere da un'analisi rigorosa delle condizioni ambientali del sito d'installazione, poiché variabili come l'altitudine influenzano direttamente la capacità di dissipazione termica e la tenuta dielettrica delle macchine. Nel caso specifico della città di Addis Abeba, situata a circa 2.355 metri sopra il livello del mare, le specifiche nominali dei trasformatori subiscono una variazione significativa rispetto alle condizioni standard definite dalla norma IEC 60076, che garantisce le prestazioni dichiarate solo fino a una quota di 1.000 metri. La rarefazione dell'aria tipica delle zone altipianiche riduce

l'efficienza dello scambio termico convettivo, limitando la capacità del trasformatore di smaltire il calore prodotto durante l'esercizio. Di conseguenza, l'applicazione di un coefficiente di declassamento termico dell'0,5% ogni 100 metri sopra i 1.000 metri risulta indispensabile per garantire il corretto dimensionamento della macchina. Essendo Addis Abeba situata a circa 2.400 metri sopra il livello del mare, si deve tenere conto di un derating complessivo pari al 7%.



*Figura 10 - Trasformatore MT/BT in resina*

Valutando l'adozione di un trasformatore da 315 kVA, emerge chiaramente l'insufficienza di tale taglia a soddisfare i requisiti di progetto una volta applicato il fattore di declassamento termico. Infatti, la potenza effettiva disponibile scenderebbe a 293 kVA, un valore inferiore alla potenza di progetto ipotizzata. Per ovviare a tale problematica e assicurare una riserva di potenza adeguata, si è optato per l'installazione di un trasformatore con taglia nominale di 400 kVA. Tale soluzione permette di disporre di una potenza complessiva declassata di circa 372 kVA, garantendo così un funzionamento ottimale della macchina anche nelle ore di massimo carico e preservando l'integrità del sistema elettrico nel lungo periodo.

| <b>TRASFORMATORE</b>                                 |       |
|------------------------------------------------------|-------|
| Potenza apparente nominale [kVA]                     | 400   |
| Potenza apparente declassata $A_T$ [kVA]             | 372   |
| Tensione avvolgimento primario [kV]                  | 15    |
| Tensione avvolgimento secondario [V]                 | 400   |
| Tensione di cortocircuito percentuale $V_{cc\%}$ [%] | 6     |
| Corrente nominale a secondario $I_{NBT}$ [A]         | 608   |
| Perdite a carico (T=75°C) [W]                        | 5.500 |
| Larghezza L [mm]                                     | 1.290 |
| Profondità P [mm]                                    | 960   |
| Altezza A [mm]                                       | 1.380 |

Tabella 5 - Dati di targa del trasformatore da 400 kVA selezionato

### 4.2.3. Vincoli per il dimensionamento del trasformatore

La scelta della taglia del trasformatore deve rispettare due vincoli. Il primo impone la necessità che la potenza nominale declassata del trasformatore  $A_T$  sia superiore alla potenza di progetto calcolata  $S_P$ .

$$A_T > S_P$$

Il secondo vincolo è legato al rendimento del trasformatore stesso. Infatti, lavorando con valori di potenza che rispettino tale disequazione, si riesce a raggiungere il rendimento massimo, minimizzando le perdite del trasformatore e contestualmente allungando la sua vita utile.

$$\frac{2}{3} A_T < C_C \cdot C_P < \frac{3}{4} A_T$$

Sostituendo, si ricava che:

$$372 \text{ kVA} > 299 \text{ kVA}$$

$$248 \text{ kVA} < 272 \text{ kVA} < 279 \text{ kVA}$$

Per il progetto di riqualificazione del Guenete Leul Palace, si è scelto di utilizzare trasformatori a secco, isolati in resina epossidica. Tale scelta risponde a una rigorosa valutazione delle criticità legate alla sicurezza antincendio e alle specifiche caratteristiche strutturali del sito di installazione. In un contesto progettuale dove la minimizzazione del rischio rappresenta un parametro discriminante, questa tecnologia si configura come la scelta elettiva, superando i limiti intrinseci delle macchine isolate in olio minerale. La riduzione del carico

d'incendio si ottiene dunque grazie all'eliminazione di liquidi infiammabili e all'impiego di materiali isolanti con spiccate proprietà autoestinguenti, come la resina epossidica. Oltre a garantire l'incolumità del personale e la protezione degli asset circostanti, l'impiego della resina evita i rischi ambientali legati a potenziali sversamenti, semplificando notevolmente le opere civili poiché non richiede la realizzazione di vasche di raccolta o sistemi di contenimento specifici. Tale soluzione risulta particolarmente coerente con l'utilizzo di cabine elettriche prefabbricate, dove l'ottimizzazione degli spazi e la necessità di una manutenzione ridotta rappresentano requisiti tecnici imprescindibili per la sostenibilità e la resilienza dell'intera infrastruttura elettrica.

#### 4.2.4. Il baricentro elettrico

L'individuazione del locale tecnico (Technical Room) all'interno del piano seminterrato risponde a una precisa strategia di ottimizzazione del baricentro elettrico dell'intero complesso. Tale principio, finalizzato alla collocazione della sorgente di energia e dei sistemi di protezione in posizione mediana rispetto ai carichi, è fondamentale per razionalizzare lo sviluppo delle condutture e minimizzare le cadute di tensione. Nonostante la cabina di trasformazione esterna occupi una posizione non perfettamente centrata a causa dei vincoli planimetrici del sito, la scelta del locale tecnico permette di bilanciare efficacemente la distribuzione interna dei circuiti di bassa tensione. Tale locale sarà adibito ad ospitare il quadro generale di bassa tensione MLVS (Main Low Voltage Switchgear), oltre che il quadro generale di fotovoltaico LPP-PV e l'armadio UPS, che contiene al suo interno sia il sistema di conversione che il pacco batteria.

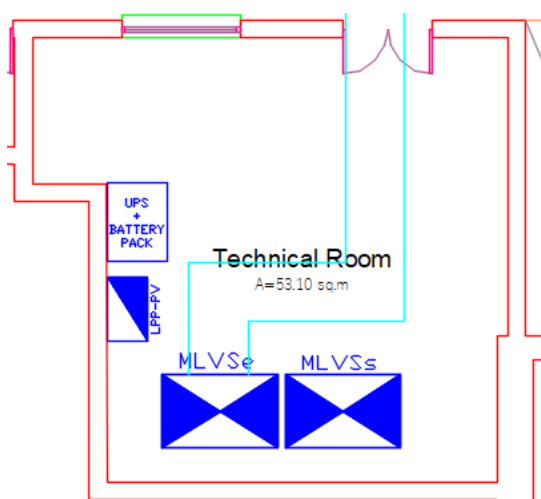


Figura 11 - Disposizione dei quadri nel locale tecnico del piano seminterrato

L'estensione contenuta dell'edificio mitiga le potenziali criticità derivanti da una dislocazione asimmetrica delle apparecchiature. Sebbene il collegamento tra la cabina di trasformazione e il quadro generale di bassa tensione richieda una tratta interrata lunga circa 20 metri, tale distanza non comporta un incremento significativo delle impedenze di linea. Di conseguenza, le cadute di tensione rimangono ampiamente entro i limiti di tolleranza normativa, garantendo la stabilità delle prestazioni elettriche e l'integrità dei profili di tensione ai capi delle utenze finali, anche in assenza di una perfetta coincidenza geometrica con il baricentro teorico del gruppo di alimentazione.

Inoltre, per portare l'alimentazione al piano terra e ai successivi, sono stati previsti due cavedi posizionati rispettivamente in prossimità del vano montacarichi e del vano ascensori. Tale ubicazione è stata determinata dall'analisi del baricentro elettrico, con l'obiettivo di ottimizzare i percorsi dei cavi, minimizzarne le lunghezze e contenere le cadute di tensione. Per il dettaglio della loro collocazione, si rimanda alle Tavole riportate in appendice.

### 4.3. Scelta del gruppo elettrogeno

Data la necessità di garantire standard elevati di sicurezza e conservazione, si è stabilito che la totalità dei carichi elettrici dell'edificio debba essere considerata privilegiata, pertanto, è stato scelto un gruppo elettrogeno con una potenza nominale significativa, pari a 380 kVA (Modello V 380 GX-Volvo Penta TAD1343GE).

Questa configurazione è stata ulteriormente avvalorata dall'analisi del contesto energetico di Addis Abeba, storicamente caratterizzato da frequenti interruzioni e fluttuazioni della rete elettrica locale. Tale scenario ha reso necessario un dimensionamento che consenta l'alimentazione autonoma dell'intero edificio tramite il solo gruppo elettrogeno, assicurando la piena operatività e la salvaguardia del patrimonio culturale anche a fronte di blackout prolungati. È necessario sottolineare che, anche nel caso peggiore (ovvero durante la presa di carico all'avviamento), il gruppo elettrogeno è in grado di far fronte a tutta la potenza dell'impianto elettrico. Infatti, considerando un sovradimensionamento del carico convenzionale del 50% dovuto al gradino iniziale, si ottiene:

$$P_{GRADINO} = 1,50 \cdot C_C = 388 \text{ kVA}$$

Tale valore, confrontato con i 410 kVA di potenza del generatore in condizioni d'emergenza, conferma il corretto dimensionamento della macchina.



Figura 12 - Gruppo elettrogeno da 380 kVA della Volvo

Sotto il profilo dell'efficienza energetica, il sistema evidenzia una curva di consumo ottimizzata, che spazia dagli 87 l/h a pieno carico ai 22,2 l/h in condizioni di carico parzializzato al 25%, assicurando un'autonomia operativa prolungata grazie al serbatoio integrato da 800 litri.

La gestione logica, affidata a una centralina elettronica di supervisione, interfaccia costantemente i parametri termofluidodinamici del motore con le grandezze elettriche di output, facilitando l'integrazione con il quadro di commutazione automatica e garantendo tempi di subentro minimi in caso di disalimentazione da rete. Infine, l'architettura fisica del gruppo, protetta da una cofanatura insonorizzata che limita la pressione sonora, ne permette l'installazione in contesti dove il vincolo acustico e la resistenza agli agenti atmosferici risultano determinanti, senza compromettere l'accessibilità per le operazioni di manutenzione ordinaria.

| <b>GRUPPO ELETTROGENO</b>  |                   |
|----------------------------|-------------------|
| Potenza continuativa [kVA] | 380               |
| Potenza in emergenza [kVA] | 410               |
| Tensione nominale [V]      | 400               |
| Frequenza [Hz]             | 50                |
| cos $\varphi$              | 0,8               |
| Dimensioni LxPxA [mm]      | 4.000x1.500x2.000 |
| Peso [kg]                  | 4.500             |
| Serbatoio [L]              | 800               |
| Cilindrata [L]             | 11,9              |

Tabella 6 - Dati di targa del gruppo elettrogeno scelto

## 4.4. Suddivisione dei carichi in base alla loro natura

La quantificazione analitica dei singoli carichi costituisce il presupposto fondamentale per il corretto dimensionamento dei quadri di distribuzione primaria e per la definizione delle specifiche del sistema di continuità statica (UPS). Quest'ultimo è deputato all'asservimento di tutte le utenze che, per loro natura, richiedono un'alimentazione continua e che possono tollerare micro-interruzioni di durata massima pari a 150 ms.

Il bilancio elettrico complessivo è stato redatto integrando i fabbisogni energetici di diverse categorie impiantistiche, tra cui i sistemi di elevazione, le infrastrutture informatiche (server e calcolatori), gli apparati di climatizzazione e trattamento aria (HVAC) e l'intero spettro degli impianti speciali. Tale analisi ha permesso di strutturare la gerarchia delle protezioni all'interno del quadro generale di bassa tensione, assicurando che la potenza erogata sia coerente con le esigenze operative.

### 4.4.1. Carico degli ascensori

La progettazione del sistema di ascensori è partita dall'analisi della superficie utile del vano, al fine di determinare la portata di progetto. Per i due ascensori di superfici 3,2 m<sup>2</sup>, la norma UNI EN 81-20 impone una portata nominale di circa 1.400 kg, tenendo conto che una tale superficie può ospitare un massimo di 18 persone con un peso medio di circa 75 kg.

Il dimensionamento della potenza meccanica necessaria al sollevamento è funzione della massa, della velocità lineare  $v$  e del coefficiente di bilanciamento del contrappeso  $c$ . Quest'ultimo, tipicamente fissato a 0,5, permette di ottimizzare il lavoro del motore riducendo lo sforzo alla condizione di squilibrio massimo, ovvero quando la cabina è vuota o a pieno carico. La potenza attiva nominale  $P_{EL}$  assorbita dal sistema può essere espressa come:

$$P_{EL} = \frac{M \cdot g \cdot v \cdot (1 - c)}{\eta_{TOT}}$$

Dove  $g$  rappresenta l'accelerazione di gravità (9,81 m/s<sup>2</sup>) e  $\eta_{TOT}$  l'efficienza complessiva del sistema (meccanica ed elettrica), che per i moderni azionamenti gearless a magneti permanenti si attesta attorno all'80%. Assumendo una velocità di regime  $v$  di 1,5 m/s, per i due ascensori da 3,2 m<sup>2</sup> adibiti al trasporto pubblico, il sistema richiede una potenza attiva alla rete di circa 13 kW. Per allinearsi alle taglie

già presenti sul mercato, la scelta è ricaduta su motori di potenza uniformata pari a 13,5 kW. Oltre alla componente attiva, la progettazione dell'infrastruttura elettrica del museo deve considerare la potenza apparente complessiva  $S$  (espressa in kVA) fondamentale per il dimensionamento delle linee di alimentazione e dei dispositivi di protezione. Il legame tra potenza attiva e apparente è mediato dal fattore di potenza  $\cos \varphi$  che negli impianti dotati di inverter VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) viene approssimato a 0,90. La relazione è definita da:

$$S = \frac{P_{EL}}{\cos \varphi}$$

La potenza apparente  $S$  per gli ascensori da 1.400 kg di portata è pari a circa 15 kVA.

Contestualmente, l'esigenza di movimentare manufatti artistici di grandi dimensioni ha richiesto l'integrazione di un montacarichi ad alta capacità, caratterizzato da una superficie utile di cabina pari a 8,4 m<sup>2</sup>. Tale specifica dimensionale ha determinato la scelta di una portata nominale di circa 4.000 kg, configurando l'elevatore come uno dei carichi motori più rilevanti del complesso. In questo caso, pur riducendo la velocità nominale a 0,6 m/s per limitare i carichi dinamici sulle strutture dell'edificio, la potenza attiva necessaria cresce sensibilmente, richiedendo un impegno di potenza attiva superiore ai 14 kW. La scelta è ricaduta pertanto su un motore da 15 kW che, tenendo in considerazione l'assorbimento di potenza reattiva, corrisponde ad una potenza apparente che sfiora i 17 kVA.

Infine, per valutare quanto gli ascensori/montacarichi gravino sul quadro generale di bassa tensione MLVSe, viene applicata la formula per calcolare la potenza apparente totale (diversa dalla semplice somma delle 3 singole potenze apparenti!). Dopodiché, si applica ancora il coefficiente di contemporaneità  $K_c$  del quadro generale, ottenendo così il valore complessivo di potenza apparente del gruppo ascensori "visto" dal MLVSe.

$$S_{TOT} = K_c \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N P_{ELi}^2 + \sum_{i=1}^N Q_{ELi}^2}$$

Nella tabella 7 vengono riportati i dati utilizzati nei vari passaggi ed i risultati ottenuti.

| <b>ELEVATORI</b>                      |              |             |            |
|---------------------------------------|--------------|-------------|------------|
|                                       | montacarichi | ascensore1  | ascensore2 |
| Area [m <sup>2</sup> ]                | 8,4          | 3,2         | 3,2        |
| Persone                               | 50           | 18          | 18         |
| Peso medio per persona[kg]            | 75           | 75          | 75         |
| Portata [kg]                          | 3.750        | 1.350       | 1.350      |
| Portata approssimata [kg]             | 4.000        | 1.400       | 1.400      |
| v [m/s]                               | 0,6          | 1,5         | 1,5        |
| Bilanciamento contrappeso c           | 0,5          | 0,5         | 0,5        |
| Rendimento                            | 80%          | 80%         | 80%        |
| cos φ                                 | 0,9          | 0,9         | 0,9        |
| K <sub>C</sub>                        | 1            | 1           | 1          |
| P <sub>EL</sub> [kW]                  | 14,7         | 12,9        | 12,9       |
| P <sub>MOT</sub> [kW]                 | 15           | 13,5        | 13,5       |
| Q <sub>EL</sub> [kW]                  | 7,3          | 6,5         | 6,5        |
| <b>S [kW]</b>                         | <b>16,7</b>  | <b>15</b>   | <b>15</b>  |
| Kc" (MLVSe)                           |              | 0,5         |            |
| <b>S" [kVA]</b>                       |              | <b>23,3</b> |            |
| δ <sub>ASC</sub> [VA/m <sup>2</sup> ] |              | 4,1         |            |

Tabella 7 - Riassunto dei calcoli delle potenze degli ascensori e del montacarichi

Si evince che la potenza complessiva assorbita dal gruppo ascensori che grava sul quadro generale di bassa tensione è pari a 23,3 kVA, in quanto si deve tener conto del coefficiente complessivo di contemporaneità Kc" di tale quadro, pari a 0,5. Di conseguenza, è logico che la potenza effettiva complessiva dei sistemi di elevazione sia in realtà doppia.

### Analisi dei transitori

Un parametro critico per la selettività delle protezioni e per la stabilità della rete elettrica museale è rappresentato dalla corrente di spunto I<sub>S</sub>. Sebbene la tecnologia VVVF consenta una rampa di accelerazione controllata, si verifica comunque un transitorio iniziale quantificabile attraverso un coefficiente di sovraccarico k:

$$I_S = k \cdot I_N = k \cdot \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi}$$

Per azionamenti di ultima generazione, k assume valori compresi tra 1,2 e 1,6, portando la corrente di picco per gli ascensori passeggeri a circa 30 A. Tale valore risulta sensibilmente inferiore rispetto ai sistemi idraulici a partenza diretta, dove k può raggiungere valori pari a 5. Pertanto, l'adozione di azionamenti elettrici gearless ad alta efficienza permette non solo il rispetto delle stringenti normative sull'accessibilità (UNI EN 81-70), ma garantisce una gestione energetica coerente con i moderni standard di sostenibilità per gli edifici pubblici, minimizzando l'impronta carbonica della logistica verticale dell'istituzione.

#### 4.4.2. Potenza dei sistemi speciali

L'architettura elettrica asservita agli impianti speciali è stata configurata secondo i più stringenti criteri di resilienza e continuità operativa, classificando tali utenze come carichi a priorità assoluta. La strategia di alimentazione si fonda sul concetto di potenza sicura, ovvero una rete elettrica costantemente presidiata da sistemi di accumulo e conversione statica, in grado di garantire la continuità del vettore energetico anche in presenza di anomalie o interruzioni della rete di distribuzione primaria.

Il fulcro di tale sistema risiede nella Control Room ubicata al piano terra, dove è posizionato il quadro UPP-GF5 dedicato interamente agli impianti speciali dell'edificio. Tale unità riceve l'energia direttamente dal sistema UPS, il quale funge da interfaccia energetica filtrando le perturbazioni di rete e assicurando un output stabilizzato in tensione e frequenza. La scelta di accentrare la protezione generale in un ambiente protetto e monitorato come la sala controllo risponde a precise esigenze di manutenibilità e sicurezza fisica dell'infrastruttura.

Dal quadro adibito ai sistemi speciali si dipana una dorsale distributiva che alimenta, con configurazione radiale, i singoli sottoquadri di piano dedicati a loro volta all'alimentazione dei sistemi speciali afferenti a quello specifico piano (CCTV, antintrusione, rivelazione fumi ed EVAC). Tale gerarchia distributiva, dal sistema UPS al quadro UPP-GF5 fino ai terminali di piano, assicura che ogni componente del sistema di sicurezza e gestione dati operi costantemente in regime di potenza sicura. Questa configurazione è essenziale per il rispetto dei tempi di intervento previsti dalle normative vigenti (UNI 9795 per i sistemi antincendio e EN 54-16 per l'evacuazione vocale), rendendo l'intera infrastruttura elettrica un

sistema coeso, affidabile e tecnicamente avanzato. I valori di potenza ricavati sono del tutto approssimativi, in quanto si tratta di un dimensionamento preliminare.

| <b>IMPIANTI SPECIALI</b>        |             |
|---------------------------------|-------------|
| CCTV [kVA]                      | 1,2         |
| Antintrusione [kVA]             | 1,5         |
| Antincendio [kVA]               | 2,5         |
| Illuminazione d'emergenza [kVA] | 1,5         |
| Impianto EVAC [kVA]             | 3,9         |
| Telefonia e dati [kVA]          | 1,5         |
| Server dati [kVA]               | 5,6         |
| <b>TOT [kVA]</b>                | <b>17,7</b> |

Tabella 8 - Potenze degli impianti speciali

### 4.4.3. Potenza dei calcolatori

La determinazione del fabbisogno energetico associato alle apparecchiature informatiche dell'edificio è stata condotta attraverso un'analisi analitica di tipo deterministico, basata sul censimento puntuale dei carichi previsti. Incrociando le destinazioni d'uso funzionali (uffici, laboratori e sale conferenze) con il layout delle postazioni di lavoro, è stata stimata l'installazione di 30 unità terminali.

Per il computo della potenza assorbita, si è assunto per ogni stazione un valore nominale prudenziale di 500 W (valore che comprende sia l'assorbimento della macchina che del monitor) e con un fattore di potenza pari a 0,9 che riflette le caratteristiche medie degli alimentatori switching moderni dotati di correzione attiva del fattore di potenza. Al fine di riflettere l'effettivo regime di esercizio del sistema e di evitare un sovradimensionamento della rete di distribuzione, sono stati applicati i coefficienti di riduzione tipici per le utenze d'ufficio: il coefficiente di utilizzazione  $K_u$  fissato a 0,8, e il coefficiente di contemporaneità  $K_c$  stimato in 0,7, tenendo conto della variabilità di utilizzo delle macchine. La potenza totale installata relativa ai calcolatori è stata ricavata applicando la seguente espressione:

$$S_{COMPUTER} = \frac{n \cdot P_{EL} \cdot K_u \cdot K_c}{\cos \varphi}$$

| COMPUTER |                |                |                |                  |       |                  |
|----------|----------------|----------------|----------------|------------------|-------|------------------|
| n        | P <sub>N</sub> | K <sub>U</sub> | K <sub>C</sub> | P <sub>TOT</sub> | cos φ | S <sub>TOT</sub> |
| 30       | 0,5 kW         | 0,8            | 0,7            | 8,4 kW           | 0,9   | 9,3 kVA          |

Tabella 9 - Potenza assorbita dai calcolatori

Si ricava così una potenza complessiva assorbita dai calcolatori e dai relativi monitor indicativamente pari a 9,3 kVA.

#### 4.4.4. Potenza delle unità trattamento aria e delle pompe di calore

L'architettura del sistema di climatizzazione è stata definita in stretta correlazione con le specificità climatiche del sito d'intervento. L'analisi bioclimatica preliminare, condotta dall'Arch. André Clos, ha evidenziato per la città di Addis Abeba un profilo climatico caratterizzato da condizioni di mitezza prevalente durante l'intero arco annuale. Tale specifica ha orientato le scelte progettuali verso una semplificazione del ciclo di trattamento dell'aria; si è pertanto determinato che l'adozione di sistemi di recupero termico sulle Unità di Trattamento Aria (UTA) non avrebbe comportato un beneficio energetico tale da giustificare l'incremento delle perdite di carico. Di conseguenza, le macchine selezionate per il trattamento dell'aria operano in configurazione "tutt'aria esterna", senza sezione di recupero.

Il soddisfacimento dei carichi termici e frigoriferi dell'edificio è affidato a un sistema idronico alimentato da generatori a pompa di calore reversibile, accoppiati a unità di trattamento aria dedicate alla gestione dei ricambi e del controllo igrometrico.

##### Unità di Generazione Termofrigorifera (PDC)

La centrale termofrigorifera è costituita da due pompe di calore aria-acqua reversibili condensate ad aria, di tipologia analoga alla serie i-NX-Q di Mitsubishi Electric. La scelta tecnologica è ricaduta su unità equipaggiate con compressori di tipo Scroll pilotati da Full Inverter, soluzione che garantisce un'elevata capacità di modulazione ai carichi parziali, massimizzando l'efficienza stagionale (SEER/SCOP) in un clima variabile come quello locale. Entrambe le unità richiedono un'alimentazione elettrica trifase 380V/3/50Hz.

Il sistema è dimensionato su due taglie di potenza distinte per garantire flessibilità operativa:

- PDC 1 (taglia maggiore): questa macchina, con un peso operativo di 1.050 kg e dimensioni pari a 2.625x1.350x2.070 mm, assorbe una potenza elettrica superiore a 75 kW;
- PDC 2 (taglia minore): unità secondaria, più compatta (2.000x1.350x2.070 mm per 800 kg di peso), assorbe una potenza elettrica poco superiore ai 40 kW, fornendo una potenza termica in uscita di 37 kW.



*Figura 13 - Pompa di calore (PDC)*

### **Unità di Trattamento Aria (UTA)**

La gestione dei flussi aeraulici e la qualità dell'aria interna sono demandate a due Unità di Trattamento Aria indipendenti. Coerentemente con le premesse climatiche, queste macchine sono configurate per il solo trattamento termico e la filtrazione dell'aria di rinnovo, prive di scambiatori di calore per il recupero energetico.

Le UTA sono caratterizzate da sezioni di filtrazione conformi alla normativa EN ISO 16890, prevedendo stadi di pre-filtrazione (ISO Coarse 60%) sull'aria esterna e di ripresa, e una filtrazione fine (ISO ePM1 70%) sul flusso di mandata verso gli ambienti.

Le specifiche prestazionali delle due unità sono le seguenti:

- UTA 1 (principale): progettata per una portata d'aria massima di 10.500 m<sup>3</sup>/h con una velocità di attraversamento in sezione di 2,6 m/s. La macchina, con una sezione frontale di 1590x1099 mm, è dotata di batterie di scambio termico ad acqua di notevole capacità: una batteria di pre-riscaldamento da 50 kW, una batteria fredda da 75 kW per la deumidificazione e il

raffrescamento, e una batteria di post-riscaldamento da 25 kW per il controllo della temperatura di immissione dopo il processo di deumidificazione;

- UTA 2 (secondaria): dimensionata per una portata di 4.500 m<sup>3</sup>/h (velocità 2,8 m/s e sezione 1044x894 mm), questa unità serve zone a minor carico o volumetria. Le sue batterie di trattamento sono proporzionalmente scalate, offrendo 25 kW in preriscaldamento, 40 kW in raffrescamento e 12 kW in post-riscaldamento.



*Figura 19 - Unità di Trattamento Aria (UTA)*

Definite le caratteristiche nominali delle macchine selezionate, è necessario precisare che i fabbisogni di potenza effettivamente richiesti dal progetto risultano sensibilmente inferiori ai dati di targa precedentemente esposti. Tale discrepanza è giustificata dall'indagine climatica condotta dall'Arch. André Clos, la quale ha evidenziato come il peculiare profilo meteorologico di Addis Abeba non renda mai necessario, in alcun periodo dell'anno, il ricorso alla funzione di recupero del calore.

Di conseguenza, la potenza elettrica impegnata da ciascuna unità è stata ricalcolata in funzione delle reali condizioni operative, permettendo un dimensionamento più efficiente e mirato dell'intera infrastruttura elettrica. Nella tabella seguente si riassumono i valori di potenza effettiva considerati per lo sviluppo del progetto preliminare del Guenete Leul Palace.

| UTA e PDC            |               |
|----------------------|---------------|
| NOME                 | POTENZA [kVA] |
| Pompa calore-1       | 75,6          |
| Pompa calore-2       | 41,1          |
| UTA-1                | 4,7           |
| UTA-2                | 32,4          |
| Pompa acqua potabile | 2,0           |
| pompa acqua grigia   | 1,2           |
| <b>TOT</b>           | <b>157,0</b>  |

Tabella 10 - Potenze effettive assorbite dalle pompe di calore e dalle UTA

Come in precedenza, è doveroso sottolineare che il valore di potenza ottenuto è quello effettivo. Tuttavia, applicando il coefficiente di contemporaneità  $K_c$  relativo al quadro generale di bassa tensione (da cui partono le linee di alimentazione a questi motori), si trova la potenza complessiva delle unità trattamento aria e delle pompe di calore dal punto di vista del MLVSe, che risulta pari alla metà rispetto al valore effettivo appena ottenuto.

#### 4.5. Dimensionamento del sistema di continuità statica (UPS)

Definito il quadro complessivo dei carichi suddivisi nelle varie tipologie, la progettazione si focalizza sul sottoinsieme delle utenze che devono essere alimentate con continuità assoluta, ovvero quei carichi critici la cui tolleranza alle interruzioni è confinata entro il limite rigoroso dei 150 ms. Questa categoria, che integra l'intera infrastruttura informatica, i centri di elaborazione dati e i sistemi speciali, costituisce il parametro di riferimento per il dimensionamento del sistema di continuità UPS (Uninterruptible Power Supply).

Al fine di massimizzare la resilienza operativa e semplificare la gestione manutentiva, si è optato per un'architettura centralizzata, concepita per l'asservimento coordinato di server, stazioni di lavoro e apparati di sicurezza. Tale configurazione assicura la fornitura di un vettore energetico costantemente stabilizzato e immune da transitori o micro-interruzioni; ciò risulta fondamentale per neutralizzare i rischi di degrado hardware o perdita di integrità dei database sensibili, fenomeni che si manifesterebbero inevitabilmente qualora venisse superata la soglia temporale di criticità precedentemente definita.

In funzione del bilancio elettrico analitico riportato nella Tabella 11, la taglia del convertitore statico è stata stabilita pari a 30 kVA, garantendo così un adeguato margine operativo rispetto alla somma dei carichi censiti.



Figura 14 - Armadio UPS da 30 kVA

Al fine di garantire il massimo grado di protezione, si prevede l'impiego di un gruppo di continuità in grado di assicurare il disaccoppiamento galvanico tra rete e carico e tempi di commutazione nulli. Viene inoltre previsto un ramo di bypass, che in condizioni di normale funzionamento rimane aperto. Tale configurazione permette l'alimentazione diretta dalla rete qualora si verifichi un guasto nel gruppo di conversione. La commutazione tra UPS e alimentazione diretta da rete è garantita in tempi inferiori ai 150 ms.

| <b>POTENZA SICURA</b>           |             |
|---------------------------------|-------------|
| CCTV [kVA]                      | 1,2         |
| Antintrusione [kVA]             | 1,5         |
| Antincendio [kVA]               | 2,5         |
| Illuminazione d'emergenza [kVA] | 1,5         |
| Impianto EVAC [kVA]             | 3,9         |
| Telefonia e dati [kVA]          | 1,5         |
| Server dati [kVA]               | 5,6         |
| Calcolatori [kVA]               | 9,3         |
| <b>TOT [kVA]</b>                | <b>27,0</b> |

Tabella 11 - Potenze assorbite dai carichi sicuri

Il pacco batterie deve essere dimensionato in modo tale da garantire un'autonomia di scarica non inferiore ai 60 minuti a pieno carico. Tale parametro deriva principalmente dalla stretta osservanza dei requisiti imposti dalla normativa CEI EN 50849 per i sistemi di diffusione sonora per scopi di emergenza (EVAC). Tale norma prescrive l'obbligo di assicurare il funzionamento ininterrotto dell'apparato di evacuazione vocale per almeno un'ora in caso di interruzione dell'alimentazione primaria. Nel contesto del Guenete Leul Palace, si è scelto di adottare una filosofia di sicurezza integrata, estendendo il requisito di continuità di 60 minuti non solo ai sistemi di emergenza, ma all'intero spettro dei carichi speciali e delle stazioni di lavoro. Questa strategia progettuale eleva lo standard di affidabilità complessivo dell'edificio, garantendo che, anche in scenari di blackout prolungato tipici del contesto locale, le operazioni critiche e la protezione del patrimonio culturale non subiscano alcuna compromissione.

## **4.6. Dimensionamento dei quadri primari**

Completata l'analisi dei carichi principali, si procede con la definizione delle potenze associate ai singoli quadri di funzione, operazione propedeutica alla corretta stima degli assorbimenti dei restanti quadri di zona. All'interno della gerarchia elettrica del palazzo, i primi sono configurati per l'asservimento di utenze con carichi specifici e predefiniti, quali i sistemi di elevazione, le unità di trattamento aria (UTA), le pompe di calore e i sistemi speciali. Al contrario, la distribuzione energetica verso aree funzionali eterogenee (corridoi, uffici, servizi e le sale espositive) viene affidata ai quadri di zona.

### **4.6.1. Quadri di funzione**

Nell'impianto elettrico ideato e progettato per il Guenete Leul Palace, sono stati posizionati nove quadri di funzione, così suddivisi: un quadro per ciascun ascensore, un quadro per il montacarichi, un quadro adibito alla sola alimentazione dei sistemi speciali posizionato nella Control Room, un quadro per ciascuna pompa di calore e ciascuna UTA e un quadro che alimenta delle pompe dell'acqua del Basement Floor.

| QUADRI DI FUNZIONE |                  |               |
|--------------------|------------------|---------------|
| NOME               | FUNZIONE         | POTENZA [kVA] |
| LPP-RP1            | montacarichi     | 14,5          |
| LPP-RP2            | ascensore1       | 10,9          |
| LPP-RP3            | ascensore2       | 10,9          |
| UPP-GF5            | sistemi speciali | 6,7           |
| LPP-BF6            | UTA-1            | 4,67          |
| LPP-2F4            | UTA-2            | 32,4          |
| LPP-BF7            | PDC-1            | 75,6          |
| LPP-2F5            | PDC-2            | 41,1          |
| LPP-BF5            | acqua potabile   | 2,0           |

Tabella 12 - Quadri di funzione

## 4.6.2. Quadri di zona

I quadri di zona sono adibiti ad alimentare porzioni di superficie con un raggio non superiore a 30 metri e sono alimentati, a seconda della zona di competenza, da alimentazione d'emergenza e/o sicura. La potenza privilegiata per ciascun quadro viene calcolata secondo la seguente equazione:

$$S_{ZONA} = \frac{C_c - S_{montacarichi} - S_{asc1} - S_{asc2} - S_{UPS} - S_{UTA+PDC}}{K_C'' \cdot N_{ZONA}}$$

Dove:

- $S_{ZONA}$  [kVA] è la potenza privilegiata di ogni quadro di zona che si vuole calcolare;
- $C_c$  [kVA] è il carico convenzionale dell'edificio, pari a 259 kVA;
- $K_C''$  è il coefficiente di contemporaneità del quadro generale di bassa tensione;
- $S_{montacarichi}$  [kVA] è la potenza del montacarichi, pari a 16,7 kVA;
- $S_{asc1}$  e  $S_{asc2}$  [kVA] sono le potenze dei due ascensori, entrambe pari a 15,0 kVA;
- $S_{UPS}$  [kVA] è la taglia dell'UPS, ossia 30 kVA;
- $S_{UTA+PDC}$  [kVA] è la potenza complessiva delle unità trattamento aria e delle pompe di calore, la cui somma vale 157 kVA;
- $N_{ZONA}$  è il numero di quadri di zona ipotizzati (in base alle planimetrie) per il presente progetto.

Come già sottolineato in precedenza, si è considerato un numero di circuiti in partenza dal quadro generale di bassa tensione superiore a 10, che corrisponde ad un coefficiente di contemporaneità  $K_C'' = 0,5$  a livello del MLVSe. Il numero dei quadri di zona è stato stimato ipotizzando quattro quadri per i primi tre livelli (piano seminterrato, piano terra e primo piano) e tre quadri di zona per il second floor, per un totale di 15 quadri zonal. Tale scelta rispetta ampiamente il vincolo della distanza massima di 30m tra il quadro e l'utenza finale. Per consultare le diverse zone elettriche (stabilite in via del tutto preliminare), si faccia riferimento alle Tavole in appendice. Nella tabella 14 vengono riportati i valori utilizzati per i calcoli dei quadri di zona.

| <b>POTENZA DI ZONA DEI QUADRI PRIMARI</b>             |             |
|-------------------------------------------------------|-------------|
| carico convenzionale [kVA]                            | 259         |
| montacarichi [kVA]                                    | 8,3         |
| ascensore 1 [kVA]                                     | 7,5         |
| ascensore 2 [kVA]                                     | 7,5         |
| UTA + PDC [kVA]                                       | 78,5        |
| UPS                                                   | 30          |
| TOT al netto dei quadri di funzione                   | 126,9       |
| Kc" (MLVSe)                                           | 0,5         |
| numero totale di quadri di zona                       | 15          |
| <b>POTENZA PRIVILEGIATA DI CIASCUN QUADRO DI ZONA</b> |             |
|                                                       | <b>16,9</b> |

Tabella 13 - Calcolo della potenza privilegiata di ciascun quadro di zona

Nel caso in cui un quadro di zona sia alimentato anche dalla potenza sicura, il valore di tale potenza, per ciascun quadro, si calcola secondo la seguente equazione.

$$S_{ZONA\ sicura} = \frac{S_{UPS} - S_{control\ room}}{N_{ZONA\ sicura}}$$

Dove:

- $S_{ZONA\ sicura}$  [kVA] è la potenza sicura con cui si alimenta ciascun quadro di zona che da progetto si prevede debba essere alimentato anche dal livello maggiore di continuità di potenza;
- $S_{UPS}$  [kVA] è la potenza del sistema di continuità UPS selezionato (30 kVA);
- $S_{control\ room}$  è il valore di potenza sicura che alimenta gli impianti speciali dell'edificio, pari a 17,7 kVA;

- $N_{ZONA\ sicura}$  [kVA] è il numero di quadri di zona che da progetto si prevede debba essere alimentato anche dal livello maggiore di continuità di potenza.

Dal valore della taglia dell'UPS si scorporano le potenze degli impianti speciali poiché, da progetto, si è ipotizzata un'alimentazione dedicata (UPP-GF5).

Il numero di quadri di zona che da progetto si prevede debba essere alimentato anche dal livello maggiore di continuità di potenza è stato stimato ipotizzando un quadro per piano, per un totale di quattro quadri. Tale scelta è giustificata dalle destinazioni d'uso dei locali, tratte dalle relative planimetrie. Ne consegue che, qualora un quadro di zona alimenti un'area in cui sono presenti uffici o, in generale, apparecchiature elettroniche che richiedono il livello più alto di continuità, la carpenteria del quadro avrà anche uno scompartimento dedicato alla potenza sicura. In questo caso, a differenza della potenza d'emergenza, non si tiene conto del coefficiente di contemporaneità del quadro generale di bassa tensione relativo alle linee di potenza sicura (MLVSs), in quanto, in base alla natura di tali carichi, si prevede cautelativamente che essi siano sempre in funzione.

| <b>POTENZA SICURA</b>                                |            |
|------------------------------------------------------|------------|
| UPS [kVA]                                            | 30         |
| Sistemi speciali [kVA]                               | 17,7       |
| n. quadri di zona alimentati anche da potenza sicura | 4          |
| <b>POTENZA SICURA DI CIASCUN QUADRO (kVA)</b>        | <b>2,9</b> |

Tabella 14 - Calcolo della potenza sicura di ciascun quadro di zona che la riceve

Si ricava che ciascun quadro di zona che è alimentato anche dalla continuità assoluta, riceve una potenza indicativamente pari a 3 kW.

## 4.7. Dimensionamento dei cavi

La progettazione delle dorsali e delle linee di distribuzione interna riflette la complessità tecnica e i vincoli di sicurezza imposti dalla destinazione museale dell'edificio. Data l'affluenza di pubblico prevista, l'intera infrastruttura elettrica è realizzata mediante l'impiego di conduttori con elevate prestazioni di reazione al fuoco, caratterizzati da isolanti a bassa emissione di fumi e gas corrosivi (Low Smoke Zero Halogen), in piena conformità con il Regolamento Prodotti da Costruzione.

Per quanto concerne le linee che interconnettono le sorgenti principali (trasformatore e gruppo elettrogeno) al sistema di commutazione ATS e il tratto successivo che collega quest'ultimo al quadro generale di bassa tensione MLVSe, si è optato per l'utilizzo di conduttori unipolari in parallelo, a causa della significativa corrente che devono portare. Tali collegamenti sono realizzati seguendo il metodo di posa interrata entro condotti o tunnel (classificata come posa 61 secondo la norma CEI-UNEL 35026), garantendo così un'adeguata protezione meccanica e una separazione fisica dai percorsi pedonali.



Figura 21 - Cavi interrati (posa 61)

Per le linee della distribuzione primaria che alimentano i quadri di zona e di funzione, la configurazione dei circuiti prevede l'impiego di cavi multipolari trifase con isolamento in EPR. Il dimensionamento di tali conduttori deve rispondere a due stringenti criteri di verifica che garantiscono la stabilità del sistema sotto carico:

- 1) la portata termica  $I_z$  dei cavi deve risultare maggiore rispetto alla corrente di impiego  $I_b$  per prevenire il superamento dei limiti di temperatura ammissibili per l'isolante, evitando fenomeni di invecchiamento accelerato o rischi di innesco;

$$I_b < I_z$$

- 2) la caduta di tensione tra il quadro generale e i quadri di zona e funzione non deve superare il limite cautelativo dell'1,5%. Questa soglia, più restrittiva rispetto ai minimi normativi standard, assicura che anche le apparecchiature più sensibili poste ai terminali dei circuiti ricevano un'alimentazione conforme alle specifiche di funzionamento ottimali. L'intero coordinamento delle protezioni e la scelta delle sezioni sono stati verificati in conformità alla norma CEI-UNEL 35026, che disciplina i parametri tecnici per i cavi isolati in materiale elastomerico

o termoplastico operanti a tensioni nominali di 1.000 V in corrente alternata.

Una volta determinata la corrente d'impiego  $I_b$  per ciascuna linea (calcolata in funzione della potenza nominale del quadro), si procede alla selezione di una conduttura avente caratteristiche tecnico-costruttive idonee all'applicazione specifica.

$$I_b = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_N}$$

Il processo di dimensionamento del cavo parte dall'individuazione della sua portata tabellare  $I_0$ , ovvero la corrente massima ammissibile in regime permanente riferita a condizioni ambientali convenzionali: 30°C per la posa in aria e 20°C per la posa interrata, come impostato nei parametri di progetto. Per rendere tale valore coerente con le reali condizioni d'installazione del complesso di Addis Abeba, la portata  $I_0$  deve essere opportunamente corretta attraverso l'applicazione di coefficienti di correzione K. Tali fattori tengono conto della temperatura ambiente effettiva, della modalità di posa specifica e dell'eventuale vicinanza con altri circuiti che potrebbero influenzare lo scambio termico della conduttura.

#### **4.7.1. Cavo in aria libera, distanziato dalla parete/soffitto o su passerella (posa 13 CEI-UNEL 35026)**

Si descrivono i coefficienti e le formule inerenti alla posa “Cavo in aria libera, distanziato dalla parete/soffitto o su passerella (13) CEI-UNEL 35026”:

- $K_1$  è il fattore di correzione da applicare se la temperatura ambiente è diversa da 30°C; è maggiore di 1 se la temperatura è inferiore a 30°C, minore di 1 se la temperatura è maggiore di 30°C;
- $K_2$  è il fattore di correzione riduttivo da applicare per più circuiti installati in fascio o in strato. In queste situazioni, infatti, la dissipazione del calore è meno efficace e quindi la portata reale del cavo deve essere ridotta;

Nel caso dell'edificio in esame, ipotizzando una temperatura ambiente di 25°C, avremo un coefficiente di valore  $K_1 = 1,04$ . Per quanto riguarda il coefficiente  $K_2$ , a causa dei molteplici circuiti presenti nei cavedi, sarà valutato caso per caso. Il tipo di isolamento ipotizzato per i cavi posati su passerella è in EPR. I coefficienti sopra

utilizzati sono attualmente indicativi e potranno essere ridefiniti in una futura fase di progetto. Di seguito viene riportata la formula per il calcolo della portata finale del cavo in condizione di posa (13):

$$I_Z = I_0 \cdot K_1 \cdot K_2$$

Le canaline destinate a contenere i cavi dovranno essere dimensionate in modo da garantire un fattore di riempimento minore del 50% al fine di garantire lo scambio termico dei cavi, successive manutenzioni ed un eventuale espansione dell'impianto.



Figura 22 - Passerella traforata

#### 4.7.2. Cavi in tubi interrati (posa 61 CEI-UNEL 35026)

Nel caso di posa dei cavi in tubi interrati (posa 61 CEI-UNEL 35026), oltre ai coefficienti moltiplicativi appena illustrati, si aggiungono anche  $K_3$  e  $K_4$ .

- $K_3$  è il fattore di correzione dovuto alla profondità di interramento. All'aumentare della profondità aumenta la massa di terreno intorno al cavo, peggiorando la dissipazione termica e causando la riduzione della portata del cavo;
- $K_4$  è il fattore di correzione dovuto alla resistività termica del terreno. All'aumentare della resistenza termica del terreno si riduce la portata del cavo;

Si ipotizza, in via del tutto preliminare, una temperatura del terreno di circa 25°C, che corrisponde ad un coefficiente  $K_1 = 0,96$ . Per quanto riguarda la vicinanza dei conduttori interrati, che è stata ipotizzata di tipo adiacente, è stato scelto un coefficiente di valore  $K_2 = 0,75$ . La profondità di posa è stata ipotizzata

ad un valore di 1 m, per cui il coefficiente di correzione risulta essere  $K_3 = 0,98$ . In assenza di dati certi riguardanti la resistività termica del terreno, è stato ipotizzato il valore di riferimento normativo di 1,5 K m/W, il cui coefficiente di correzione corrispondente risulta essere  $K_4 = 1$ . Il tipo di isolamento ipotizzato per i cavi interrati è in XLPE.

| <b>K<sub>2</sub> PER CAVI MULTIPOLARI INTERRATI</b> |                                 |      |      |      |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------|------|------|------|
| Numero di cavi                                      | Distanza tra tubi adiacenti [m] |      |      |      |
|                                                     | a<br>contatto                   | 0,25 | 0,5  | 1    |
| 2                                                   | 0,85                            | 0,90 | 0,95 | 0,95 |
| 3                                                   | 0,75                            | 0,85 | 0,90 | 0,95 |
| 4                                                   | 0,70                            | 0,80 | 0,85 | 0,90 |
| 5                                                   | 0,65                            | 0,80 | 0,85 | 0,90 |
| 6                                                   | 0,60                            | 0,80 | 0,80 | 0,90 |

| <b>K<sub>2</sub> PER CAVI UNIPOLARI INTERRATI</b> |                                 |      |      |      |
|---------------------------------------------------|---------------------------------|------|------|------|
| Numero di cavi                                    | Distanza tra tubi adiacenti [m] |      |      |      |
|                                                   | a<br>contatto                   | 0,25 | 0,5  | 1    |
| 2                                                 | 0,80                            | 0,90 | 0,90 | 0,95 |
| 3                                                 | 0,70                            | 0,80 | 0,85 | 0,90 |
| 4                                                 | 0,65                            | 0,75 | 0,80 | 0,90 |
| 5                                                 | 0,60                            | 0,70 | 0,80 | 0,90 |
| 6                                                 | 0,60                            | 0,70 | 0,80 | 0,90 |

Tabella 15 - Valori di  $K_2$  in base al tipo di posa

| <b>FATTORE DI CORREZIONE <math>K_3</math> (CEI-UNEL 35026)</b> |      |     |      |      |      |
|----------------------------------------------------------------|------|-----|------|------|------|
| Profondità di posa [m]                                         | 0,5  | 0,8 | 1    | 1,2  | 1,50 |
| $K_3$                                                          | 1,02 | 1   | 0,98 | 0,96 | 0,94 |

Tabella 16 - Valori di  $K_3$  a seconda della profondità di posa

Dopo aver eseguito i procedimenti descritti, per entrambe le tipologie di pose è stata calcolata la caduta di tensione di ogni linea. Per evitare l'insorgere di problemi legati alla degradazione del materiale isolante nel corso del tempo, si verifica che ogni linea abbia un valore di caduta di tensione inferiore all'1,5%, valore del tutto cautelativo. La norma prescrive un limite massimo del 4%, considerando l'intero percorso distributivo che va dal secondario del trasformatore all'utenza finale. La formula utilizzata per tale calcolo è la seguente.

$$\Delta V_{\%} = \sqrt{3} \cdot L \cdot \frac{r \cdot \cos\varphi + x \cdot \sin\varphi}{V} \cdot I_b \cdot 100$$

Dove:

- L [m] è la lunghezza della linea;
- r [ $\Omega$ /km] è la resistenza per unità di lunghezza della linea;
- x [ $\Omega$ /km] è la reattanza per unità di lunghezza della linea;
- $\varphi$  [°] è l'angolo di sfasamento tra i fasori di tensione e corrente;
- V [V] è la tensione concatenata di linea;
- $I_b$  [A] è la corrente di impiego.

Qualora il calcolo evidenzi uno scostamento superiore alla soglia stabilita, si procede ad un incremento della sezione nominale del conduttore. Tale operazione comporta contestualmente un aumento della portata tabellare  $I_0$  ed è finalizzata primariamente alla riduzione dell'impedenza della linea e, di conseguenza, al contenimento della caduta di tensione entro i parametri ammissibili. I parametri longitudinali necessari al calcolo (specificamente i valori di resistenza  $r$  e reattanza  $x$  per unità di lunghezza) sono stati tratti dalle tabelle della norma CEI UNEL 35023-70.

### 4.7.3. Criteri di dimensionamento

In coerenza con la strategia distributiva già delineata, l'architettura delle dorsali di potenza prevede, nei tratti a elevata densità di corrente, l'impiego di più conduttori in parallelo per ciascuna fase. Nello specifico, questa tipologia di connessione è stata implementata per le linee che interconnettono le sorgenti primarie (il trasformatore di rete e il gruppo elettrogeno) al quadro di scambio, nonché per la dorsale principale che collega quest'ultimo al quadro generale di bassa tensione MLVSe. Nello specifico, l'adozione di quattro conduttori da 120 mm<sup>2</sup> in parallelo per ciascun tratto garantisce la necessaria resilienza nel trasferimento della potenza totale del complesso, assicurando al contempo una gestione termica efficiente dei cavi.

La decisione di frazionare la sezione totale su più conduttori deriva in prima istanza dalle condizioni di posa interrata previste per queste tratte, dove la limitata dissipazione termica del terreno impone un declassamento della portata efficace. In questo contesto, l'utilizzo di cavi in parallelo di sezione inferiore permette di conciliare le elevate correnti d'impiego dell'edificio con la necessità di mantenere raggi di curvatura contenuti, garantendo una manovrabilità dei cavi che risulterebbe

impossibile con conduttori singoli di sezione equivalente. Tale configurazione, tuttavia, non risponde unicamente a esigenze di cantierizzazione, ma impone il rispetto di rigorosi vincoli tecnici volti a garantire la ripartizione equa della corrente tra i vari rami ed evitare pericolosi fenomeni di surriscaldamento localizzato. Per assicurare che l'impedenza di ogni percorso sia identica, è condizione imprescindibile che i conduttori appartenenti alla medesima fase presentino la stessa lunghezza millimetrica, la stessa sezione trasversale e la medesima tipologia di materiale e isolamento. Un'eventuale asimmetria nelle lunghezze, anche di lieve entità, altererebbe infatti la resistenza ohmica dei rami, portando il cavo con impedenza minore a farsi carico di una quota di corrente superiore alla propria portata nominale, accelerando il degrado termico dell'intero fascio.

Parallelamente ai vincoli geometrici e materici, la corretta esecuzione del parallelo richiede una particolare attenzione alla disposizione spaziale dei conduttori all'interno delle condutture interrato. Al fine di bilanciare le reattanze induttive e minimizzare gli effetti dei campi elettromagnetici, che potrebbero causare una distribuzione non uniforme della densità di corrente (effetto pelle e di prossimità), i cavi devono essere posati seguendo configurazioni simmetriche. Questa accuratezza nella posa, unita all'impiego di sistemi di terminazione certificati, permette di sfruttare appieno i vantaggi della suddivisione della potenza, garantendo che il sistema operi in perfetto equilibrio elettrodinamico. Tale approccio assicura che la portata complessiva della conduttura non solo superi i requisiti di progetto, ma mantenga nel tempo standard di affidabilità e sicurezza coerenti con le severe necessità operative di una struttura museale.

Per quanto concerne invece le linee di potenza privilegiata che collegano il quadro generale di bassa tensione MLVSe ai vari quadri di zona appartenenti alla distribuzione primaria, si è deciso di uniformare il dimensionamento al caso peggiore, ovvero quello con la dorsale più lunga (LPP-2F1) e quindi con una caduta di tensione maggiore. Per rispettare i vincoli imposti dalla portata del cavo e dal limite di caduta di tensione, si è scelto un cavo multipolare da 10 mm<sup>2</sup>.

Lo stesso procedimento è stato utilizzato per le linee di potenza sicura che collegano lo scompartimento di potenza sicura del quadro generale MLVSS e i vari quadri di zona che prevedono anche l'alimentazione sicura. Anche in questo caso si è scelto di uniformare il dimensionamento prendendo come riferimento il caso peggiore, ovvero la dorsale più lunga (al quadro UPP-2F3) e quindi con una caduta di tensione maggiore. Per rispettare i vincoli imposti dalla portata del cavo e dal limite di caduta di tensione, si è scelto un cavo multipolare da 6 mm<sup>2</sup>.

Modellazione e dimensionamento dell'impianto elettrico

| DA    | A     | N°Fasi | S [kVA] | I <sub>b</sub> [A] | Lunghezza [m] | Isolante | Sez. [mm <sup>2</sup> ] | I <sub>0</sub> [A] | K <sub>1</sub> | K <sub>2</sub> | K <sub>3</sub> | K <sub>4</sub> | I <sub>Z</sub> [A] | r [Ω/km] | x [Ω/km] | ΔV [%]      |
|-------|-------|--------|---------|--------------------|---------------|----------|-------------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|----------|----------|-------------|
| Trafo | ATS   | 3      | 400     | 608                | 5             | XLPE     | 4x120                   | 4x251=1004         | 0,96           | 0,70           | 0,98           | 1              | <b>661</b>         | 0,188/4  | 0,0939/4 | <b>0,07</b> |
| GE    | ATS   | 3      | 380     | 577                | 10            | XLPE     | 4x120                   | 4x251=1004         | 0,96           | 0,70           | 0,98           | 1              | <b>661</b>         | 0,188/4  | 0,0939/4 | <b>0,14</b> |
| ATS   | MLVSe | 3      | 400     | 608                | 20            | XLPE     | 4x120                   | 4x251=1004         | 0,96           | 0,70           | 0,98           | 1              | <b>661</b>         | 0,188/4  | 0,0939/4 | <b>0,29</b> |

Tabella 17 - Dimensionamento dei conduttori prima del quadro generale di bassa tensione

| DA    | A       | N°Fasi | S [kVA] | I <sub>b</sub> [A] | Lunghezza [m] | Isolante | Sez. [mm <sup>2</sup> ] | I <sub>0</sub> [A] | K <sub>1</sub> | K <sub>2</sub> | I <sub>Z</sub> [A] | r [Ω/km] | x [Ω/km] | ΔV (%)      |
|-------|---------|--------|---------|--------------------|---------------|----------|-------------------------|--------------------|----------------|----------------|--------------------|----------|----------|-------------|
| MLVSe | LPP-2F1 | 3      | 14,4    | 21,9               | 52            | EPR      | 10                      | 75                 | 1,04           | 0,72           | <b>56,2</b>        | 2,27     | 0,0861   | <b>1,08</b> |

Tabella 18 - Dimensionamento uniforme dei cavi tra quadro generale e quadri di zona prendendo come riferimento il quadro più lontano

| DA    | A       | N°Fasi | S [kVA] | I <sub>b</sub> [A] | Lunghezza [m] | Isolante | Sez. [mm <sup>2</sup> ] | I <sub>0</sub> [A] | K <sub>1</sub> | K <sub>2</sub> | I <sub>Z</sub> [A] | r [Ω/km] | x [Ω/km] | ΔV (%)      |
|-------|---------|--------|---------|--------------------|---------------|----------|-------------------------|--------------------|----------------|----------------|--------------------|----------|----------|-------------|
| MLVSe | UPS     | 3      | 25,0    | 38,0               | 8             | EPR      | 6                       | 54                 | 1,04           | 0,73           | <b>41,0</b>        | 3,78     | 0,0955   | <b>0,48</b> |
| UPS   | MLVSs   | 3      | 25,0    | 38,0               | 6             | EPR      | 6                       | 54                 | 1,04           | 0,73           | <b>41,0</b>        | 3,78     | 0,0955   | <b>0,36</b> |
| MLVSs | UPP-GF5 | 3      | 6,7     | 10,2               | 55            | EPR      | 6                       | 54                 | 1,04           | 0,73           | <b>41,0</b>        | 3,78     | 0,0955   | <b>0,88</b> |
| MLVSs | UPP-1F3 | 3      | 3,7     | 5,7                | 53            | EPR      | 6                       | 54                 | 1,04           | 0,73           | <b>41,0</b>        | 3,78     | 0,0955   | <b>0,47</b> |

Tabella 19 - Dimensionamento della parte sicura dell'impianto

*Modellazione e dimensionamento dell'impianto elettrico*

| DA    | A       | N°Fasi | S [kVA] | I <sub>b</sub> [A] | Lunghezza [m] | Isolante | Sez. [mm <sup>2</sup> ] | I <sub>0</sub> [A] | K <sub>1</sub> | K <sub>2</sub> | I <sub>z</sub> [A] | r [Ω/km] | x [Ω/km] | ΔV (%)      |
|-------|---------|--------|---------|--------------------|---------------|----------|-------------------------|--------------------|----------------|----------------|--------------------|----------|----------|-------------|
| MLVSe | LPP-BF5 | 1      | 3,2     | 14,6               | 40            | EPR      | 10                      | 86                 | 1,04           | 0,72           | <b>64,4</b>        | 2,24     | 0,119    | <b>1,10</b> |
| MLVSe | LPP-BF6 | 3      | 41,1    | 62,5               | 30            | EPR      | 16                      | 192                | 1,04           | 0,72           | <b>143,8</b>       | 1,43     | 0,0817   | <b>1,13</b> |
| MLVSe | LPP-BF7 | 3      | 32,4    | 49,3               | 15            | EPR      | 10                      | 100                | 1,04           | 0,72           | <b>74,9</b>        | 2,27     | 0,0861   | <b>0,70</b> |
| MLVSe | LPP-2F4 | 3      | 4,7     | 7,1                | 70            | EPR      | 6                       | 54                 | 1,04           | 0,72           | <b>40,4</b>        | 3,78     | 0,0955   | <b>0,78</b> |
| MLVSe | LPP-2F5 | 3      | 75,6    | 114,8              | 70            | EPR      | 70                      | 246                | 1,04           | 0,72           | <b>184,2</b>       | 0,334    | 0,0751   | <b>1,22</b> |
| MLVSe | LPP-RP1 | 3      | 14,5    | 30,9               | 40            | EPR      | 10                      | 75                 | 1,04           | 0,72           | <b>56,2</b>        | 2,27     | 0,0861   | <b>1,17</b> |
| MLVSe | LPP-RP2 | 3      | 10,9    | 23,2               | 45            | EPR      | 10                      | 75                 | 1,04           | 0,72           | <b>56,2</b>        | 2,27     | 0,0861   | <b>0,99</b> |
| MLVSe | LPP-RP3 | 3      | 10,9    | 23,2               | 45            | EPR      | 10                      | 75                 | 1,04           | 0,72           | <b>56,2</b>        | 2,27     | 0,0861   | <b>0,99</b> |

*Tabella 20 - Dimensionamento dei cavi che alimentano i quadri di funzione (escluso il quadro UPP-GF5)*

Infine, per quanto concerne i restanti quadri di funzione riportati nella Tabella 20, ogni linea è stata dimensionata in base alle specifiche potenze, logicamente molto diverse fra loro in base alla destinazione d'uso.

#### 4.7.4. Conduttori di Neutro e di Protezione (sistema TN-S)

In linea con le specifiche esigenze di un polo museale d'eccellenza, per il Guenete Leul Palace si è optato per l'adozione di un sistema di distribuzione di tipo TN-S, caratterizzato dalla separazione fisica tra il conduttore di neutro e quello di protezione. Tale scelta risulta fondamentale per garantire elevati standard di compatibilità elettromagnetica, necessari per la corretta operatività di sistemi di sicurezza IP, apparati audiovisivi e server di gestione. L'assenza di correnti di neutro circolanti sul conduttore di protezione (PE) permette infatti di prevenire interferenze sui segnali dati, fenomeni di corrosione elettrolitica delle strutture antiche e potenziali interventi intempestivi dei dispositivi differenziali.

Per quanto concerne il dimensionamento tecnico delle condutture, la determinazione delle sezioni per i conduttori di neutro e di terra (PE) è stata effettuata in funzione della sezione dei conduttori di fase  $S_f$  di ciascuna linea. Seguendo i criteri di coordinamento illustrati nella Tabella 22 derivata dalla norma tecnica, per sezioni di fase inferiori o uguali a  $16 \text{ mm}^2$  si mantiene l'uguaglianza tra tutti i conduttori del circuito considerato. Per sezioni comprese tra  $16 \text{ mm}^2$  e  $35 \text{ mm}^2$ , i conduttori di neutro e PE assumono una sezione fissa pari a  $16 \text{ mm}^2$ , mentre per valori di  $S_f$  superiori a  $35 \text{ mm}^2$  i conduttori di neutro e protezione devono avere una sezione che sia almeno maggiore della metà della sezione di fase.

| Sezione fase $S_f$                              | Sezione Neutro e PE              |
|-------------------------------------------------|----------------------------------|
| $\leq 16 \text{ mm}^2$                          | $S_f = S_N = S_{PE}$             |
| $16 \text{ mm}^2 \leq S_f \leq 35 \text{ mm}^2$ | $S_N = S_{PE} = 16 \text{ mm}^2$ |
| $S_f > 35 \text{ mm}^2$                         | $S_N = S_{PE} = S_f/2$           |

Tabella 21 - Sezioni dei conduttori di neutro e PE in funzione della sezione del conduttore di fase

Per le linee che collegano il trasformatore e il gruppo elettrogeno al quadro di scambio e per la linea che connette quest'ultimo al quadro generale di bassa tensione MLVSe, essendo la sezione di fase equivalente pari a  $480 \text{ mm}^2$ , la sezione del neutro e del conduttore di terra dovranno essere di almeno  $240 \text{ mm}^2$ . Per tutte

le restanti linee, di sezione minore o uguale a 16 mm<sup>2</sup>, le sezioni di neutro e conduttore di terra saranno pari alla sezione delle rispettive fasi.

| DA    | A       | S <sub>f</sub> [mm <sup>2</sup> ] | S <sub>N</sub> [mm <sup>2</sup> ] | S <sub>PE</sub> [mm <sup>2</sup> ] |
|-------|---------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Trafo | ATS     | 4x120                             | 2x120                             | 2x120                              |
| GE    | ATS     | 4x120                             | 2x120                             | 2x120                              |
| ATS   | MLVSe   | 4x120                             | 2x120                             | 2x120                              |
| MLVSe | LPP-BF1 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-BF2 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-BF3 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-BF4 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-BF5 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-BF6 | 16                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-BF7 | 16                                | 16                                | 16                                 |
| MLVSe | LPP-GF1 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-GF2 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-GF3 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-GF4 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-1F1 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-1F2 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-1F3 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-1F4 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-2F1 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-2F2 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-2F3 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-2F4 | 6                                 | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-2F5 | 70                                | 35                                | 35                                 |
| MLVSe | LPP-RP1 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-RP2 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | LPP-RP3 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSe | UPS     | 10                                | 10                                | 10                                 |
| UPS   | MLVSs   | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSs | UPP-BF2 | 6                                 | 10                                | 10                                 |
| MLVSs | UPP-GF4 | 6                                 | 10                                | 10                                 |
| MLVSs | UPP-GF5 | 10                                | 10                                | 10                                 |
| MLVSs | UPP-1F3 | 6                                 | 10                                | 10                                 |
| MLVSs | UPP-2F2 | 6                                 | 10                                | 10                                 |

Tabella 22 - Valori delle sezioni dei conduttori di fase, neutro e protezione

## 4.8. Dimensionamento dei dispositivi di protezione

L'integrità funzionale di un conduttore elettrico è indissolubilmente legata al mantenimento della temperatura d'esercizio entro i limiti termici dell'isolante, definiti dalla portata nominale della conduttura  $I_Z$ . Un superamento sistematico di tale soglia comporta un processo di invecchiamento accelerato dei materiali dielettrici, la cui entità è funzione diretta dell'intensità della corrente, della durata della sollecitazione e della frequenza degli eventi. In ambito tecnico, è fondamentale distinguere tra le sovracorrenti di sovraccarico, tipiche di circuiti elettricamente integri ma soggetti a prelievi eccessivi, e le correnti di cortocircuito, generate da guasti d'isolamento. Mentre il sovraccarico induce un degrado termico progressivo che accorcia drasticamente la vita utile della linea, il cortocircuito manifesta sollecitazioni termiche ed elettrodinamiche di tale magnitudo da poter causare il cedimento strutturale immediato del cavo qualora il sistema di protezione non intervenga entro tempi dell'ordine dei millisecondi.

### 4.8.1. Criteri e vincoli da rispettare

Al fine di garantire la longevità dell'infrastruttura e la sicurezza degli ambienti, l'impiego di interruttori magnetotermici risulta un requisito imprescindibile. Questi dispositivi assolvono a una duplice funzione protettiva: lo sganciatore termico interviene per monitorare i sovraccarichi prolungati, mentre quello magnetico agisce istantaneamente per isolare le correnti di guasto elevate. Il coordinamento tra il conduttore e l'organo di manovra deve essere validato attraverso rigorosi criteri normativi, assicurando che la corrente nominale del dispositivo di protezione risulti superiore alla corrente d'impiego del circuito ma inferiore alla portata effettiva del cavo. Inoltre, è necessario verificare che l'energia specifica passante  $i^2t$  permessa dall'interruttore durante un evento di guasto sia inferiore all'energia massima ammissibile dal conduttore  $K^2 \cdot S^2$ , così da preservare l'integrità dell'isolante anche nelle condizioni operative più gravose.

$$I_b \leq I_N \leq I_Z$$

$$I_{CS} \geq I_{CC \text{ MAX}}$$

$$i^2t \leq K^2 S^2$$

Dove:

- $I_b$  [A] è la corrente d'impiego e che dipende dalla potenza del quadro;

- $I_N$  [A] è la corrente nominale del dispositivo di protezione;
- $I_z$  [A] è la portata effettiva del cavo;
- $I_{CS}$  [kA] è il potere di interruzione del dispositivo di protezione;
- $I_{CC\ MAX}$  [kA] è la corrente di cortocircuito massima in bassa tensione che il dispositivo di protezione è in grado di interrompere;
- $i^2t$  [A·s] è l'energia passante attraverso il dispositivo;
- $K^2S^2$  [A·s] è la massima energia specifica che un cavo può sopportare senza subire danni all'isolante;
- K è un coefficiente adimensionale che dipende dal materiale conduttore e da quello isolante;
- S [mm<sup>2</sup>] è la sezione del conduttore.

| Valori di K      |           |                |
|------------------|-----------|----------------|
| Tipo di isolante | Rame (Cu) | Alluminio (Al) |
| PVC              | 115       | 74             |
| G2               | 135       | 87             |
| EPR/XLPE         | 143       | 87             |

Tabella 23 - Valori di K in base al materiale conduttore e isolante

#### 4.8.2. Anelli di guasto e correnti di cortocircuito

L'entità della corrente di cortocircuito che attraversa un dispositivo di protezione è strettamente correlata alla posizione topologica del guasto all'interno del sistema elettrico. Il calcolo dell'impedenza totale di guasto, necessario per determinare tale valore, integra i contributi reattivi e resistivi della rete di alimentazione a monte riferiti al secondario, l'impedenza interna del trasformatore e le impedenze delle condutture che precedono il punto di guasto, già dimensionate nelle sezioni precedenti del presente progetto.

Le caratteristiche del trasformatore sono desunte analiticamente dalla scheda tecnica rilasciata dal costruttore, mentre i parametri resistivi e reattivi dei conduttori sono ricavati dalle tabelle della norma CEI-UNEL 35024 (o dai dati tecnici forniti dai produttori in conformità alla CEI-UNEL 35026). Per quanto concerne i parametri della rete di media tensione a monte, essi dipendono dalle specifiche fornite dall'ente distributore. In assenza di dati puntuali relativi al punto di consegna, è stato assunto in via cautelativa un valore di potenza di cortocircuito della rete pubblica pari a  $S_{CC}=300$  MVA. Tale assunzione rappresenta uno standard

conservativo per le reti di distribuzione in media tensione e consente di procedere con la verifica del potere di interruzione degli apparecchi di protezione.

| DATI DI RETE                                 |     |
|----------------------------------------------|-----|
| Potenza di corto circuito rete $S_{CC}$ [kV] | 300 |
| Tensione di rete $V_{Rete}$ [kV]             | 15  |

Tabella 24 - Valori della rete di distribuzione pubblica

A questo punto è stato possibile ricavare la corrente di cortocircuito in bassa tensione sulla sbarra di potenza privilegiata e sulla sbarra di sicura tramite le formule di seguito riportate.

$$Z_{RETE} = \frac{V_{MT}^2}{S_{CC} \cdot 10^6} \quad (\Omega)$$

$$X_{RETE} = 0,995 \cdot Z_{RETE} \quad (\Omega)$$

$$R_{RETE} = 0,1 \cdot X_{RETE} \quad (\Omega)$$

$$I_{NBT} = \frac{A_T \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot V_{BT}} \quad (A)$$

$$Z_{TRAFO} = \frac{\frac{V_{cc\%}}{100} \cdot V_{BT}^2}{A_T \cdot 10^3} \quad (\Omega)$$

$$R_{TRAFO} = \frac{P_J}{3 \cdot I_{NBT}^2} \quad (\Omega)$$

$$X_{TRAFO} = \sqrt{Z_{TRAFO}^2 - R_{TRAFO}^2} \quad (\Omega)$$

$$k = \frac{V_{MT}}{V_{BT}}$$

$$R_{Linea} = \frac{L_{Linea} \cdot r_{linea}}{10^3} \quad (\Omega)$$

$$X_{Linea} = \frac{L_{Linea} \cdot x_{linea}}{10^3} \quad (\Omega)$$

$$R_{EQ} = \frac{R_{RETE}}{k^2} + R_{TRAFO} + R_{Linea} \quad (\Omega)$$

$$X_{EQ} = \frac{X_{RETE}}{k^2} + X_{TRAFO} + X_{Linea} \quad (\Omega)$$

$$Z_{EQ} = \sqrt{R_{EQ}^2 + X_{EQ}^2} \quad (\Omega)$$

$$I_{CC BT} = \frac{V_{BT}}{\sqrt{3} \cdot Z_{EQ} \cdot 10^3} \quad (kA)$$

| <b>RIEPILOGO DELLA NOMENCLATURA</b>                |                          |
|----------------------------------------------------|--------------------------|
| Impedenza di rete [ $\Omega$ ]                     | $Z_{RETE}$ [ $\Omega$ ]  |
| Reattanza di rete [ $\Omega$ ]                     | $X_{RETE}$ [ $\Omega$ ]  |
| Resistenza di rete [ $\Omega$ ]                    | $R_{RETE}$ [ $\Omega$ ]  |
| Corrente nominale secondario trafo [A]             | $I_{N BT}$ [A]           |
| Impedenza del trasformatore [ $\Omega$ ]           | $Z_{TRAFO}$ [ $\Omega$ ] |
| Resistenza del trasformatore [ $\Omega$ ]          | $R_{TRAFO}$ [ $\Omega$ ] |
| Reattanza del trasformatore [ $\Omega$ ]           | $X_{TRAFO}$ [ $\Omega$ ] |
| Rapporto di trasformazione del trafo               | k                        |
| Resistenza equivalente corto circuito [ $\Omega$ ] | $R_{EQ}$ [ $\Omega$ ]    |
| Reattanza equivalente corto circuito [ $\Omega$ ]  | $X_{EQ}$ [ $\Omega$ ]    |
| Impedenza equivalente corto circuito [ $\Omega$ ]  | $Z_{EQ}$ [ $\Omega$ ]    |
| Corrente di cortocircuito in bassa tensione [kA]   | $I_{CC BT}$ [kA]         |

Tabella 25 - Nomenclatura utilizzata

La determinazione analitica della massima corrente di cortocircuito  $I_{CC BT}$  costituisce una fase cruciale per la corretta selezione dei dispositivi di protezione magnetotermica asserviti al sistema. È opportuno evidenziare come l'intensità del guasto sia strettamente dipendente dalla collocazione topografica di ciascuna linea nell'ambito dell'architettura distributiva: progredendo dal punto di consegna verso le utenze terminali, l'incremento della lunghezza dei conduttori introduce impedenze aggiuntive che determinano una progressiva attenuazione del valore di  $I_{CC}$ .

Tali valori, calcolati puntualmente per ogni nodo del sistema, sono stati impiegati per il dimensionamento degli organi di manovra e protezione. Al fine di garantire la massima resilienza impiantistica, ogni interruttore è stato selezionato affinché il proprio potere di interruzione in servizio continuativo risulti superiore alla corrente di cortocircuito massima stimata nel punto di installazione. Tuttavia, per uniformare il dimensionamento dei quadri di zona, in fase preliminare è stato considerato il caso peggiore (il quadro di zona LPP-BF1 più vicino al locale tecnico e quindi con la minore impedenza di cavo associata) e si è scelto un interruttore che

avesse un potere d'interruzione in servizio continuativo superiore al valore di cortocircuito massimo che può verificarsi a monte di tale quadro. Tale requisito assicura che ciascun dispositivo possa estinguere il guasto mantenendo inalterata la propria integrità funzionale, permettendo l'immediato ripristino del servizio dopo la rimozione della causa di anomalia e scongiurando il declassamento prestazionale dell'apparecchiatura.

### 4.8.3. Protezione contro i contatti indiretti

Effettuata la verifica dei criteri di protezione termica e meccanica delle condutture, l'analisi progettuale deve necessariamente integrare l'accertamento dei requisiti di sicurezza relativi alla protezione delle persone contro i contatti indiretti. Tale fase è finalizzata a validare il corretto coordinamento tra il sistema di messa a terra e i dispositivi di protezione, garantendo l'interruzione automatica dell'alimentazione in caso di guasto monofase a terra. L'obiettivo fondamentale consiste nell'assicurare che eventuali tensioni di contatto pericolose vengano eliminate entro i tempi d'intervento prescritti dalla normativa vigente, prevenendo così rischi per l'incolumità degli occupanti del palazzo e del personale tecnico.

La norma CEI 64-8 prevede, per il sistema TN-S, che le protezioni soddisfino la seguente condizione:

$$Z_s \cdot I_a \leq U_0$$

In cui:

- $Z_s$  [ $\Omega$ ] rappresenta l'impedenza complessiva dell'anello di guasto (considerando un guasto a fondo linea la corrente di cortocircuito sarà minima);
- $I_a$  [A] è la corrente massima che fa scattare l'interruttore entro il tempo convenzionale;
- $U_0$  [V] è la tensione di alimentazione dell'anello considerato (220 V in bassa tensione).

La protezione contro i contatti indiretti si fonda sulla capacità del sistema di interrompere l'alimentazione entro i tempi prescritti dalla norma IEC 60364-4-41 ( $t < 5s$  per circuiti appartenenti alla distribuzione primaria) qualora si verifichi un guasto tra un conduttore monofase e le masse metalliche collegate al conduttore di protezione (PE). In tale scenario, l'intensità della corrente di guasto è governata dall'impedenza complessiva dell'anello di guasto  $Z_s$ . Qualora la verifica di

coordinamento per la protezione dai contatti indiretti non risultasse soddisfatta (ovvero se la corrente di guasto non fosse sufficientemente elevata a innescare l'intervento istantaneo dello sganciatore magnetico), si renderebbe necessario l'impiego di uno sganciatore differenziale con una soglia di intervento non superiore a 300 mA, garantendo così l'intervento del dispositivo di protezione anche in presenza di impedenze  $Z_S$  elevate.

Risulta logico quindi che, a differenza della verifica del potere d'interruzione in cui si dimensiona considerando il caso di cortocircuito trifase a inizio linea, per il dimensionamento delle protezioni contro i contatti indiretti il ragionamento sia opposto. Infatti, si prende come riferimento il caso peggiore, ovvero il guasto monofase a terra a fondo linea e si sceglie un interruttore con una corrente di sgancio magnetico che scatti per valori inferiori, in modo tale da garantire l'apertura del circuito entro i tempi stabiliti dalla norma anche nel caso peggiore. Nonostante il valore di sgancio  $I_m$  sia regolabile in maniera tale da rispettare tale vincolo, in alcuni casi potrebbe comunque essere necessaria l'aggiunta di un dispositivo differenziale per ovviare ai rischi legati all'incendio e garantire una ridondanza nel sistema di protezione.

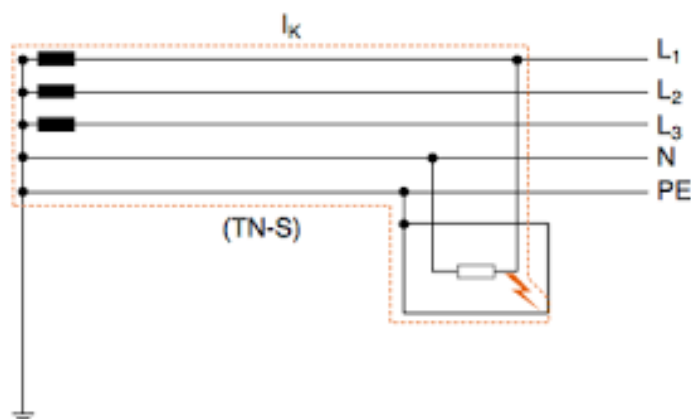


Figura 15 - Anello di un guasto monofase in un sistema TN-S

La determinazione analitica di  $Z_S$  richiede un calcolo accurato che integri i contributi di tutti i componenti elettrici interessati dal percorso della corrente. Tale analisi non può prescindere dalla valutazione delle resistenze e delle reattanze della rete di alimentazione a monte (opportunamente riportate al secondario) e dell'impedenza interna del trasformatore. Data la natura eterogenea delle sezioni dei conduttori che compongono la distribuzione dell'edificio, si procede al calcolo dei parametri resistivi e reattivi unitari per ogni singola tratta di cavo attraversata. La sommatoria vettoriale di tali contributi permette di ricavare un'impedenza totale

d'anello che rispecchi fedelmente la realtà impiantistica, assicurando che il dimensionamento degli interruttori e dei relativi organi di sgancio sia coerente con le effettive condizioni di guasto ipotizzabili nel sito museale. Le formule utilizzate per ricavare l'impedenza  $Z_S$  dell'anello di guasto sono le seguenti.

$$R_{CC} = \frac{R_{RETE}}{k^2} + R_{TRAFO} + \sum_1^{N\ Linea} \frac{L_{Linea} \cdot r_{fase}}{10^3} + \sum_1^{N\ Linea} \frac{L_{Linea} \cdot r_{PE}}{10^3}$$

$$X_{CC} = \frac{X_{RETE}}{k^2} + X_{TRAFO} + \sum_1^{N\ Linea} \frac{L_{Linea} \cdot X_{Fase}}{10^3} + \sum_1^{N\ Linea} \frac{L_{Linea} \cdot X_{PE}}{10^3}$$

$$Z_s = \sqrt{R_{CC}^2 + X_{CC}^2}$$

I risultati del dimensionamento delle protezioni, sono riportati nella tabella 26.

| DA    | A       | I <sub>b</sub> [A] | I <sub>z</sub> [A] | I <sub>cc</sub> [kA] | Interruttore | I <sub>N</sub> [A] | I <sub>r</sub> | I <sub>cs</sub> [kA] |
|-------|---------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------|--------------------|----------------|----------------------|
| Trafo | ATS     | 607,7              | 661,2              | 9,8                  | NSX630B      | 630                | 1              | 25                   |
| GE    | ATS     | 577,4              | 661,2              | 8,1                  | NSX630B      | 630                | 1              | 25                   |
| ATS   | MLVSe   | 607,7              | 661,2              | 9,5                  | NSX630B      | 630                | 1              | 25                   |
| MLVSe | LPP-BF1 | 25,7               | 56,2               | 6,9                  | Acti9 iC60H  | 40                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-BF2 | 25,7               | 56,2               | 3,0                  | Acti9 iC60H  | 40                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-BF3 | 25,7               | 56,2               | 2,1                  | Acti9 iC60H  | 40                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-BF4 | 25,7               | 56,2               | 4,3                  | Acti9 iC60H  | 40                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-BF5 | 14,6               | 64,4               | 2,2                  | Acti9 iC60H  | 20                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-BF6 | 62,5               | 74,9               | 4,0                  | Acti9 iC60H  | 63                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-BF7 | 49,3               | 74,9               | 6,1                  | Acti9 iC60H  | 63                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-GF1 | 25,7               | 56,2               | 3,0                  | Acti9 iC60H  | 40                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-GF2 | 25,7               | 56,2               | 2,7                  | Acti9 iC60H  | 40                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-GF3 | 25,7               | 56,2               | 2,0                  | Acti9 iC60H  | 40                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-GF4 | 25,7               | 56,2               | 1,7                  | Acti9 iC60H  | 40                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-1F1 | 25,7               | 56,2               | 2,8                  | Acti9 iC60H  | 40                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-1F2 | 25,7               | 56,2               | 1,9                  | Acti9 iC60H  | 40                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-1F3 | 25,7               | 56,2               | 1,7                  | Acti9 iC60H  | 40                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-1F4 | 25,7               | 56,2               | 1,8                  | Acti9 iC60H  | 40                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-2F1 | 25,7               | 56,2               | 1,7                  | Acti9 iC60H  | 40                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-2F2 | 25,7               | 56,2               | 2,5                  | Acti9 iC60H  | 40                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-2F3 | 25,7               | 56,2               | 1,9                  | Acti9 iC60H  | 40                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-2F4 | 7,1                | 40,4               | 0,8                  | Acti9 iC60H  | 40                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-2F5 | 114,8              | 184,2              | 5,4                  | Acti9 C120H  | 125                | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-RP1 | 35,5               | 56,2               | 2,2                  | Acti9 iC60H  | 50                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-RP2 | 31,9               | 56,2               | 2,0                  | Acti9 iC60H  | 50                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | LPP-RP3 | 31,9               | 56,2               | 2,0                  | Acti9 iC60H  | 50                 | 1              | 11,25                |
| MLVSe | UPS     | 45,6               | 56,9               | 6,6                  | Acti9 iC60H  | 50                 | 1              | 11,25                |
| UPS   | MLVSs   | 45,6               | 56,9               | 4,9                  | Acti9 iSW    | 63                 | 1              | 11,25                |
| MLVSs | UPP-BF2 | 4,4                | 41,0               | 1,5                  | Acti9 iC60H  | 16                 | 1              | 11,25                |
| MLVSs | UPP-GF4 | 4,4                | 41,0               | 1,0                  | Acti9 iC60H  | 16                 | 1              | 11,25                |
| MLVSs | UPP-GF5 | 27,8               | 56,9               | 1,3                  | Acti9 iC60H  | 32                 | 1              | 11,25                |
| MLVSs | UPP-1F3 | 4,4                | 41,0               | 0,9                  | Acti9 iC60H  | 16                 | 1              | 11,25                |
| MLVSs | UPP-2F2 | 4,4                | 41,0               | 1,0                  | Acti9 iC60H  | 16                 | 1              | 11,25                |

Tabella 26 - Dimensionamento dei dispositivi di protezione

Per tutte le linee è verificata la protezione contro i contatti indiretti con il solo interruttore magnetotermico scelto, tranne che per la linea che alimenta il quadro LPP-2F5. A causa della considerevole potenza assorbita unita alla contestuale lunghezza della linea che alimenta la pompa di calore posizionata al Second Floor, è necessario equipaggiare l'interruttore magnetotermico con un blocco differenziale Vigi C120 4P 125A 30mA Tipo B.

## **Capitolo 5**

# **5. Integrazione e ottimizzazione fotovoltaica**

Nel contesto contemporaneo, l'integrazione di sistemi di produzione energetica da fonti rinnovabili non rappresenta più una semplice opzione accessoria, ma un imperativo etico e tecnico, specialmente quando combinato al recupero del patrimonio storico. La trasformazione del Guenete Leul Palace in un moderno polo museale diventa un caso studio eccellente in cui la sostenibilità ambientale si intreccia con la conservazione della memoria.

L'appartenenza del Guenete Leul Palace alla Addis Abeba University aggiunge un ulteriore livello di significato all'impianto. L'installazione non serve solo a rendere indipendente l'edificio a livello energetico, ma diventa uno strumento educativo e simbolico: l'impianto può diventare un laboratorio a cielo aperto per gli studenti di ingegneria dell'università, che possono studiare dati reali di produzione e gestione energetica in un edificio storico. In questo contesto, l'Università invia un messaggio potente: il rispetto per il passato cammina di pari passo con la responsabilità verso il futuro. Il Guenete Leul Palace diventa così un modello di retrofitting sostenibile per l'intero continente africano.

### **5.1. L'influenza della vicinanza all'equatore**

L'installazione di un sistema fotovoltaico ad Addis Abeba rappresenta un caso di studio quasi ideale per quanto concerne l'energia solare, poiché la capitale etiope fonde una posizione geografica strategica con condizioni termodinamiche ideali. Trovandosi a circa 9° di latitudine Nord e oltre i 2.350 metri di quota, la città gode di un irraggiamento specifico elevatissimo, ma contestualmente il regime termico dell'altopiano mitiga l'effetto negativo del calore sulle celle. Infatti, l'efficienza dei semiconduttori cala drasticamente all'aumentare della temperatura operativa rispetto ai 25 °C delle Standard Test Condition (STC) e, in tal senso, il clima costantemente mite di Addis Abeba funge da dissipatore naturale che permette ai

moduli di lavorare vicino alla loro massima resa nominale. Questa condizione termica favorevole consente di superare le prestazioni degli impianti situati a latitudini simili ma in zone desertiche, dove il forte surriscaldamento delle celle finisce spesso per annullare i benefici derivanti dall'elevato irraggiamento.

### 5.1.1. Analisi della producibilità dei moduli a Nord

Analizzando i dati sulla producibilità mensile con il software PVGIS, emerge chiaramente come l'orientamento dei pannelli influenzi la curva di carico in modo specifico e differente rispetto alle latitudini europee. Osservando la prima immagine, relativa all'orientamento dei pannelli verso Nord, si nota una produzione molto sostenuta nei mesi di marzo, aprile e maggio che riflette la posizione zenitale del sole tipica delle zone prossime all'equatore, dove per un certo periodo la traiettoria solare si sposta leggermente nel settore settentrionale. Tuttavia, balza all'occhio la riduzione registrata tra luglio e agosto, un fenomeno che non è legato all'inclinazione dei raggi ma alla stagione delle grandi piogge nota come Kiremt, la cui fitta nuvolosità scherma la radiazione solare proprio quando ci si aspetterebbe il picco nei Paesi europei.

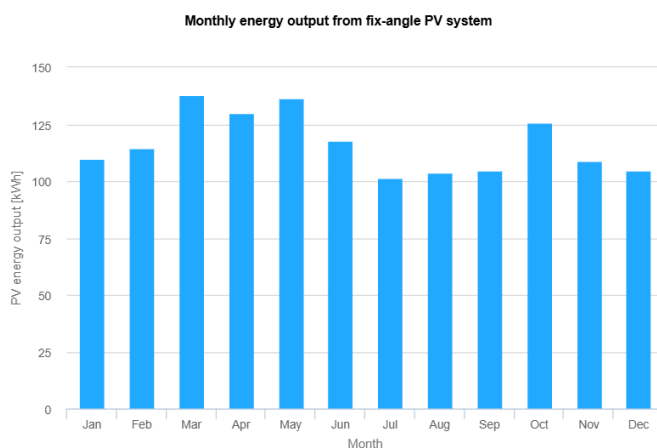


Figura 16 - Producibilità mensile per kWp installato (esposizione Nord)

Paradossalmente, mentre un progettista europeo considererebbe l'orientamento a Nord come un errore da matita rossa, alle latitudini etiopi tale scelta garantisce comunque una producibilità di tutto rispetto, superando nei mesi invernali le migliori performance mediterranee grazie alla scarsa inclinazione dei raggi solari rispetto alla perpendicolare del sito [26].

## 5.1.2. Analisi della producibilità dei moduli rivolti a Sud

Analizzando il comportamento dei moduli con esposizione dei moduli a Sud, il profilo cambia leggermente mostrando un andamento più irregolare, con picchi che in dicembre e gennaio superano agevolmente i 175 kWh mensili per kWp installato. Questa configurazione appare complessivamente più performante poiché sfrutta i mesi di cielo terso della stagione secca, quando il sole percorre una traiettoria più meridionale, garantendo un output energetico che nel complesso annuale risulta superiore a quello dell'orientamento a Nord. Confrontando tali andamenti con il contesto italiano, si evidenzia una differenza fondamentale nel concetto di stagionalità energetica: mentre in Italia la produzione è dettata dal ciclo astronomico con un picco estivo legato alla durata del giorno e all'altezza del sole, ad Addis Abeba la stagionalità è dettata quasi esclusivamente dalla variabile meteorologica delle piogge.

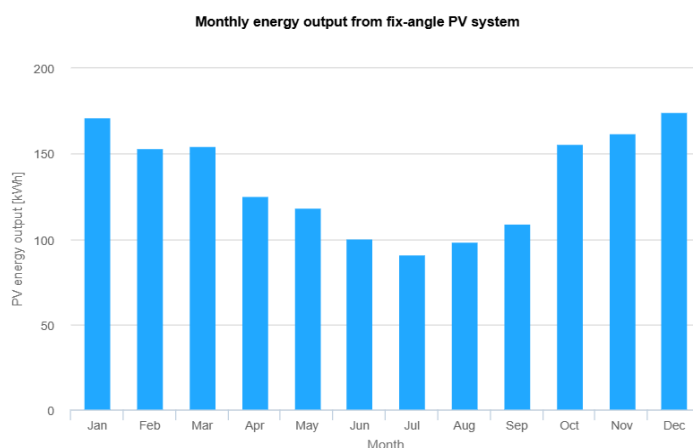


Figura 17 - Producibilità mensile per kWp installato (esposizione Sud)

## 5.2. Analisi tecnico-economica dell'impianto fotovoltaico

Per valutare la taglia ottimale dell'impianto fotovoltaico e la relativa disposizione dei moduli sulla copertura del corpo principale e sui terrazzamenti adiacenti, è stata condotta una ricerca attraverso un approccio BIM (Building Information Modeling), utile nel superare le limitazioni di interoperabilità dei software e delle licenze. In particolare, il lavoro proposto integra strumenti di progettazione parametrica e generativa all'interno di un unico ambiente digitale, consentendo un'ottimizzazione fluida del sistema fotovoltaico ed eliminando i problemi di scambio dati, combinando l'analisi della complessa topologia della

copertura e degli effetti di ombreggiamento con valutazioni di fattibilità tecnica ed economica.

L'architettura del workflow, implementata nel lavoro di tesi dall'Ing. Corrado Serato, si fonda sull'integrazione sinergica di quattro software principali, coordinati per ottimizzare l'intero processo di progettazione. Autodesk Revit costituisce la piattaforma BIM centrale, deputata alla modellazione geometrica e alla gestione del database informativo, mentre Dynamo ne estende le potenzialità attraverso la programmazione visiva, permettendo l'esecuzione di analisi parametriche e simulazioni complesse. La fase di ottimizzazione multi-obiettivo è affidata ad Autodesk Refinery, che sfrutta l'algoritmo genetico NSGA-II per esplorare lo spazio delle soluzioni. Infine, l'ecosistema si completa con l'integrazione di Power BI e Speckle, strumenti scelti per garantire una comunicazione dei dati efficace e una visualizzazione intuitiva dei risultati ottenuti [26].

Nell'ambito della ricerca sono stati sviluppati due approcci metodologici complementari. Il primo, definito "User-Driven", prevede la definizione manuale dei parametri per una valutazione deterministica di scenari specifici; il secondo, basato sul "Generative Design", consente l'esplorazione automatizzata di innumerevoli combinazioni parametriche finalizzate all'individuazione delle configurazioni ottimali. Questa struttura duale è stata concepita per offrire uno strumento versatile, capace di supportare sia esperti del settore che progettisti meno specializzati nella conduzione di studi di fattibilità per nuove realizzazioni o per interventi di retrofitting su complessi esistenti. Parallelamente, un algoritmo implementato in Dynamo esegue un'analisi economica integrata che permette di confrontare le diverse configurazioni del sistema fotovoltaico, calcolando indicatori finanziari critici quali il ROI (tempo di ritorno dell'investimento), il VAN (valore attuale netto) e il TIR (tasso interno di rendimento) per ogni singola simulazione.

La validazione della metodologia è stata effettuata analizzando il caso studio attraverso l'approccio di "Generative Design", avvalendosi del framework di ottimizzazione NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II). La strategia di calcolo è stata impostata per risolvere il conflitto tra due obiettivi contrapposti: la massimizzazione della resa energetica annua (Annual Energy Yield) e la contestuale minimizzazione del tempo di ritorno dell'investimento (ROI). L'output del processo di simulazione è costituito da una frontiera di soluzioni ottimali che compongono la cosiddetta Frontiera di Pareto e che rappresentano i migliori compromessi tecnici ed economici tra i criteri prestazionali considerati. La peculiarità di tali soluzioni è rappresentata dal fatto che non è possibile migliorare un obiettivo senza peggiorare l'altro.

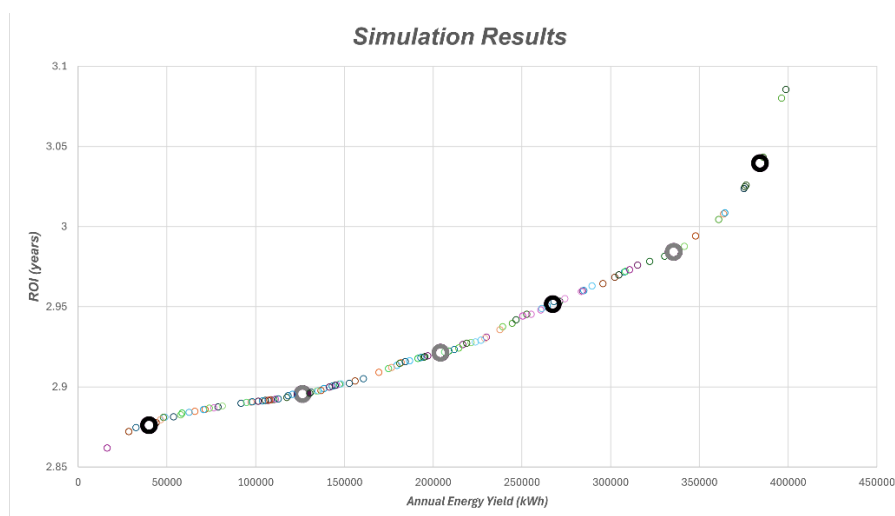


Figura 18 - Frontiera di Pareto

I risultati hanno mostrato una deviazione media dell'irradiazione solare annua di appena l'1,37%, confermando l'affidabilità del framework nel riprodurre le condizioni ambientali reali all'interno dell'ecosistema BIM.

Un aspetto critico della simulazione riguarda la gestione delle diverse geometrie del tetto. Per quanto riguarda i moduli installati sulla copertura del corpo principale, saranno inclinati inevitabilmente dello stesso angolo del tetto, circa 20°. I moduli disposti sui terrazzamenti adiacenti invece, essendo appoggiati su strutture zavorrate, possono essere inclinati con l'angolo migliore per massimizzare irraggiamento e produzione, diventando quindi una variabile arbitraria del sistema. La simulazione ha coinvolto 1.120 iterazioni, variando per ognuna di esse l'inclinazione e il numero dei moduli. Il Fronte di Pareto ottenuto per il Guenete Leul Palace è costituito da 116 soluzioni non dominate e, tra esse, sono state selezionate 6 soluzioni con il criterio dell'equidistanza. Fra quest'ultime, la configurazione n. a8fe7501-2dc9-4b7a-8088-65888c4ba7c1 emerge come soluzione ottimale nel contesto etiope.

| <b>Soluzione n. a8fe7501-2dc9-4b7a-8088-65888c4ba7c1</b> |              |
|----------------------------------------------------------|--------------|
| Numero di moduli                                         | 440          |
| Potenza totale [kWp]                                     | 215,6        |
| Latitudine                                               | 9°02'48.1"N  |
| Longitudine                                              | 38°45'28.4"E |
| Angolo di Tilt                                           | 3°           |
| Efficienza dei moduli                                    | 20,54%       |
| Performance Ratio (PR)                                   | 0,8          |
| Irradiazione media annua (kWh/m <sup>2</sup> )           | 2.030        |
| Periodo di analisi (anni)                                | 20           |
| Produzione energetica annua (kWh)                        | 350.233      |
| Costo dell'energia elettrica in Etiopia(€/kWh)           | 0,13         |
| Indice di attualizzazione annuo                          | 2%           |
| Costo annuo di manutenzione                              | 1%           |
| ROI (anni)                                               | 3            |
| VAN dopo 20 anni (€)                                     | 524.727      |
| IRR                                                      | 34%          |

Tabella 27 - Risultati ottenuti dalla simulazione n. a8fe7501-2dc9-4b7a-8088-65888c4ba7c1

L'analisi della soluzione ottimale mette in luce una stretta interdipendenza tra i vincoli geografici del sito di Addis Abeba e le prestazioni tecnico-economiche del sistema ottimizzato. La scelta di un angolo di tilt estremamente contenuto, pari a soli 3°, non è affatto casuale ma rappresenta la risposta analitica alla latitudine equatoriale del sito (circa 9° N), dove l'obiettivo di massimizzare l'intercettazione della radiazione zenitale permette di sfruttare appieno un irraggiamento annuo di ben 2.030 kWh/m<sup>2</sup>. In questo contesto, l'impiego di 440 moduli per una potenza complessiva di 215,60 kWp produce 350.233 kWh/anno, un valore che denota un'altissima densità di produzione specifica. Tale efficienza si traduce in metriche finanziarie di assoluto rilievo, raramente riscontrabili in latitudini europee: il tempo di ritorno dell'investimento si contrae infatti a soli 3 anni, mentre la redditività a lungo termine viene confermata da un Tasso Interno di Rendimento (TIR) del 34% e da un Valore Attuale Netto che sfiora i 525.000 euro su un orizzonte ventennale. Questi dati non solo confermano la validità del framework di ottimizzazione multi-obiettivo basato sull'algoritmo NSGA-II, ma evidenziano come la soluzione individuata rappresenti un punto di equilibrio ottimale nella frontiera di Pareto, riuscendo a coniugare una massiccia produzione energetica con una velocità di ammortamento dei costi estremamente competitiva.

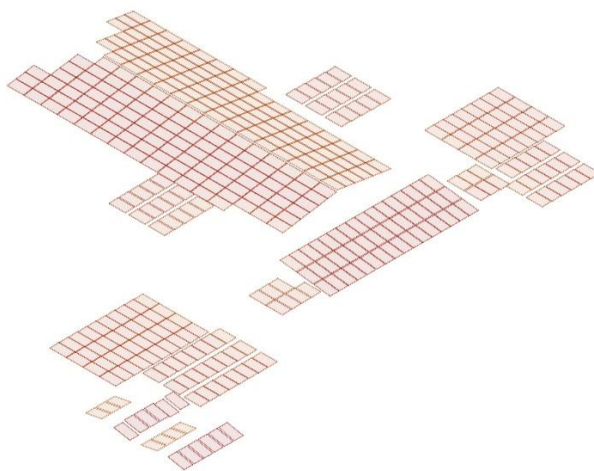
### **5.3. Pro e contro del fotovoltaico in Etiopia**

L'implementazione di sistemi fotovoltaici in Etiopia è supportata dunque da una resa specifica d'eccellenza, favorita da un'elevata irradianza solare e da condizioni termiche sugli altipiani che limitano il degrado dell'efficienza delle celle tipico delle alte temperature. Tali vantaggi tecnici, combinati con la fragilità della rete di distribuzione nazionale e al costo non trascurabile della generazione tramite gruppi elettrogeni, rendono le configurazioni ibride con accumulo la soluzione ingegneristica più idonea per garantire la continuità del servizio e adeguati standard di power quality.

Sebbene la sostenibilità finanziaria dei progetti sia stata storicamente negativamente condizionata da tariffe idroelettriche sussidiate, che hanno teso a estendere il payback period, l'attuale transizione verso modelli di cost-recovery sta mutando radicalmente il profilo di convenienza economica. In questo scenario, le criticità operative legate al fenomeno del soiling e le barriere finanziarie poste dalla scarsità di valuta estera per l'importazione di componentistica d'avanguardia vengono bilanciate dalla necessità strategica di diversificare il mix energetico nazionale, riducendo così la vulnerabilità del sistema elettrico alla stagionalità delle risorse idriche.

### **5.4. Predisposizione dei moduli**

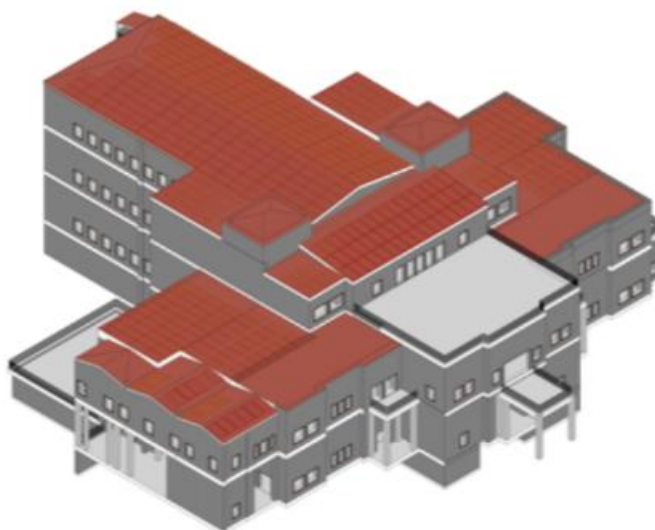
L'analisi del modello tridimensionale evidenzia un approccio di tipo retrofit, in cui la tecnologia solare si adatta alla morfologia dell'edificio senza alterarne la sagoma volumetrica fondamentale.



*Figura 19 - Impianto fotovoltaico in rilievo*

L'architettura del sistema prevede l'installazione di un sistema fotovoltaico composto da 440 moduli, ciascuno con una potenza nominale unitaria di 490 Wp. Tale soluzione determina una potenza di picco complessiva dell'impianto pari a 215,60 kWp.

Data la natura dell'edificio e la sua ubicazione, questa capacità installata rappresenta un compromesso ottimale tra la necessità di massimizzare la produzione e contestualmente ridurre i tempi di ritorno dell'investimento, rispettando i vincoli imposti dalle superfici utili disponibili sulle falde. Osservando la distribuzione spaziale dei moduli (illustrata nell'esplosivo assometrico) emerge chiaramente come il layout non sia monolitico ma frammentato, seguendo la logica dei diversi corpi che compongono il palazzo. La disposizione dei moduli sulla copertura del corpo principale è complanare alle falde, sfruttando l'inclinazione naturale del tetto a padiglione in modo da minimizzare l'impatto visivo da terra e ridurre il carico del vento sulle strutture. Sul corpo centrale, che costituisce anche il nucleo più elevato dell'edificio, si concentra la porzione più estesa e regolare del campo fotovoltaico.



*Figura 20 - Configurazione dei moduli sulla copertura e sui terrazzamenti adiacenti*

Spostandosi verso le ali laterali e i corpi secondari, che si sviluppano a quote inferiori, il layout diventa necessariamente più articolato. In queste zone, la disposizione dei moduli si adatta alle forme dei terrazzamenti. Si nota inoltre una suddivisione in cluster minori sulle sezioni perimetrali, una soluzione tecnica verosimilmente adottata per aggirare elementi architettonici puntuali o per gestire le discontinuità della copertura. Qui i moduli possono essere inclinati arbitrariamente e, in base alla soluzione scelta, l'angolo di tilt ottimale dei moduli

disposti sui sistemi zavorrati è pari a 3°, valore relativamente basso grazie alla vicinanza equatoriale a cui si trova Addis Abeba.



*Figura 21 – Render 3D del nuovo Guenete Leul Palace dall'alto*

Per quanto concerne i moduli disposti lungo la copertura del corpo principale, la bassa latitudine di Addis Abeba implica che il sole raggiunga angoli di elevazione significativi durante tutto l'anno, rendendo l'inclinazione standard delle falde esistenti (pari a circa 20°) già particolarmente efficace per la captazione. Tuttavia, la natura multilivello dell'edificio introduce una criticità progettuale legata al self-shading: i volumi più alti, in particolare quelli del corpo centrale, proiettano ombre sulle ali laterali. Questo fattore influenza la disposizione dei moduli e la loro configurazione in stringhe, al fine di preservare la produttività complessiva del sistema.

|                            |              |
|----------------------------|--------------|
| Località                   | Addis Abeba  |
| Latitudine                 | 9°02'48.1"N  |
| Longitudine                | 38°45'28.4"E |
| Altitudine                 | 2.355 m slm  |
| Numero di moduli           | 440          |
| Potenza del singolo modulo | 490 Wp       |
| Potenza installata         | 215,6 kWp    |
| Energia annua prodotta     | 350,2 MWh    |

*Tabella 28 - Dati dell'impianto fotovoltaico*

### **5.4.1. Sistema di ancoraggio alle falde del corpo principale**

L'intervento sulla copertura del corpo centrale, caratterizzata da una geometria a padiglione, richiede un approccio installativo che garantisca la solidità strutturale preservando al contempo l'integrità del manto impermeabile storico. Per questa porzione dell'impianto, la scelta tecnica è ricaduta su un sistema di montaggio complanare basato su profili in alluminio estruso, ancorati alla struttura portante sottostante mediante staffe sagomate in acciaio inossidabile. Le staffe di fissaggio vengono inserite rimuovendo temporaneamente porzioni limitate del manto di copertura, fissandole meccanicamente alla struttura solida e sagomandole in modo da fuoriuscire senza creare fessurazioni che compromettano la tenuta all'acqua. Su tale orditura primaria vengono successivamente assicurati i profili di supporto paralleli alla linea di gronda.



*Figura 30 - Sistema di ancoraggio dei moduli fotovoltaici a coppi o tegole*

Questa stratigrafia assolve a una funzione termodinamica cruciale: la creazione di un'intercapedine d'aria di alcuni centimetri tra il retro del modulo fotovoltaico e la superficie del tetto favorisce la ventilazione naturale. Il flusso d'aria convettivo contribuisce a raffreddare le celle fotovoltaiche, mantenendo la loro temperatura operativa entro range ottimali e limitando le perdite di efficienza dovute al coefficiente termico di potenza, particolarmente rilevante alle latitudini etiopi. In particolare, deve essere mantenuto uno spazio di 25 mm tra due moduli adiacenti; inoltre, è necessario lasciare 1,5 mm tra il telaio del modulo e il lato del morsetto, così da compensare l'espansione termica lineare del supporto.

### **5.4.2. Sistemi a zavorra su superfici piane**

Per le sezioni dell'edificio caratterizzate da coperture piane o terrazzamenti (dove la perforazione della guaina impermeabilizzante costituirebbe un rischio inaccettabile di infiltrazioni), la strategia di fissaggio cambia radicalmente

adottando un sistema a zavorra. Questa soluzione tecnica elimina la necessità di ancoraggi meccanici penetranti, affidando la stabilità dell'impianto al peso proprio delle strutture di supporto e alla loro conformazione aerodinamica.



*Figura 22 - Zavorre per moduli fotovoltaici su superfici piane*

Il sistema si compone di elementi modulari in calcestruzzo non armato che svolgono la doppia funzione di supporto inclinato e di zavorra. La scelta di utilizzare supporti massivi in cemento, anziché strutture metalliche leggere zavorrate successivamente, semplifica le operazioni di posa in opera e riduce i tempi di cantiere. In fase di progettazione esecutiva, particolare attenzione va posta alla verifica dei carichi distribuibili sulla soletta esistente: sebbene il peso specifico del calcestruzzo sia elevato, la distribuzione planimetrica delle zavorre permette di mantenere il sovraccarico entro i limiti statici dell'edificio storico.

Dal punto di vista della resistenza agli agenti atmosferici, la geometria dei supporti Sun Ballast è studiata per offrire una ridotta resistenza al vento, minimizzando l'effetto vela. Inoltre, essendo i moduli svincolati dalla struttura edile sottostante, si evitano le problematiche legate ai ponti termici puntuali che spesso si generano con i fissaggi metallici tradizionali. Questa tipologia di installazione offre infine il massimo grado di flessibilità futura: l'intero campo fotovoltaico può essere rimosso o riconfigurato senza lasciare tracce permanenti sulla superficie della copertura, rispettando pienamente i principi del restauro conservativo.

## **5.5. Scelta dei moduli: modello AE MD-132BD da 490Wp**

L'installazione dell'impianto fotovoltaico va inquadrata nell'opera di restauro dell'edificio storico e richiede dunque un'elevata qualità costruttiva e dei componenti. Sono stati selezionati i moduli fotovoltaici AE Solar modello AE MD-132BD da 490Wp, caratterizzati dalla cosiddetta "German Quality". Tale slogan è

dovuto a protocolli di produzione che eccedono gli standard minimi IEC: i documenti rivelano l'uso di un sistema di sorveglianza della produzione integrato, dove ogni fase di assemblaggio è monitorata da software centralizzati che tracciano ogni singolo modulo [28].

Un aspetto distintivo è la gestione ambientale delle aree produttive. Le linee di assemblaggio sono isolate in ambienti a temperatura, umidità e polvere controllate. Questo è cruciale per la tecnologia vetro-vetro del modello Aurora: l'intrappolamento di umidità o particelle organiche tra i due vetri durante la laminazione sarebbe catastrofico per la longevità del modulo, portando a delaminazione o corrosione interna anni dopo l'installazione. I robot automatizzati eseguono controlli di qualità ad ogni stazione, rilevando difetti microscopici come micro-crack nelle celle, punti neri o saldature insufficienti, scartando immediatamente i componenti non conformi prima che vengano sigillati nel modulo.



*Figura 23 - Pannello fotovoltaico MD-132BD da 490Wp della AE Solar*

### **Tecnologia delle celle: PERC monocristallino**

Il cuore del modulo è costituito da celle in silicio monocristallino con tecnologia PERC (Passivated Emitter and Rear Cell). Rispetto alle celle tradizionali (Al-BSF), la tecnologia PERC aggiunge uno strato di passivazione dielettrica sul retro della cella. Questo strato riflette i fotoni di luce a lunga lunghezza d'onda (luce rossa e infrarossa) che attraverserebbero la cella senza generare elettroni, rimandandoli all'interno del silicio per una seconda opportunità di generazione di corrente. Ciò conferisce al modulo Aurora una risposta spettrale migliore all'alba, al tramonto e in condizioni di nuvolosità, dove la componente diffusa della luce (più ricca di lunghezze d'onda lunghe) è predominante.

## La rivoluzione del drogaggio al Gallio

Una delle caratteristiche tecniche più rilevanti, evidenziata nei datasheet e nelle recensioni tecniche, è l'utilizzo di wafer di silicio drogati al gallio invece del tradizionale boro. Nelle celle monocristalline convenzionali drogate al boro, l'esposizione iniziale alla luce solare attiva la formazione di complessi chimici metastabili tra gli atomi di boro e l'ossigeno interstiziale presente nel reticolo di silicio (difetti B-O). Questi difetti agiscono come centri di ricombinazione per i portatori di carica, riducendo l'efficienza del modulo del 2-3% nelle prime settimane di funzionamento. Questo fenomeno è noto come LID.

AE Solar utilizza il gallio come drogante di tipo P, poiché non forma complessi ricombinanti con l'ossigeno. Il modulo AE490MD-132BD è virtualmente immune al LID tradizionale. Inoltre, eliminando il calo iniziale del 2-3%, il modulo parte da un livello di produzione più alto e mantiene questo vantaggio per tutta la vita operativa. I dati indicano un'efficienza media superiore dello 0,09% rispetto alle celle drogate al Boro, che si traduce in MWh aggiuntivi significativi su scala trentennale.

## Configurazione half-cut e wafer M10

Il modulo adotta wafer da 182 mm tagliati a metà (Half-Cut technology), portando il numero totale di celle attive a 132 (2x66). Questa tecnologia comporta una riduzione delle perdite resistive: la corrente elettrica generata da una cella è proporzionale alla sua area. Tagliando la cella a metà, la corrente prodotta da ciascuna metà è il 50% dell'originale. Poiché le perdite di potenza per effetto Joule nei conduttori sono calcolate come  $P_j = R \cdot I^2$ , dimezzare la corrente riduce le perdite di quattro volte ( $0,5^2 = 0,25$ ). Meno corrente significa meno calore dissipato all'interno del modulo, contribuendo a mantenere la temperatura operativa più bassa e migliorando l'efficienza reale in climi caldi. Infine, la configurazione a 132 mezze celle permette di dividere il modulo in due sezioni indipendenti (superiore e inferiore) collegate in parallelo. Se una metà è ombreggiata, l'altra continua a funzionare alla massima potenza, a differenza dei moduli standard dove l'ombra su una singola cella può abbattere la produzione dell'intera stringa.

## Certificazione PID (Potential Induced Degradation)

Il modulo è marcato come "PID Resistant" secondo lo standard IEC 62804. Il PID è un fenomeno insidioso che può abbattere la potenza del 30% in pochi anni, specialmente in stringhe ad alta tensione (1.500V) in climi umidi. La combinazione

di vetro (isolante perfetto) e POE (alta resistività) elimina i percorsi di dispersione verso terra che innescano il PID, proteggendo l'investimento.

| <b>DATI DI TARGA DEL MODULO FOTOVOLTAICO</b>        |        |
|-----------------------------------------------------|--------|
| Potenza nominale $P_N$ [Wp]                         | 490    |
| Lunghezza [cm]                                      | 209,4  |
| Larghezza [cm]                                      | 113,3  |
| Peso [kg]                                           | 28     |
| Numero di celle per modulo                          | 132    |
| Superficie [m <sup>2</sup> ]                        | 2,37   |
| Efficienza                                          | 20,7%  |
| Corrente di corto circuito $I_{CC}$ [A]             | 13,47  |
| Tensione a circuito aperto $U_{OC}$ [V]             | 46,05  |
| Corrente nel punto di potenza massima $I_{MPP}$ [A] | 12,71  |
| Tensione nel punto di potenza massima $U_{MPP}$ [V] | 38,55  |
| Coefficiente termico di $P_{MAX}$                   | -0,35% |
| Coefficiente termico di $I_{cc}$ [A/°C]             | 0,0057 |
| Coefficiente termico di $U_{OC}$ [V/°C]             | -0,126 |
| Coefficiente termico di $U_{MPP}$ [V/°C]            | -0,152 |
| Fill Factor FF                                      | 79%    |

Tabella 29 - Scheda tecnica del modulo fotovoltaico AE MD-132MD da 490Wp della AE Solar

## 5.6. Scelta dell'inverter

Si è proseguito con la selezione del modello e della quantità degli inverter. La scelta è ricaduta sull'inverter SUN2000-100KTL-M2 di Huawei, un dispositivo capace di gestire la complessità geometrica del tetto e le criticità atmosferiche dell'altopiano. Il vantaggio tecnico predominante del dispositivo risiede nella sua architettura a dieci inseguitori del punto di massima potenza (MPPT) indipendenti.



*Figura 24 – Inverter Huawei SUN2000-100KTL-M2*

Nel contesto del Guenete Leul Palace, le falde del tetto sono multiple. Un inverter tradizionale con soltanto uno o due MPPT costringerebbe i progettisti a mettere in serie moduli con esposizioni diverse, causando un "effetto imbuto" dove il modulo meno irraggiato limita la corrente dell'intera stringa. Con 10 MPPT, è possibile segmentare l'impianto in sottocampi elettricamente indipendenti. Questa granularità permette di estrarre la massima potenza da ogni singola faccia dell'edificio storico, mitigando le perdite dovute alle ombre proiettate dalle due torri o dalla vegetazione circostante [29].

### **5.6.1. Derating termico**

Il datasheet del produttore specifica un'altitudine operativa massima di 4.000 metri, con un inizio della riduzione di potenza sopra i 2.000 metri. Essendo il sito a 2.400 metri, l'inverter opera tecnicamente in zona di derating. Tuttavia, l'analisi termica rivela che il dispositivo non subirà limitazioni di potenza effettiva. La curva di declassamento termico di Huawei mostra che la potenza nominale viene ridotta solo quando la temperatura ambiente supera determinate soglie. A livello del mare, questa soglia è tipicamente intorno ai 45-50°C. In quota, la minor densità dell'aria riduce l'efficienza delle ventole di raffreddamento ("Smart Air Cooling"), abbassando questa soglia termica. Studi su inverter simili indicano una riduzione della temperatura massima di lavoro di circa 6°C per ogni 1.000 metri oltre i 2.000 metri di quota.

A 2.400 metri, la capacità di raffreddamento dovuta alla convezione termica si riduce, ma il clima sempre mite di Addis Abeba compensa tale problematica. I dati

climatici storici indicano che le massime ad Addis Abeba si attestano sui 24-25°C, con picchi rari che non superano i 30°C neanche nei mesi più caldi. L'ampio margine tra la temperatura operativa massima dell'inverter e la temperatura reale dell'ambiente garantisce che il SUN2000-100KTL-M2 operi tutto l'anno a piena potenza nominale (100kW), senza entrare in protezione termica.

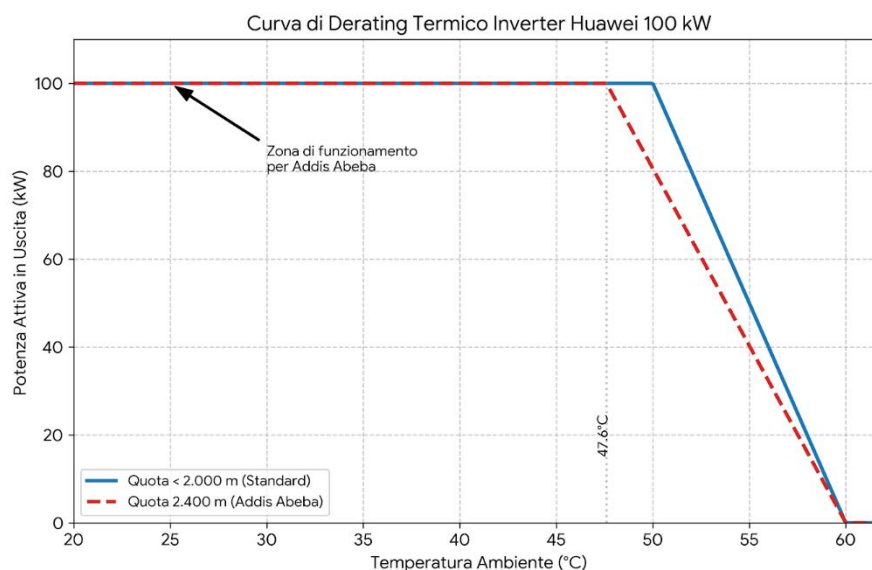


Figura 25 - Curva di derating termico dell'inverter

### 5.6.2. Sicurezza attiva AFCI e protezione dalle sovratensioni

Per un edificio storico con componenti lignei strutturali, la prevenzione degli incendi è il parametro di selezione più critico. Il Huawei SUN2000-100KTL-M2 integra nativamente la tecnologia AFCI (Arc Fault Circuit Interrupter) supportata da intelligenza artificiale. Il sistema analizza continuamente lo spettro di frequenza della corrente DC e, in caso di rilevamento di un arco elettrico (causato da connettori allentati, cavi danneggiati dai roditori o invecchiamento dell'isolante), l'inverter interrompe il circuito in meno di 2 secondi (spesso in meno 0,5s), estinguendo l'arco prima che possa innescare un incendio. In aggiunta, l'inverter è dotato di scaricatori di sovratensione (SPD) di Tipo II sia sul lato DC che AC. Questo protegge l'elettronica dai fulmini, eventi non rari durante la stagione delle piogge etiope (da giugno a settembre), evitando danni costosi e riducendo la necessità di quadri di campo esterni fra stringhe e convertitore.

Uno scaricatore di sovratensione (Surge Protective Device) di Tipo II è un dispositivo di protezione concepito per salvaguardare le apparecchiature elettriche

dalle sovratensioni transitorie indotte e dalle manovre sulla rete di distribuzione. A differenza dei dispositivi di Tipo I, progettati per sopportare l'energia d'urto diretta di un fulmine (caratterizzata da una forma d'onda 10/350  $\mu$ s), gli SPD di Tipo II sono dimensionati per gestire correnti di scarica con forma d'onda 8/20  $\mu$ s, tipiche delle sovratensioni indirette o dei fenomeni di commutazione sulla rete elettrica. Il principio di funzionamento si basa sull'impiego di componenti a impedenza variabile, solitamente varistori all'ossido di metallo o spinterometri, che presentano una resistenza elevatissima in condizioni di tensione nominale. Nel momento in cui si manifesta un transitorio di tensione che supera la soglia di innesco del dispositivo, l'impedenza crolla istantaneamente, permettendo di deviare la corrente di guasto verso l'impianto di terra e limitando la tensione residua  $U_p$  a un valore compatibile con la tenuta dielettrica dei componenti elettronici a valle.

La sua funzione è essenziale per la protezione dell'elettronica sensibile degli inverter, poiché è in grado di intervenire con estrema rapidità su picchi di tensione che, pur non avendo l'energia distruttiva di un fulmine diretto, risulterebbero fatali per i semiconduttori del convertitore. La presenza di indicatori visivi di stato o contatti di segnalazione remota permette inoltre una manutenzione predittiva efficace, segnalando l'esaurimento della capacità di scarica del modulo protettivo a seguito di ripetuti interventi, garantendo così che il sistema rimanga costantemente protetto contro le perturbazioni della rete elettrica e i fenomeni atmosferici tipici delle zone ad alta densità di fulminazione.

### **5.6.3. Installazione, manutenzione e monitoraggio**

L'inverter Huawei SUN2000-100KTL-M2 pesa 93 kg e ha dimensioni 1.035x700x365 mm. Dato il vincolo storico delle murature del palazzo, l'installazione decentralizzata è preferibile rispetto a un inverter centralizzato da svariate tonnellate. I 93 kg possono essere supportati da staffe a muro su pareti portanti o su tetti piani secondari, così da evitare forature nelle murature storiche nobili. Il convertitore è inoltre caratterizzato da un grado di protezione IP66 che lo rende totalmente protetto contro polvere e getti d'acqua potenti e quindi idoneo all'installazione esterna senza tettoie protettive complesse. Tuttavia, data l'altitudine, è opportuno installare il dispositivo su pareti non esposte direttamente al sole meridiano per facilitare lo scambio termico.

Infine, per quanto concerne il monitoraggio e la diagnostica remota, il SUN2000-100KTL-M2 supporta la cosiddetta "Smart I-V curve diagnosis". Questa funzione permette di scansionare le stringhe da remoto per identificare problemi come micro-crack, accumulo di polvere (comune nella stagione secca) o guasti ai

diodi, senza inviare tecnici sul tetto. Inoltre, l'inverter supporta le tecnologie dongle 4G e comunicazione PLC, garantendo la trasmissione dati anche in assenza di cablaggio strutturato.

#### 5.6.4. Scheda tecnica dell'inverter Huawei SUN2000-100KTL-M2

| INGRESSO DC                           |                 |
|---------------------------------------|-----------------|
| Potenza massima di picco              | 150 kW          |
| Tensione massima                      | 1.100 V         |
| Intervallo di tensione del MPPT       | 200-1.000 V     |
| Tensione nominale                     | 600 V           |
| Tensione di avviamento                | 200 V           |
| Corrente massima per ciascun ingresso | 300 A           |
| Numero di MPPT                        | 10              |
| Numero di ingressi                    | 20              |
| USCITA AC                             |                 |
| Connessione alla rete elettrica       | 3F+N+PE         |
| Potenza massima apparente             | 110 kVA         |
| Potenza nominale                      | 100 kW          |
| Tensione nominale                     | 380/400 V       |
| Frequenza nominale                    | 50/60 Hz        |
| Corrente nominale per ingresso        | 152 A           |
| Corrente nominale per MPPT            | 304 A           |
| Fattore di potenza regolabile         | 0,8 (lag/delay) |
| THDi                                  | <3%             |
| THDv                                  | <3%             |
| Efficienza europea                    | 98,6%           |

Tabella 30 - Scheda tecnica dell'inverter Huawei SUN2000-100KTL-M2

Le specifiche tecniche dell'inverter Huawei SUN2000-100KTL-M2, dettagliate nella Tabella 30, delineano un componente ad alte prestazioni ottimizzato per applicazioni commerciali e industriali di ampia scala. Sul lato dell'ingresso in corrente continua (DC), l'apparecchiatura si distingue per una notevole flessibilità, garantita dalla presenza di 10 inseguitori MPPT indipendenti e un totale di 20 ingressi, due per ciascun MPPT. Come già spiegato, tale configurazione permette di mitigare efficacemente le perdite per mismatch e di gestire layout complessi con diverse esposizioni o pendenze delle stringhe. Il dispositivo supporta una potenza di picco in ingresso fino a 150 kWp, consentendo un rapporto di sovradimensionamento array fotovoltaico/inverter (pari al 150%) che consente di massimizzare la resa energetica anche in condizioni di nuvolosità. Per quanto concerne l'uscita in corrente alternata (AC), l'inverter eroga una potenza nominale di 100 kW con un'efficienza europea del 98,6%, valore che ne attesta

l'elevato rendimento di conversione. La qualità dell'energia immessa in rete è garantita da una distorsione armonica totale (THD) estremamente contenuta, inferiore al 3%, e dalla possibilità di regolare il fattore di potenza, assicurando così la piena conformità ai requisiti di stabilità richiesti dai moderni codici di rete trifase a 380 V.

## 5.7. Caratteristiche elettriche dell'array fotovoltaico

Considerati la località e il tipo di posa, si assume in maniera molto cautelativa un intervallo di variabilità della temperatura dei moduli tra 0°C e 60°C. La temperatura relativa alle condizioni di prova standard (STC) è di 25 °C (e irradianza  $G_{STC}$  pari a 1.000 W/m<sup>2</sup>). L'architettura del sistema prevede la suddivisione simmetrica del campo fotovoltaico su due inverter Huawei SUN2000-100KTL-M2 da 100 kW ciascuno. Pertanto, le verifiche di compatibilità elettrica (accoppiamento array-inverter) vengono condotte su una singola sezione dell'impianto, pari a metà della potenza fotovoltaica totale installata. Il dimensionamento considera le condizioni operative più gravose: la temperatura minima d'esercizio per determinare la massima tensione a vuoto e la temperatura massima per il calcolo della corrente di cortocircuito di picco. Si ricava che:

| ARRAY FOTOVOLTAICO                                         |            |
|------------------------------------------------------------|------------|
| N° totale di moduli                                        | 220        |
| N° moduli/stringa                                          | 20         |
| N° di stringhe                                             | 11         |
| Potenza totale array fotovoltaico                          | 107,80 kWp |
| Tensione nominale di stringa $U_N$                         | 771 V      |
| Tensione nominale di stringa vuoto $U_{OC}$                | 921 V      |
| Tensione minima di stringa $U_N$ (T=60 °C)                 | 664 V      |
| Tensione massima di stringa $U_N$ (T=0 °C)                 | 847 V      |
| Tensione massima a vuoto di stringa $U_{OC}$ (T=0 °C)      | 984 V      |
| Corrente massima $I_N$ (T=60°C, G=1.100 W/m <sup>2</sup> ) | 165 A      |

Tabella 31 - Calcolo dei parametri elettrici di uno dei due array fotovoltaici

Le formule utilizzate per ricavare tali valori sono esplicitate nel paragrafo successivo.

## 5.8. Verifica degli accoppiamenti elettrici

Si procede alla verifica del matching elettrico tra i moduli fotovoltaici AE MD-132BD da 490 Wp e il gruppo di conversione composto da due inverter Huawei SUN2000-100KTL-M2 da 100 kW ciascuno. L'obiettivo dell'analisi è convalidare la configurazione delle stringhe e garantire che le sollecitazioni elettriche rientrino nei limiti operativi (tensione, corrente e potenza) imposti dal costruttore dell'inverter.

Sotto il profilo metodologico, data la perfetta simmetria del layout elettrico, l'intero campo fotovoltaico è stato ripartito in due sezioni indipendenti e speculari. Ciascun inverter gestisce una porzione equivalente del generatore fotovoltaico; pertanto, le verifiche di dimensionamento riportate nel presente capitolo sono condotte su una metà dell'intero campo fotovoltaico. Tale approccio analitico permette di estendere per analogia i risultati ottenuti all'intero sistema, garantendo l'integrità e l'ottimizzazione dell'accoppiamento array-inverter in ogni condizione operativa.

1. La potenza nominale totale delle  $N_P$  stringhe (11) da  $N_S$  moduli (20) dell'array fotovoltaico non deve superare il 150% della potenza nominale  $P_N$  (100 kW) dell'inverter al fine di non superare i limiti imposti dalla garanzia dell'inverter.

$$N_P \cdot N_S \cdot P_{MODULO} < 1,5 \cdot P_N$$

Sostituendo, si ricava che  $11 \cdot 20 \cdot 490 \text{ W} = 107.800 \text{ W} < 150.000 \text{ W}$

2. La massima tensione di stringa a  $U_{OC}$  circuito aperto e che si verifica quando la temperatura è la minima della giornata (si ipotizza cautelativamente  $T_{MIN}=0 \text{ }^\circ\text{C}$ ), non deve superare la massima tensione tollerata dall'inverter in ingresso (lato DC).

$$N_S \cdot U_{OC} \cdot \left(1 + \frac{\beta_{U_{OC}}}{U_{OC}} \cdot (T_{MIN} - T_{STC})\right) < U_{MAX}$$

Sostituendo, si ricava che

$$20 \cdot 46,05 \text{ V} \cdot \left(1 - \frac{0,106 \text{ V}/^\circ\text{C}}{46,05 \text{ V}} \cdot (0 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C})\right) = 984 \text{ V}$$

Il valore ottenuto è inferiore rispetto alla tensione massima a cui può essere sottoposto ciascun canale in ingresso all'inverter, che per il SUN2000-100KTL-M2 è di 1.100 V.

3. La massima tensione di stringa nel funzionamento nel punto di massima potenza (il caso più gravoso, come appena mostrato, avviene quando la temperatura è minima, ovvero  $T_{MIN}=0^{\circ}C$ ) non deve superare la massima tensione tollerata dall'MPPT dell'inverter. Qualora si dovesse superare, si uscirebbe dal range di funzionamento dei Maximum Power Point Trackers e, conseguentemente, l'inverter non riuscirebbe ad estrarre la massima potenza in quelle condizioni.

$$N_S \cdot U_{MPP} \cdot \left(1 + \frac{\beta_{U_{MPP}}}{U_{MPP}} \cdot (T_{MIN} - T_{STC})\right) < U_{MPP_{MAX}}$$

Sostituendo, si ricava che:

$$20 \cdot 38,55 \text{ V} \cdot \left(1 - \frac{0,152 \text{ V}/^{\circ}C}{38,55 \text{ V}} \cdot (0^{\circ}C - 25^{\circ}C)\right) = 847 \text{ V}$$

Il valore ottenuto è inferiore rispetto alla tensione massima di funzionamento degli MPPT, pari a 1.000 V.

4. La minima tensione di stringa nel funzionamento nel punto di massima potenza (la circostanza più gravosa, in questo caso, avviene quando la temperatura è massima, ovvero  $T_{MAX}=60^{\circ}C$ ) deve superare la minima tensione tollerata dagli MPPT dell'inverter. Come per il caso della massima tensione di stringa, qualora non venisse rispettato tale vincolo, si uscirebbe dal range di funzionamento dei Maximum Power Point Trackers e, dunque, l'inverter non riuscirebbe ad estrarre la massima potenza.

$$N_S \cdot U_{MPP} \cdot \left(1 + \frac{\beta_{U_{MPP}}}{U_{MPP}} \cdot (T_{MAX} - T_{STC})\right) > U_{MPP_{MIN}}$$

Sostituendo, si ricava che:

$$20 \cdot 38,55 \text{ V} \cdot \left( 1 - \frac{0,152 \text{ V}/^{\circ}\text{C}}{38,55 \text{ V}} \cdot (60^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) \right) = 664 \text{ V}$$

Il valore ottenuto è inferiore rispetto alla tensione minima di funzionamento degli MPPT, pari a 200 V.

5. La somma delle correnti delle diverse stringhe in parallelo che entrano nell'inverter ( $T_{MAX}=60^{\circ}\text{C}$  e  $G_{MAX}=1.100 \text{ W}/\text{m}^2$ ) deve essere inferiore alla massima corrente totale in ingresso accettata dall'inverter.

$$N_P \cdot \frac{G_{MAX}}{G_{STC}} \cdot I_{SC} \cdot \left( 1 + \frac{\alpha_{I_{SC}}}{I_{SC}} \cdot (T_{MAX} - T_{STC}) \right) < I_{MAX}$$

Sostituendo, si ricava che:

$$11 \cdot \frac{1.100 \text{ W}/\text{m}^2}{1.000 \text{ W}/\text{m}^2} \cdot 12,71 \text{ A} \cdot \left( 1 + \frac{0,0057 \text{ A}/^{\circ}\text{C}}{12,71 \text{ A}} \cdot (60^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) \right) \\ = 165 \text{ A} < 300 \text{ A}$$

6. La corrente del parallelo di 2 stringhe non deve superare la massima corrente nominale in ingresso per ciascun MPPT. I moduli fotovoltaici selezionati sono caratterizzati da una corrente  $I_{MPP}$  pari a 12,71 A e una corrente di cortocircuito  $I_{SC}$  di 13,47 A. Ogni MPPT accetta in ingresso, in condizioni di normale funzionamento, al massimo 30 A e una corrente di corto circuito massima di 40 A.

In base al layout selezionato per il Guenete Leul Palace, 9 dei 10 ingressi MPPT ricevono ciascuno la corrente di una sola stringa; tuttavia, per ottimizzare l'architettura dell'impianto, su un MPPT si prevede l'allacciamento di due stringhe in parallelo. La verifica di compatibilità nel caso più gravoso (due stringhe in parallelo) restituisce i seguenti valori:

$$I_{MPPT1} = I_{N \text{ modulo}} \cdot 2 = 25,4 \text{ A}$$

Confrontando il dato ottenuto con il limite di ingresso dell'inverter (30 A), si conferma il corretto dimensionamento del sistema. L'assenza di fenomeni di clipping di corrente è garantita anche durante i picchi di irraggiamento zenitale tipici dell'altopiano etiopico. Inoltre, considerando eventualmente un prudenziale

incremento del 10% dovuto al contributo bifacciale dei moduli, la corrente complessiva si attesterebbe intorno ai 28 A, rimanendo comunque entro i margini di sicurezza e di operatività del dispositivo.

7. Il numero massimo di moduli per stringa è strettamente influenzato dalla massima tensione accettata dagli MPPT e dalla tensione a vuoto  $U_{OC}$  del singolo modulo fotovoltaico. Nonostante l'inverter supporti una tensione massima in ingresso di 1.100 V, è necessario considerare che a quote elevate la densità dell'aria diminuisce, riducendo di conseguenza la sua rigidità dielettrica. Per compensare la minore capacità isolante e prevenire fenomeni di scarica superficiale o degrado degli isolamenti, si è scelto di adottare un approccio cautelativo, limitando la tensione operativa massima del sistema a 1.000 V.

Assumendo una tensione a circuito aperto  $U_{OC}$  del modulo pari a 48,6 V (opportunamente calcolata in base alla temperatura minima di progetto, ossia 0 °C), il numero massimo di moduli installabili per stringa risulta:

$$N_{S_{MAX}} = \frac{U_{MAX\_INVERTER}}{U_{OC}(T = 0^{\circ}C)} = \frac{1.000 V}{48,6 V} = 20,5 \text{ moduli}$$

Questa configurazione permette di operare stabilmente all'interno del range MPPT dell'inverter (200 V-1.000 V). Un intervallo così ampio garantisce una tempestiva attivazione del sistema alle prime luci dell'alba e una disattivazione posticipata al tramonto, massimizzando la resa energetica anche durante la stagione delle piogge, caratterizzata da un'elevata prevalenza di radiazione diffusa.

## 5.9. Interruttore di manovra-sezionatore (IMS) lato DC

L'inverter Huawei SUN2000-100KTL-M2 integra soluzioni avanzate per la protezione del lato DC, trasformando il concetto di sicurezza da una protezione passiva mediante fusibili ad una attiva e intelligente. È equipaggiato con tre interruttori di manovra-sezionatori DC indipendenti. Non sono semplici interruttori manuali, ma parte integrante del sistema SSLD (Smart String-Level Disconnecter).

I tre sezionatori controllano gruppi distinti di ingressi per gestire i 10 MPPT:

- 1) DC SWITCH 1 protegge gli ingressi degli MPPT 1-2-3-4;
- 2) DC SWITCH 2 protegge gli ingressi degli MPPT 5-6-7;
- 3) DC SWITCH 3 protegge gli ingressi degli MPPT 8-9-10.

A differenza dei sezionatori tradizionali, i modelli con tecnologia SSLD possono scattare automaticamente in millisecondi in caso di guasti gravi come la polarità inversa della stringa o il ritorno di corrente. Questo previene danni ai circuiti interni e riduce drasticamente il rischio di incendio sul lato DC, aspetto cruciale nella scelta di tale inverter in funzione della destinazione d'uso museale del Guenete Leul Palace.

## **5.10. Dimensionamento cavi lato DC**

Il collegamento tra le stringhe fotovoltaiche e i relativi inverter a cui fanno capo è affidato a cavi unipolari solari di tipo H1Z2Z2-K, specificamente progettati per applicazioni fotovoltaiche in conformità alla norma UNI EN 50618. La scelta di questo conduttore è dettata dalle severe condizioni d'esercizio del sito, che impongono requisiti stringenti in termini di resistenza termica, chimica e meccanica. Il cavo H1Z2Z2-K, infatti, è costituito da un conduttore in rame stagnato elettrolitico (che garantisce un'elevata protezione contro l'ossidazione) e da un doppio isolamento in mescola elastomerica reticolata LSZH (Low Smoke Zero Halogen). Tale configurazione assicura la resistenza agli agenti atmosferici, in quanto il rivestimento è ottimizzato per resistere all'esposizione prolungata ai raggi UV, fattore critico nell'altopiano etiopico dove l'irraggiamento è particolarmente intenso a causa dell'altitudine. In aggiunta, il cavo è classificato per una temperatura operativa del conduttore fino a 90°C, con punte di 120°C per 20.000 ore, garantendo un ampio margine di sicurezza rispetto al surriscaldamento dovuto alle perdite Joule prodotto dalle correnti di stringa.



*Figura 26 - Cavi solari H1Z2Z2-K*

I cavi selezionati per connettere le stringhe ai relativi inverter hanno una sezione pari a 6 mm<sup>2</sup> e un valore di resistenza per unità di misura pari a 4,05 Ω/km. Per quanto concerne la lunghezza dei cavi, si prende in considerazione il caso

peggiore, ovvero dalla stringa più lontana al relativo inverter e dunque con una caduta di tensione maggiore rispetto alle altre stringhe.

La scelta di una sezione da 6 mm<sup>2</sup> è figlia della corrente d'impiego I<sub>b</sub> che deve portare (e delle relative condizioni di posa) e si calcola considerando la situazione più gravosa, ossia la corrente di cortocircuito maggiorata del 25%. Le condizioni di posa tengono conto sia delle elevate temperature della copertura dell'edificio nei mesi più caldi, sia del numero di circuiti nel tratto più critico, quello antecedente all'ingresso nell'inverter. La lunghezza complessiva dei cavi lato DC, considerando anche il conduttore di ritorno, risulta pari a circa 20m.

$$\Delta U\% = 2 \cdot \frac{r_{si} \cdot l_{si} \cdot I_{MPP}}{U_{MPP}} \cdot 100$$

in cui:

- $r_{si}$  è la resistenza per unità di lunghezza del cavo che connette la stringa all'inverter;
- $l_{si}$  è la lunghezza complessiva del cavo che connette la stringa all'inverter (a/r);
- $I_{MPP}$  è la corrente nel punto di massima potenza relativa alla stringa;
- $U_{MPP}$  è la tensione nel punto di massima potenza relativa alla stringa.

La portata I<sub>0</sub> del cavo solare da 6 mm<sup>2</sup> in aria libera in posizione non accessibile risulta, dalla relativa scheda tecnica, è di 72 A. I coefficienti di correzione K<sub>1</sub> e K<sub>2</sub> sono definiti dalle norme CEI 64-8 e CEI UNEL 35011.

| Temp. ambiente [°C] | K <sub>1</sub> |
|---------------------|----------------|
| 10                  | 1,15           |
| 20                  | 1,08           |
| 30                  | 1              |
| 40                  | 0,91           |
| 50                  | 0,82           |
| 60                  | 0,71           |
| 70                  | 0,58           |
| 80                  | 0,41           |

Tabella 32 - Valori di K<sub>1</sub> in base alla temperatura

| Numero di circuiti<br>(coppie +/-) | K <sub>2</sub> (posa in tubi o<br>condotti chiusi) |
|------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1                                  | 1                                                  |
| 2                                  | 0,8                                                |
| 3                                  | 0,7                                                |
| 4-5                                | 0,65                                               |
| 6-8                                | 0,57                                               |
| 9 o più                            | 0,50                                               |

Tabella 33 - Valori di K<sub>2</sub> in base al numero di circuiti

Per ottenere il valore finale di portata I<sub>Z</sub> si tiene conto della posa in tubo sul retro dei pannelli con una temperatura esterna massima che può raggiungere, in via del tutto cautelativa, 60°C e che corrisponde a K<sub>1</sub>=0,71. Inoltre, essendo presenti più di 10 circuiti principali DC nel tratto antecedente all'ingresso dell'inverter, bisogna far riferimento ad un coefficiente K<sub>2</sub>=0,50. Per un corretto dimensionamento, il valore di portata finale del cavo I<sub>Z</sub> (corretto con gli opportuni coefficienti correttivi) deve essere maggiore della corrente d'impiego I<sub>b</sub>.

$$I_b = 1,25 \cdot I_{CC} = 16,8 \text{ A}$$

$$I_Z = I_0 \cdot K_1 \cdot K_2 = 25,6 \text{ A}$$

Dove I<sub>CC</sub> è la corrente di cortocircuito del modulo fotovoltaico, pari a 13,47 A.

## 5.11. Dimensionamento dei componenti lato AC

Si procede al dimensionamento dei componenti che compongono l'impianto fotovoltaico dopo la conversione delle grandezze elettriche da continue ad alternate realizzata dai due inverter. In particolare, per ogni tratto di cavo, si valutano le relative criticità al fine di selezionare correttamente il conduttore e il dispositivo che lo protegge.

### 5.11.1. Dimensionamento dei conduttori lato AC

Dall'inverter al relativo quadro d'inverter posizionato nel sottotetto (LPP-RP4 o LPP-RP5, a seconda dell'array analizzato) la lunghezza dei cavi è pari a 2,5 metri (o inferiore). I cavi utilizzati in questo tratto sono unipolari con isolamento in EPR, posati in aria libera in posizione non accessibile e con sezione scelta pari a 50 mm<sup>2</sup>. La loro portata I<sub>0</sub> è di 190 A, mentre la resistenza e la reattanza per unità di lunghezza sono rispettivamente pari a 0,473 Ω/km e 0,101 Ω/km.

Al fine di calcolare la portata finale  $I_Z$  si considera una temperatura esterna di 30 °C e non si prevede la presenza di altri circuiti attivi e, pertanto, i due coefficienti correttivi  $K_1$  e  $K_2$  per la portata sono entrambi unitari. Il vincolo più stringente da soddisfare in questo tratto è sicuramente quello della portata, in quanto la caduta di tensione, essendo un cavo di lunghezza esigua, sarà sicuramente molto bassa.

$$I_b = \frac{P_{INVERTER}}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{100 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 380 \text{ V}} = 151,9 \text{ A}$$

$$I_Z = I_0 \cdot K_1 \cdot K_2 = 190 \text{ A}$$

Per quanto riguarda invece i cavi che collegano i due quadri d'inverter LPP-RP4 e LPP-RP5 al quadro generale di fotovoltaico LPP-PV posizionato nella technical room accanto al quadro generale di bassa tensione MLVSe, sono stati selezionati dei cavi multipolari isolati in EPR di sezione pari a 120 mm<sup>2</sup>. Questa sezione è dovuta alla significativa lunghezza di questo tratto di cavo, pari a circa 100m. In questo tratto, il vincolo più stringente da rispettare non è quello della portata (in questo caso ampiamente rispettato), quanto più quello della caduta di tensione, proporzionale alla lunghezza di cavo stessa. Pertanto, i conduttori selezionati, caratterizzati da notevole superficie conduttrice, sono caratterizzati da bassi valori di resistenza e reattanza per unità di lunghezza (rispettivamente pari a 0,196 Ω/km e 0,083 Ω/km), mentre la portata tabellare  $I_0$  risulta di 382 A. Sono posati sia in aria che a terra, per cui vanno presi ulteriormente in considerazione anche i coefficienti moltiplicativi  $K_3$  e  $K_4$ , rispettivamente pari a 0,98 e 1,06. I coefficienti  $K_1$  e  $K_2$  rimangono unitari.

$$I_Z = I_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 = 396,8 \text{ A}$$

Va considerato infine il cavo di lunghezza pari a 5m che collega il quadro di fotovoltaico al quadro generale di bassa tensione. È stato scelto un cavo unipolare isolato in EPR, posato in aria in posizione non accessibile e di sezione pari a 150 mm<sup>2</sup>. Il vincolo più stringente da rispettare in questo tratto è quello legato alla portata, in virtù della considerevole corrente che lo attraversa, quella prodotta dall'intero campo fotovoltaico. Tale conduttore è caratterizzato da una resistenza di 0,152 Ω/km e da una reattanza di 0,153 Ω/km.

Per il calcolo della caduta di tensione nel lato in corrente alternata, si considera il funzionamento dell'inverter a fattore di potenza unitario e si calcola la caduta di tensione sui conduttori tenendo in considerazione anche il comportamento induttivo dei cavi in alternata.

$$\Delta U\% = \sqrt{3} \cdot \frac{(r \cdot \frac{l}{1000} + x \cdot \frac{l}{1000}) \cdot I_b}{U_N} \cdot 100$$

Sommando infine tutte le cadute di tensioni che intercorrono fra le stringhe fotovoltaiche e il quadro generale di bassa tensione si ottiene una caduta di tensione percentuale del 2,93%, inferiore al 3% preso come limite massimo da non superare.

### 5.11.2. Dimensionamento protezioni lato AC

Per la protezione dei cavi che connettono i due inverter ai relativi quadri d'inverter LPP-RP4 e LPP-RP5 si sceglie il modello Schneider ComPacT NSX160B equipaggiato con differenziale Modulo Vigi MH di Classe B ( $I_{dn}$  300 mA) e potere d'interruzione pari a 25 kVA. Tale scelta permette di rispettare la solita disuguaglianza:

$$I_b < I_N < I_Z$$

$I_b$  rappresenta la corrente d'impiego del tratto di cavo considerato,  $I_N$  la corrente nominale dell'interruttore scelto e  $I_Z$  la portata del cavo considerato. Inoltre, per questi interruttori, il potere d'interruzione di corrente in servizio continuativo è ampiamente superiore alla massima corrente di cortocircuito che può verificarsi.

Per quanto concerne le linee di collegamento tra i quadri inverter e il quadro generale fotovoltaico LPP-PV, è stato selezionato l'interruttore scatolato Schneider ComPacT NSX160F con corrente nominale di 160 A, equipaggiato con differenziale Modulo Vigi MH di Classe B ( $I_{dn}$  500 mA) per il coordinamento della protezione dai contatti indiretti. Il valore della  $I_{dn}$  è superiore rispetto al precedente per rispettare il coordinamento e la selettività delle protezioni.

Infine, per quanto concerne il montante di collegamento tra il quadro generale fotovoltaico LPP-PV e la sbarra del quadro generale di bassa tensione si prevede l'installazione di un interruttore scatolato Schneider ComPacT NSX400F, equipaggiato con unità di sgancio elettronica MicroLogic 2.3 opportunamente tarata per una corrente nominale di 360 A. Tale dispositivo viene installato direttamente nel quadro generale di bassa tensione e serve a proteggere l'impianto dal momento che un eventuale guasto può essere alimentato direttamente dalla rete. Il dispositivo selezionato garantisce un potere di interruzione nominale di servizio  $I_{CS}$  pari a 36 kA, valore ampiamente superiore alla corrente di cortocircuito presunta di 7,5 kA rilevata sulla sbarra del quadro generale.

Integrazione e ottimizzazione fotovoltaica

|    | DA        | A         | I <sub>b</sub> (A) | L (m) | TIPO      | n. di poli | CAVO     | POSA             | I <sub>0</sub> (A) | K <sub>1</sub> | K <sub>2</sub> | S <sub>r</sub> (mm <sup>2</sup> ) | I <sub>z</sub> | r (Ω/km) | x (Ω/km) | ΔV (%) |
|----|-----------|-----------|--------------------|-------|-----------|------------|----------|------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------------------------|----------------|----------|----------|--------|
| DC | stringa   | INV       | 16,8               | 20    | Solare DC | Unipolare  | H1Z2Z2-K | Aria libera (18) | 72                 | 0,71           | 0,5            | 6                                 | 25,6           | 4,05     | -        | 0,67   |
| AC | INV       | LPP-RP4/5 | 151,9              | 2,5   | LATO AC   | Unipolare  | EPR      | Aria libera (18) | 190                | 1              | 1              | 50                                | 190,0          | 0,473    | 0,101    | 0,10   |
|    | LPP-RP4/5 | LPP-PV    | 151,9              | 100   | LATO AC   | Unipolare  | EPR      | Aria libera (18) | 382                | 1              | 0,5            | 120                               | 191,0          | 0,196    | 0,083    | 1,93   |
|    | LPP-PV    | MLVSe     | 334,3              | 5     | LATO AC   | Unipolare  | EPR      | Aria libera (18) | 424                | 1              | 0,9            | 150                               | 381,6          | 0,152    | 0,153    | 0,23   |

| DA        | A         | S (mm <sup>2</sup> ) | I <sub>b</sub> (A) | I <sub>z</sub> (A) | I <sub>cc</sub> (kA) | Interruttore                                                                              | I <sub>N</sub> (A) | I <sub>r</sub> (A) | I <sub>cs</sub> (kA) | I <sub>m</sub> (A) |
|-----------|-----------|----------------------|--------------------|--------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| INV       | LPP-RP4/5 | 50                   | 151,9              | 190                | 7,5                  | ComPacT NSX160B + I <sub>dn</sub> 300 mA (Modulo Vigi MH di Classe B)                     | 160                | 1                  | 25                   | 1.600              |
| LPP-RP4/5 | LPP-PV    | 120                  | 151,9              | 396,8              | 7,5                  | ComPacT NSX160B + I <sub>dn</sub> 500 mA (Modulo Vigi MH di Classe B)                     | 160                | 1                  | 25                   | 1.600              |
| LPP-PV    | MLVSe     | 150                  | 303,9              | 381,6              | 7,5                  | ComPacT NSX400F con sganciatore elettronico MicroLogic 2.3 con Trip Unit 400 A regolabile | 360                | 0,9                | 36                   | 3.600              |

## Capitolo 6

### 6. Sistemi speciali

Il presente capitolo illustra una parte del progetto sviluppata prevalentemente dal collega laureando Ing. Edoardo Graziano, ovvero la progettazione preliminare dei sistemi speciali. Tali sistemi sono intesi come l'insieme degli apparati ausiliari necessari a garantire la sicurezza delle persone, la tutela dei beni museali e l'efficienza funzionale del Guenete Leul Palace. In un edificio di tale rilevanza storica e architettonica, la componente tecnologica non deve solo rispondere a stringenti requisiti prestazionali e normativi, ma deve integrarsi armoniosamente con le strutture preesistenti, seguendo i principi di minima invasività e reversibilità. L'obiettivo è delineare un'architettura digitale integrata che, alimentata dal livello massimo di continuità, sia capace di trasformare il complesso monumentale in un organismo moderno, resiliente e protetto.

La progettazione degli impianti speciali all'interno del Guenete Leul Palace deve essere intesa come lo sviluppo di un "sistema nervoso" digitale capace di interagire con la materia storica senza alterarne l'identità. In un edificio che ha visto stratificarsi funzioni imperiali, coloniali e accademiche, la sfida ingegneristica consiste nel garantire livelli di sicurezza contemporanei attraverso soluzioni che rispettino i vincoli del restauro conservativo. La filosofia alla base dell'intervento si fonda sul concetto di ingegneria della compatibilità, dove ogni scelta tecnica viene vagliata in funzione della sua reversibilità e del minimo impatto visivo. In questa prospettiva, i sistemi speciali non operano in compartimenti stagni, ma convergono verso una piattaforma di gestione integrata che trae forza dalla resilienza elettrica definita nei capitoli precedenti. L'alimentazione di questi apparati è infatti garantita dal quadro ad essi dedicato (UPP-GF5), posizionato nella control room e direttamente alimentato dal sistema UPS, assicurando che la protezione delle opere e delle persone rimanga attiva anche nelle condizioni di criticità energetica tipiche del contesto di Addis Abeba.

## 6.1. Prevenzione incendi

La tutela della vita umana e la salvaguardia dell'integrità del patrimonio culturale del palazzo sono garantiti dal sistema di rivelazione ed allarme incendio, la cui configurazione segue rigorosamente i dettami della norma UNI 9795 e le specifiche della serie europea EN 54. Data la conformazione dell'edificio, si è optato per una tecnologia di tipo analogico indirizzabile organizzata in loop chiusi. Questa architettura consente alla centrale di controllo, posizionata nella control room, di interrogare costantemente ogni singolo dispositivo, ricevendo informazioni precise non solo sull'eventuale stato di allarme, ma anche su parametri diagnostici quali il livello di polverizzazione dei sensori o eventuali anomalie di comunicazione. La chiusura dell'anello garantisce che, anche in caso di interruzione accidentale del cavo in un punto del percorso, la comunicazione tra i sensori e la centrale rimanga integra, una caratteristica essenziale in un cantiere di restauro dove le operazioni di manutenzione possono essere frequenti.

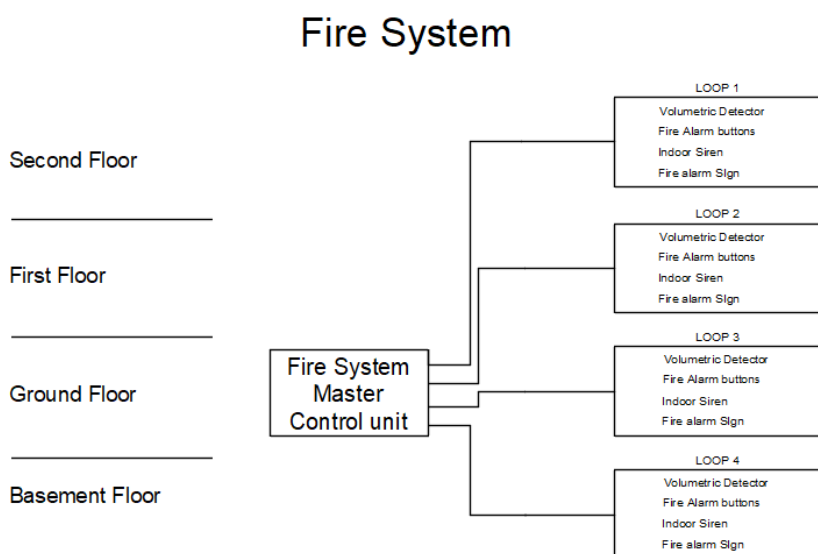


Figura 27 - Schema a blocchi del sistema antincendio

Particolare attenzione è stata dedicata ai locali caratterizzati da soffitti a cassettoni in legno pregiato (come l'ex Sala dei Banchetti (oggi Biblioteca IES) e la Ras Makonnen Hall), dove l'installazione di rilevatori puntiformi risulterebbe eccessivamente invasiva e tecnicamente meno efficace a causa delle elevate altezze e dei flussi d'aria naturali. In questi ambienti è stata prevista l'implementazione di sistemi di rivelazione fumi ad aspirazione (ASD) conformi alla ISO 7240-20. Tale tecnologia opera mediante una rete di tubazioni capillari, mimetizzate nelle modanature architettoniche, che prelevano costantemente campioni d'aria

convogliandoli verso una camera di analisi laser ad alta sensibilità. Questo approccio permette di identificare la presenza di prodotti di combustione già nella fase di pirolisi, fornendo un margine di tempo prezioso per l'intervento del personale prima che si sviluppino fiamme aperte.

## 6.2. Videosorveglianza (CCTV) e controllo accessi

La protezione contro atti vandalici, furti o intrusioni richiede un apparato di videosorveglianza basato su logiche predittive e standard di alta risoluzione. Il progetto segue le linee guida della norma IEC 62676. Nelle zone di accesso e nei corridoi principali, il sistema è dimensionato per garantire il riconoscimento e l'identificazione certa dei soggetti, mentre nelle aree esterne si privilegia la funzione di rilevamento e osservazione. Tutte le telecamere impiegate sono di tipo IP e sfruttano la tecnologia Power over Ethernet (PoE), eliminando la necessità di cablaggi elettrici dedicati e centralizzando la gestione della continuità operativa nella control room. L'uso di algoritmi di analisi video integrati a bordo camera permette di generare allarmi automatici in caso di superamento di linee virtuali o permanenza prolungata in zone sensibili, riducendo il carico cognitivo per gli operatori in postazione.

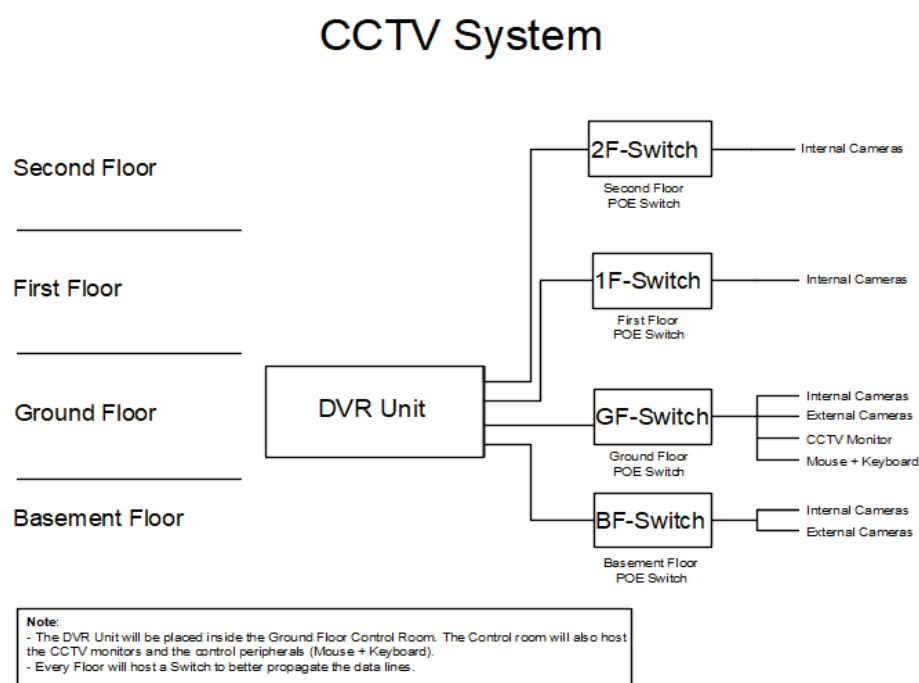


Figura 28 - Schema a blocchi del sistema di videosorveglianza (CCTV)

Il sistema antintrusione si affianca alla videosorveglianza per creare una difesa stratificata conforme al Grado 3 della norma EN 50131. Questo livello di protezione è necessario per un edificio che ospita i manoscritti e i manufatti dell'Institute of Ethiopian Studies, considerati beni di interesse nazionale. La protezione perimetrale è garantita da contatti magnetici ad alta sicurezza installati sugli infissi storici, mentre la protezione volumetrica interna utilizza sensori a doppia tecnologia (infrarosso e microonda) capaci di discriminare piccole fluttuazioni termiche. L'integrazione tra i due sistemi consente la videoverifica immediata: al momento dell'attivazione di un sensore antintrusione, il software di gestione visualizza automaticamente il flusso video corrispondente, permettendo una valutazione in tempo reale della minaccia e minimizzando gli interventi legati a falsi allarmi.

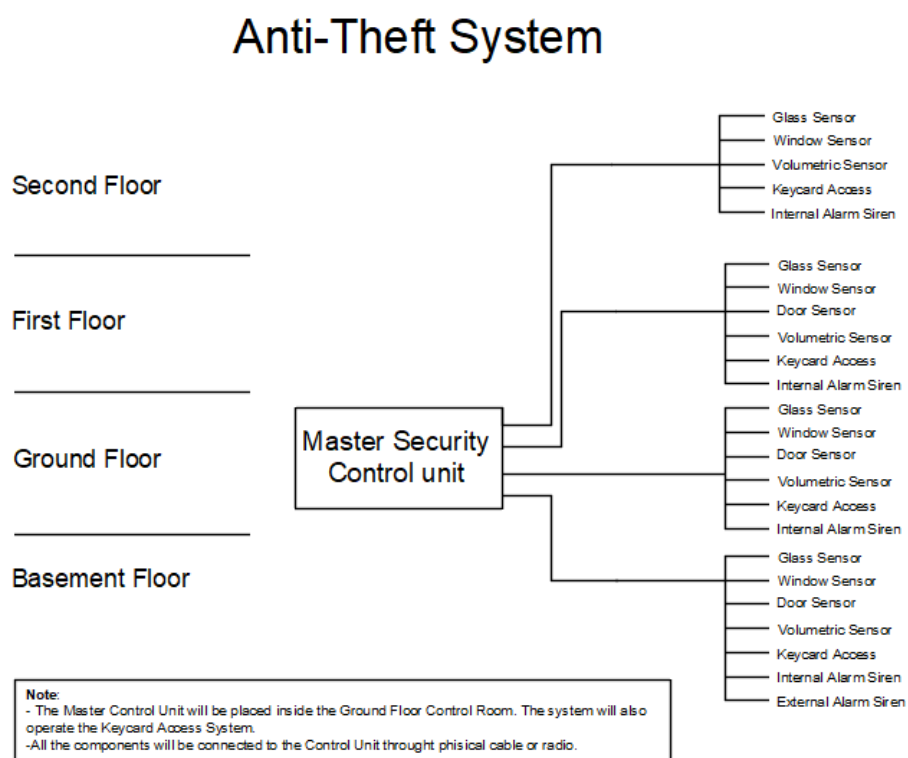


Figura 29 - Schema a blocchi del sistema antintrusione

### 6.3. Sistema EVAC

In caso di emergenza, la chiarezza e l'ordine delle istruzioni fornite al pubblico sono determinanti per il successo delle procedure di esodo. Per tale ragione, il Guenete Leul Palace è dotato di un impianto di diffusione sonora EVAC per scopi di emergenza progettato in conformità alla norma CEI EN 50849 e certificato

secondo la EN 54-16. A differenza dei sistemi di allarme tradizionali, l'EVAC consente la diffusione di messaggi vocali mirati che informano i visitatori sulla natura del pericolo e sul percorso di uscita più sicuro, evitando la confusione tipica delle sirene bitonali. La progettazione elettroacustica ha tenuto conto della posizione e la potenza dei diffusori per garantire un indice di intelligibilità del parlato superiore ai limiti minimi normativi in ogni angolo del museo.

## Info/EVAC System

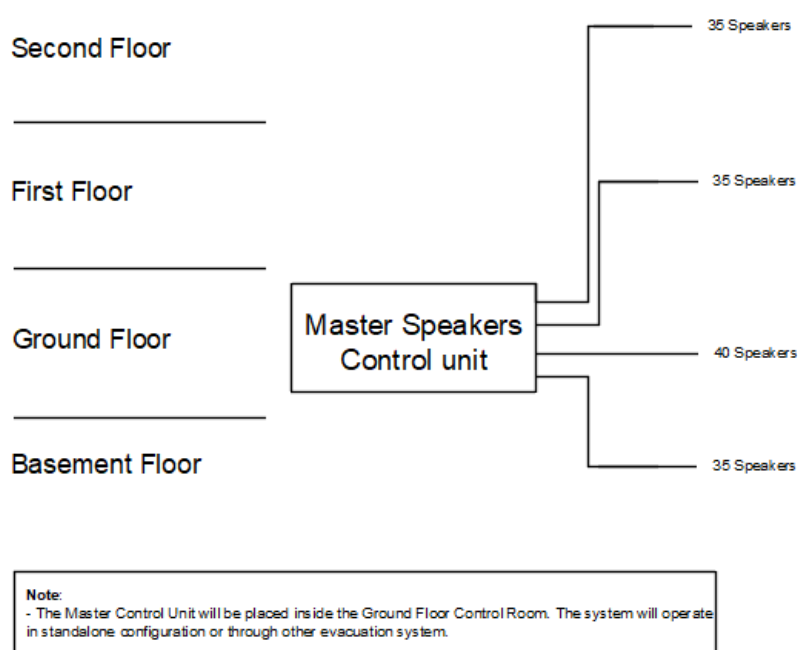


Figura 30 - Schema a blocchi dell'impianto audio e annunci EVAC

L'architettura del sistema EVAC è di tipo ridondante, con amplificatori in configurazione di riserva a caldo e linee di altoparlanti monitorate costantemente contro cortocircuiti o interruzioni. La centrale di amplificazione riceve alimentazione prioritaria dal sistema UPS, garantendo il funzionamento per almeno 60 minuti in caso di blackout totale, tempo ampiamente superiore a quello stimato per lo sgombero completo dell'edificio. Oltre alla funzione di sicurezza, il sistema può essere utilizzato per la diffusione di annunci informativi o musica d'ambiente durante l'orario di apertura, garantendo una flessibilità operativa che valorizza l'esperienza museale senza mai compromettere la priorità assoluta dei segnali di emergenza, i quali hanno sempre la precedenza assoluta su qualsiasi altra trasmissione audio.

## 6.4. Cablaggio strutturato ad alte prestazioni

Il sostegno tecnologico a tutti i sistemi sopra descritti è fornito da un'infrastruttura di cablaggio strutturato progettata secondo lo standard ISO/IEC 11801. La scelta della Categoria 6A per i collegamenti in rame e della fibra ottica multimodale per i dorsali verticali risponde alla necessità di supportare larghezze di banda fino a 10 Gigabit Ethernet, preparando l'edificio a future evoluzioni dei servizi digitali. La rete dati del palazzo non è solo una utility amministrativa, ma rappresenta il mezzo attraverso cui il museo interagisce con i visitatori moderni tramite guide multimediali, sistemi di realtà aumentata e connettività Wi-Fi ad alta densità.

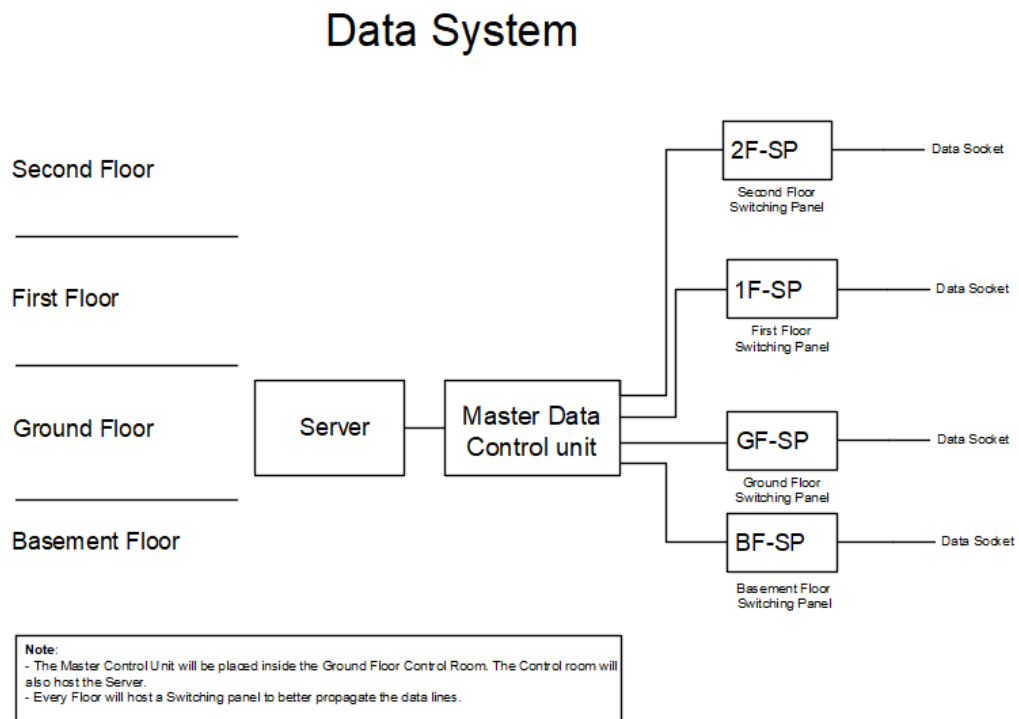


Figura 40 - Schema a blocchi del sistema di trasmissione dati

## Capitolo 7

# 7. Conclusione

La riqualificazione dell'infrastruttura elettrica del Guenete Leul Palace ha rappresentato un esercizio di sintesi multidisciplinare in cui l'analisi storica, il rigore normativo e l'avanguardia tecnologica si sono fusi per restituire una nuova funzionalità ad un simbolo della sovranità e della cultura etiope. La prima fase di questo studio ha permesso di comprendere come l'edificio sia un palinsesto stratificato di eventi storici, dalla committenza imperiale di Haile Selassie I alla parentesi dell'occupazione italiana, fino alla sua definitiva consacrazione come sede dell'Addis Ababa University. In questo contesto, l'intervento tecnico è stato inteso come strumento di valorizzazione di uno spazio che ha vissuto traumi profondi (come il massacro del 1960) e che sta per rinascere grazie alla cooperazione scientifica tra il Politecnico di Torino, l'Agenzia Italiana per la Cooperazione allo Sviluppo e l'Addis Ababa University.

Il quadro metodologico si è fondato su una complessa armonizzazione normativa, necessaria per navigare tra i codici nazionali Ethiopian Building Code Standards (EBCS) e i più elevati standard internazionali IEC e ISO. Questa solidità procedurale è stata estesa all'analisi economica, dove l'assenza di prezzari locali ufficiali ha imposto l'adozione di una strategia di stima parametrica-comparativa. Utilizzando i benchmark d'eccellenza del Castello Carrarese di Padova e di Casa Miroglio ad Alba, opportunamente aggiornati e riscaldati rispetto alla superficie del Guenete Leul, è stato possibile definire un budget previsionale di 207 €/m<sup>2</sup>, valore in linea alla destinazione d'uso museale dell'edificio. Tale analisi ha dunque permesso di delineare indicativamente la quota parte del budget a disposizione alla componente impiantistica dell'edificio.

Il dimensionamento preliminare dell'impianto elettrico ha affrontato le peculiari criticità operative di Addis Abeba, caratterizzata da un'altitudine di oltre 2.350 metri e da una frequente instabilità della rete elettrica. L'infrastruttura elettrica è stata concepita secondo una strategia di resilienza operativa assoluta, classificando l'intero spettro dei carichi come utenze privilegiate per garantirne l'alimentazione anche in caso di blackout della rete. Per ovviare a ciò, è stato

selezionato un gruppo elettrogeno da 380 kVA, in grado di soddisfare la richiesta energetica dell'intero edificio. Parallelamente, la determinazione della potenza del trasformatore ha richiesto un'analisi rigorosa del declassamento termico ai sensi della norma IEC 60076, resa necessaria dalle condizioni altimetriche della città. La scelta finale di una macchina isolata in resina da 400 kVA risponde dunque all'esigenza tecnica di compensare la minor densità dell'aria e la conseguente riduzione della capacità dissipativa convettiva, assicurando stabilità operativa e rendimenti elevati nonostante le sollecitazioni termiche.

L'impianto elettrico ha infine previsto l'integrazione di un sistema fotovoltaico, segnando il passaggio verso l'autonomia energetica e la sostenibilità del complesso. Attraverso un workflow di Generative Design basato su un algoritmo NSGA-II, è stata individuata la configurazione ottimale da 215,6 kWp, composta da 440 moduli. La produzione stimata di oltre 350 MWh annui, favorita da un irraggiamento specifico elevatissimo e da un regime termico mite che limita le perdite, assicura un ritorno dell'investimento in soli tre anni, dimostrando l'eccezionale fattibilità della tecnologia solare in contesti equatoriali d'altitudine.

Infine, la sicurezza del patrimonio e delle persone è stata affidata a sistemi speciali stratificati alimentati con continuità assoluta dal quadro UPP-GF5 posizionato nella Control Room, a sua volta direttamente alimentato da un UPS centralizzato da 30 kVA.

In conclusione, quanto sviluppato in questa tesi costituisce la base scientifica e tecnica per la successiva fase di progettazione esecutiva, durante la quale le soluzioni preliminari saranno dapprima verificate e poi tradotte in piani installativi di dettaglio e computi definitivi. L'auspicio è che questo lavoro possa fungere da modello paradigmatico per il restauro impiantistico in Africa, dove la tecnologia più avanzata deve essere silenziosamente asservita alla memoria storica di una nazione.

## Bibliografia

- [1] M. B. e. G. Chiari, in *Una capitale per l'Africa*, 2004.
- [2] G. Podestà, «Sviluppo industriale e colonialismo. L'esperienza dell'Africa Orientale Italiana (1936-1941)».
- [3] Santangelo, «Analisi delle imprese coloniali in AOI».
- [4] G. L. Podestà, *Il mito dell'impero. Economia, politica e lavoro nelle colonie italiane dell'Africa orientale 1898-1941*.
- [5] A. -. A. I. p. I. C. a. Sviluppo, «Relazione tecnica: Progetto di restauro e riqualificazione del Museo Etnografico di Addis Abeba,» 2024.
- [6] I. E. Commission, «Power transformers - Part 1: power transofrmers».
- [7] I. E. Commission, «IEC 60909-0, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents».
- [8] I. E. Commission, «IEC 60364-5-56:2018, Low-voltage electrical installations - Part 5-56: Selection and erection of electrical equipment - Safety services, Ed. 3.0, Nov. 2018.».
- [9] UNI-EN, «UNI EN 81-20, Regole di sicurezza per la costruzione e l'installazione degli ascensori - Ascensori per il trasporto di persone e cose.».
- [10] U. E. 81-70, «Regole di sicurezza per la costruzione e l'installazione degli ascensori - Accessibilità agli ascensori delle persone, compresi i disabili.».
- [11] E. 15759-1, «Conservation of cultural heritage - Indoor climate - Part 1: Guidelines for heating historic buildings».
- [12] I. E. Commission, «IEC 60364-8-1, Low-voltage electrical installations - Part 8-1: Functional aspects - Energy efficiency.».
- [13] C. E. Italiano, «CEI 64-8, Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in c.a. e 1500 V in c.c. (riferimento principale per la progettazione in bassa tensione)».
- [14] I. E. Commission, «IEC 61439, Low-voltage switchgear and controlgear assemblies - Part 1: General rules».

- [15] I. E. Commission, «IEC 60502-1, Power cables with extruded insulation for rated voltages from 1 kV up to 30 kV».
- [16] C. E. Italiano, «CEI UNEL 35026, Cavi elettrici - Portate di corrente in regime permanente per posa in aria, Comitato Elettrotecnico Italiano,» 2021.
- [17] I. E. Commission, «IEC 60364-4-41, Low-voltage electrical installations - Part 4: Protection for safety».
- [18] M. o. W. a. U. Development, «EBCS 10: Electrical Installation of Buildings, Section 27: "Special Installations or Locations", Ethiopian Building Code Standard, Addis Ababa, Ethiopia,» 2014.
- [19] C. E. Italiano, «CEI 0-21, Regola tecnica di riferimento per la connessione di Utenti attivi e passivi alle reti BT delle imprese distributrici di energia elettrica,» 2022.
- [20] E. N. I. d. Unificazione, «UNI 9795:2021, Sistemi fissi di rivelazione e di segnalazione allarme d'incendio - Progettazione, installazione ed esercizio».
- [21] «EN 54-16:2008, Fire detection and fire alarm systems - Part 16: Voice alarm control and indicating equipment, European Committee for Standardization».
- [22] C. E. Italiano, «CEI EN 50849: Sistemi di diffusione sonora per scopi di emergenza».
- [23] I. E. Commission, «IEC 62676: Video surveillance systems for use in security applications, International Electrotechnical Commission».
- [24] C. d. Padova, «Progetto Esecutivo: Restauro e riqualificazione Castello Carrarese - Impianti Elettrici,» 2018.
- [25] C. d. Alba, «Progetto di recupero ed efficientamento Casa Miroglio,» 2023.
- [26] J. R. C. (. European Commission, «Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS),» [Online]. Available: <https://re.jrc.ec.europa.eu/>.
- [27] C. Serato, «Sviluppo di un workflow BIM-based per la progettazione parametrica e generativa di impianti fotovoltaici».
- [28] A. S. GmbH, «Technical Datasheet: Aurora Series AE MD-132BD Bifacial Double-Glass (485Wp-505Wp) - Monocrystalline Silicon Photovoltaic Module,» [Online]. Available: <https://ae-solar.com/>.
- [29] L. Huawei Technologies Co., «Technical Specification: SUN2000-100KTL-M1 Smart PV Inverter (100kW, 10 MPPTs) - User Manual and Datasheet,» [Online]. Available: <https://solar.huawei.com/>.

[30] Norma, *CEI EN 50618, cavi elettrici per impianti fotovoltaici*, 2015-12.

[31] Norma, *CEI EN IEC 60904-2, dispositivi fotovoltaici*, 2023-11.