

Geotermia per l'antico Egitto

IL PROGETTO DI RIFUNZIONALIZZAZIONE, RESTAURO E AMPLIAMENTO DEL MUSEO EGIZIO DI TORINO È L'OCCASIONE PER APPROFONDIRE ASPETTI TECNICI, ENERGETICI ED ECONOMICI CONNESSI ALLA RIQUALIFICAZIONE DI UN IMPORTANTE EDIFICIO STORICO.

Il rinnovato Museo Egizio di Torino, ospitato in un edificio seicentesco, è stato recentemente restaurato e utilizza soluzioni impiantistiche basate sull'uso efficiente ed economico della sorgente geotermica (Georgius LXXXIX).



COMMITTENTE

FONDAZIONE MUSEO DELLE ANTICHITÀ EGIZIE DI TORINO

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

ARCH. SERGIO MORO (FINO AL 2009), ING. ANDREA CONCI

ARCHITETTURA

ISOLARCHITETTI (A. ISOLA, S. ISOLA, F. BRUNA, M. BATTAGLIA, A. BONDONIO, S. PEYRETTI), I.C.I.S. PROF. ARCH. CARLO AYMONINO

RESTAURO ARCHITETTONICO

PROF. ARCH. PAOLO MARCONI, ARCH. GIANCARLO BATTISTA, ARCH. MARCO GRIMALDI, DOTT.SSA MARIA GABRIELLA DE MONTE

ALLESTIMENTI SCENOGRAFICI E MUSEALI

MAESTRO DANTE FERRETTI, ISOLARCHITETTI

STRUTTURE, GEOTECNICA E SOTTOSERVIZI

I.C.I.S. ING. GIUSEPPE DONNA

IMPIANTI TERMOMECCANICI

PROECO, ING. GIUSEPPE BONFANTE, PER. IND. FRANCO PAUTASSO

IMPIANTI ELETTRICI E SPECIALI

ITACA, ROBERTO BELLUCCI SESSA, ING. STEFANO QUINTANO

ECOSOSTENIBILITÀ, COMFORT AMBIENTALE

ONLECO

DIREZIONE LAVORI

ARCH. COSIMO TURVANI (I.C.I.S.)

APPALTATORE GENERALE DEI LAVORI

ZOPPOLI & PULCHER

SUBAPPALTATORE IMPIANTI MECCANICI

PUSSETTO E POLLANO

I FORNITORI

POMPE DI CALORE: CLIMAVENETA

ELETTROPOMPE: GRUNDFOS

VENTILCONVETTORI A MOBILETTO: SABIANA

DIFFUSORI: TROX

CALDAIE A CONDENSAZIONE: BALTUR

PANNELLI RADIANTI: ERCOS

SCAMBIATORE CALORE: TECNOSYSTEM

SISTEMI DI ESPANSIONE: PENUMATEX

UNITÀ TRATTAMENTO ARIA: NOVAIR

SISTEMA DI UMIDIFICAZIONE: LUFTA

VENTILCONVETTORI DA INCASSO: EUROCLIMA

BUILDING MANAGEMENT SYSTEM: SIEMENS

Il Museo delle Antichità Egizie di Torino custodisce oltre trentamila reperti dal paleolitico all'era copta, fra i più importanti esistenti al mondo, raccolti a partire dalla metà del Settecento e conservati, da quasi due secoli, all'interno del seicentesco Palazzo dell'Accademia delle Scienze, eretto nel centro della città su disegno di Guarino Guarini.

Concluse recentemente su progetto del gruppo guidato da Isolarchitetti, le opere per l'ampliamento, la rifunzionalizzazione e l'adeguamento dei fabbricati e degli impianti tecnologici costituiscono un esempio di riqualificazione di una struttura di altissimo valore culturale, effettuata senza interrompere l'attività museale.

Contestualmente ai lavori è stata condotta una complessa attività di riorganizzazione dell'allestimento museografico, che ha restituito un'architettura completamente rinnovata e integrata con un percorso museale moderno e ricco di suggestioni, basato su tecniche conservative all'avanguardia.

Il progetto degli impianti termomeccanici, curato interamente dallo studio torinese Proeco, si distingue sia per il ricorso a un sistema basato su pompe di calore geotermiche, risultato di un'attenta revisione in corso d'opera delle originarie previsioni, sia per l'attenzione agli aspetti energetici e di comfort ambientale degli spazi espositivi.

Il museo in sintesi

Oggi i visitatori del museo attraversano la corte del palazzo, entrando nella "manica Schiaparelli" che ospita la biblioteca e la caffetteria. Biglietteria, guardaroba, book shop, laboratori e servizi sono situati al primo piano ipogeo, illuminato da ampi lucernari, dal quale veloci scale mobili conducono al più alto piano museale.

Il percorso di sviluppo per circa due chilometri, attraverso spazi varia-



Il percorso espositivo di snoda attraverso ampie spazi fittamente allestiti con vetrine: in sede di progettazione è stata effettuata una simulazione fluidodinamica esemplificativa dei flussi dell'aria di rinnovo in una sala-tipo [Ivan Lombardo - Isolarchitetti].

Per offrire un'ambientazione suggestiva, la presenza dei terminali impiantistici è quasi completamente celata: nell'immagine, oltre all'illuminazione artificiale, si notano solo le griglie di ventilazione a soffitto [Ivan Lombardo Isolarchitetti].



mente caratterizzati dalle affascinanti ambientazioni e dall'impiego di teche essenziali e tecnologicamente sofisticate, alle quali è affidato anche il mantenimento delle condizioni ambientali ideali alla conservazione dei reperti.

Oltre alle opere più significative, come quelle conservate nella Galleria dei Sarcofagi, il rinnovato museo espone numerosi pezzi rimasti per anni nei depositi. Oltrepassate le sale auliche e le gallerie situate ai piani inferiori, la visita termina con la mostra di alcuni precedenti allestimenti, concludendosi in corrispondenza dello scalone ottocentesco. Gli interventi realizzati hanno interessato la rifunzionalizzazione e il restauro delle cosiddette "maniche" laterali (piani dal primo interrato al terzo, compresi gli ammezzati) e "manica Schiaparelli" (piani dal secondo interrato al primo, compresi gli ammezzati), oltre alla costruzione di un ampliamento ipogeo su due livelli, con la tecnica del top-down, situato sotto il cortile interno. Complessivamente i lavori sono costati quasi 47 milioni di euro, di cui 20 erogati da enti regionali e locali.

Gli interventi edili sulle parti esistenti (superficie utile circa 10.000 m²; vo-



LA PAROLA AI PROGETTISTI

L'ing. Giuseppe Bonfante e il per. ind. Franco Pautasso sono soci della PROECO: «Nell'ambito della commessa per il Museo Egizio ci siamo occupati direttamente della progettazione e direzione dei lavori relativi agli impianti termomeccanici. Il raggruppamento ha inoltre affidato alla nostra partner ONLECO la consulenza integrata per gli aspetti connessi all'acustica, alla sostenibilità, al comfort e all'illuminotecnica».

Quali ragioni hanno spinto alla revisione del progetto originario?

«L'intera iniziativa si è distinta per la ricerca di soluzioni d'eccellenza. L'impiego delle pompe di calore era contemplato in sede di progetto definitivo ma, per questioni eminentemente economiche, nell'esecutivo furono stati previsti solo i gruppi frigoriferi.

Successivamente la committenza ha sollecitato l'adozione di soluzioni caratterizzate da un elevato grado di sostenibilità, perciò abbiamo aggiornato il progetto conseguendo un significativo incremento dell'efficienza energetica».

Qual è stato l'aspetto più caratterizzante del progetto?

«Nonostante le dimensioni del fabbricato, ci sono pochissimi casi di ripetitività. Le soluzioni adottate sono molteplici e anche due locali all'apparenza simili presentano soluzioni impiantistiche differenti, per tipologia e per realizzazione. Abbiamo dovuto escogitare soluzioni da noi mai utilizzate in precedenza, per cercare di fornire a tutti i locali la dotazione impiantistica necessaria al raggiungimento degli obiettivi microclimatici imposti, superando problemi quali, ad esempio, la mancanza di controsoffitti nei locali aulici, oppure difficoltà di raggiungere alcuni ambienti per la presenza di zone "off-limit", determinate da vincoli della soprintendenza o per condizioni logistiche legate alle varie fasi in cui si sarebbe sviluppato il cantiere».

Quali sono state le principali difficoltà incontrate in fase di realizzazione?

«L'intervento sugli edifici storici comporta sempre notevoli complessità soprattutto per la distribuzione delle reti, ma le accurate indagini conoscitive ci hanno permesso di affrontare il cantiere senza problematiche particolari: solo il ritrovamento di reperti archeologici ci ha costretto a modificare il tracciato di alcuni impianti. Il momento più impegnativo e spettacolare l'abbiamo vissuto durante il trasporto delle pompe di calore: le macchine, pesanti quattro tonnellate, sono state infatti sollevate dalla gru di cantiere passando sopra l'edificio».

Qual è stata la maggiore soddisfazione?

«Si è trattato di un incarico prestigioso, per il quale siamo consapevoli di aver fatto quanto di meglio era possibile dal punto di vista tecnologico, energetico e anche dal punto di vista della conservazione dei reperti storici, compatibilmente con le risorse a disposizione. Ora è in corso il collaudo funzionale che, finora, ha restituito risultati in linea con le aspettative, perciò possiamo dirci senz'altro soddisfatti del lavoro compiuto».



Ing. Giuseppe Bonfante PROECO



Per. ind. Franco Pautasso, PROECO

lumetria climatizzata di circa 50.000 m³) sono stati condotti anche con l'obiettivo di migliorare le prestazioni energetiche dell'involucro, mediante:

- isolamento delle superfici dispendenti verso aree e locali non riscaldati (pavimento del primo piano verso il porticato, soffitto del terzo piano verso il sottotetto, etc.);

- sostituzione degli infissi con nuovi serramenti in legno e vetro camera e inserimento in copertura di nuovi lucernari in alluminio taglio termico e vetro camera.

Il sistema geotermico

Gli impianti di climatizzazione esistenti nel museo sono stati completamente sostituiti, realizzando nuove centrali idrico-sanitaria, termica e frigorifera, oltre alle nuove unità di trattamento dell'aria, con relative reti di distribuzione dirette ai terminali in ambiente, tutti di nuova installazione.

L'originaria soluzione progettuale è stata oggetto di una variante in corso d'opera, che ha previsto l'impiego di pompe di calore con circuito di scambio geotermico a ciclo aperto. Tale soluzione consente la produzione contemporanea di acqua calda e refrigerata, in modo da massimizza-

Sezione longitudinale del museo, con individuazione delle funzioni principali (immagini non realistiche): le 5 centrali impiantistiche occupano parte dei livelli interrati e i sottotetti (Isolarchitetti).



- 1 - UFFICI DIREZIONE
- 2 - MEDIO REGNO
- 3 - NUOVO REGNO
- 4 - DEIREL-MEDINA
- 5 - TOMBA DI KHA
- 6 - GALLERIA DEI RE
- 7 - DEPOSITI
- 8 - CORTE IPOGEA, BIGLIETTERIA
- 9 - DEPOSITI
- 10 - ACCADEMIA DELLE SCIENZE
- 11 - ROOF GARDEN / CAFFETTERIA



Una delle sale museali durante i lavori. In generale, nelle sale espositive sono presenti impianti a pannelli radianti a pavimento e di ventilazione meccanica controllata (Proeco).



Vista interna della vasca di restituzione dell'acqua alla falda, durante i lavori di costruzione: l'invaso (107 m³) ha lo scopo di ricevere l'acqua in uscita dagli scambiatori di calore ed equilibrare la portata al pozzo (Proeco).

re l'efficienza del sistema specie durante le stagioni di transizione.

L'impianto di utilizzo dell'acqua di falda comprende:

- 2 pozzi di emungimento (25 l/s), ciascuno dotato di 2 elettropompe sommerse per la regolazione automatica della portata in funzione del livello dell'acqua nella vasca di accumulo;
- 1 pozzo per la restituzione dell'acqua alla falda (50 l/s);
- il sistema di stoccaggio.

Quest'ultimo avviene in una vasca sotterranea (214 m³ complessivi) divisa in due sezioni di pari capacità per:

- l'accumulo, come sorgente termica invernale e per raffreddare i condensatori in estate;
- la restituzione (la vasca è termicamente isolata), per equilibrare la portata immessa nel relativo pozzo. Nella prima sono installate 3 elettropompe sommerse, per l'alimentazione degli scambiatori di calore. La seconda vasca dispone di 2 elettropompe sommerse destinate allo svuotamento; altre due elettropompe sommergibili sono situate nel pozzetto di svuotamento, per il sollevamento delle acque tecnologiche. Tutte le elettropompe sono dotate di inverter.

Lo scambio termico fra le pompe di calore, situate nella centrale frigorifera ipogea, e la sorgente geotermica

(acqua a 14,5 °C in inverno e 15 °C in estate) è affidato a due serie (invernale ed estiva) di scambiatori di calore a piastre, più quello preposto allo scambio con la centrale termica.

Le centrali frigorifera e termica

I fluidi refrigerati sono prodotti da 3 gruppi con funzionamento in pompa di calore (857 kWf e 863 kWt ciascuno), equipaggiati con compressore a vite e raffreddati ad acqua di falda. Di questi, 2 funzionano in cascata, mentre il terzo è di riserva.

Oltre all'acqua refrigerata (7 °C), la centrale frigorifera produce acqua calda (45 °C) destinata alle utenze a bassa temperatura e igienico-sanitarie. L'acqua utilizzata per lo scambio termico è restituita alla falda a di 8,5 °C (T minima), in inverno, e a 25 °C (T massima), in estate. In centrale sono inoltre presenti i collettori generali di mandata e ritorno dell'acqua di falda, refrigerata e calda, più i dispositivi di circolazione dei circuiti primari (acqua calda e refrigerata per le pompe di calore; acqua calda a bassa temperatura e acqua refrigerata per le utenze).

La stima del risparmio

L'ing. Lorenzo Balsamelli (Onleco) ha curato l'analisi del risparmio energetico conseguente la soluzione di variante, calcolando il fabbisogno energetico secondo la procedura di calcolo semplificata della UNI TS 11300 (verifica della prestazione energetica invernale degli edifici e relativa certificazione), facendo riferimento al modello di calcolo del progetto (Legge 10/91, art. 28).

Sono state considerate tutte le utenze a bassa temperatura alimentate dalle pompe di calore del Museo, confrontando i risultati ottenuti considerando la configurazione della centrale termica prevista dal progetto e dalla variante, tenendo conto anche dei rendimenti di distribuzione, emissione e regolazione. Per le caldaie a condensazione è stato

utilizzato il metodo indicato dalla UNI TS 11300-2, mentre il COP medio annuale per le pompe di calore è stato determinato secondo due diverse modalità:

- media ponderata dei COP medi mensili, ricavati in base alle curve di rendimento ai carichi parziali fornita dal costruttore, rapportando il fabbisogno mensile alle ore di funzionamento dello stesso mese.
- media dei COP relativi alle condizioni di funzionamento di ogni ora del giorno medio mensile, per tutti i mesi di riscaldamento (questo metodo ha restituito un COP medio annuale più elevato). Partendo dal fabbisogno energetico medio mensile fornito dalla UNI TS 11300, la ricostruzione del profilo del



Molte delle u.t.a. sono distribuite nei sottotetti: anche a causa dei vincoli esistenti sull'edificio, alcune delle prese d'aria e delle estrazioni sono state delocalizzate rispetto alla posizione delle macchine (Proeco).

Ubicata nel sottotetto, la centrale termica è composta da 2 caldaie a condensazione alimentate a gas metano (850 kW ciascuna), dotate di bruciatori premiscelati (modulazione 30÷100%) a basse emissioni di NOx e di sistemi di neutralizzazione e scarico della condensa, con relative elettropompe di rilancio verso la rete di scarico. Le caldaie producono acqua calda (70 °C) per le utenze ad alta temperatura del Museo e dell'Accademia delle Scienze, oltre che per i post-riscaldamenti durante il periodo estivo. Sono presenti in centrale i collettori generali

di mandata e ritorno per l'acqua calda ad alta temperatura e refrigerata, più i circuiti primari con relative elettropompe per le caldaie, l'acqua calda ad alta temperatura e l'acqua calda per l'Accademia delle Scienze, quest'ultimo attestato su uno scambiatore a piastre dedicato. Le caldaie svolgono anche un ruolo di backup rispetto alle pompe di calore.

Terminali e ventilazione

La climatizzazione dei locali del museo è affidata a impianti misti aria/acqua, in grado di controllare temperatura e umidità in tutti gli am-

bienti utilizzando fluidi termovettori a bassa temperatura.

In generale, nelle sale espositive sono presenti impianti a pannelli radianti a pavimento e di ventilazione meccanica controllata. Alcune delle sale e gli altri locali sono dotati di impianti radianti a pavimento e ventilconvettori, del tipo a parete e a incasso a pavimento. Nei locali di servizio e tecnici sono installati radiatori per il solo riscaldamento invernale. Le reti e i terminali sono stati progettati per massimizzare i rendimenti dei generatori. In particolare, i circuiti dell'acqua calda alimentano terminali che funzionano a 45÷40 °C, con salto termico di 10 °C (radiatori) e 5 °C (unità trattamento dell'aria).

In relazione alle caratteristiche termofisiche dell'edificio e per consentire un'adeguata sovrappressione degli ambienti aulici del primo e secondo piano, finalizzata all'efficace controllo dei parametri microclimatici, l'impianto di ventilazione meccanica controllata (circa 40.000 m³/h complessivi) prevede limitatissimi ricircoli sull'aria di rinnovo (15%).

Inoltre, per effetto della conformazione e dei vincoli esistenti sull'edificio, in alcuni casi le estrazioni sono state delocalizzate rispetto alla posizione delle u.t.a. e alle rispettive prese

carico termico orario è stata modellata nel corso delle 24 ore, in base a quote relative a:

- trasmissione e ventilazione, in relazione all'andamento orario della temperatura del giorno medio mensile;
- apporti solari, in relazione all'andamento della radiazione solare oraria sul piano orizzontale del giorno medio mensile, considerando uno sfasamento della quota per trasmissione di 19 ore dovuta alla massa termica delle strutture opache;
- apporti gratuiti endogeni a valore costante (scelta svantaggiosa, adottata in assenza di indicazioni precise sui profili di utilizzo).

Il calcolo dei fabbisogni di energia primaria ha considerato anche la

variazione dei carichi elettrici tra le soluzioni di progetto e di variante. In quest'ultimo caso, infatti, si riscontra un significativo incremento dei carichi elettrici relativi agli ausiliari dei circuiti primari delle pompe di calore, mentre sui circuiti secondari è stata effettuata un'ottimizzazione introducendo un unico gruppo di elettropompe a portata variabile.

Rispetto al progetto originario, su base annua la simulazione ha restituito:

- un risparmio per la fornitura del gas metano di 198.075 euro (prezzo unitario considerato: 0,750 euro/stm³);
- un aumento dei costi per l'energia elettrica (0,168 euro/kWh) da 19.349 euro (progetto) a 133.346 euro (variante, metodo dei fabbisogni medi mensili) e

a 131.901 euro (variante, metodo dei profili orari medi mensili).

Rispetto ai circa 5.000.000 complessivi previsti per la realizzazione degli impianti di climatizzazione, idrico-sanitari e antincendio dal progetto originario, la variante ha comportato un costo aggiuntivo stimato in circa 585.000 euro, Iva compresa.

Con riserva circa gli effettivi profili di utilizzo del sistema edificio-impianto e la possibile variazione dei costi unitari dei vettori energetici, i risparmi derivanti dalla realizzazione della variante sono stati stimati in circa 85.000 euro all'anno, con un tempo di rientro dell'investimento compreso fra 7 e 8 anni, risultato in linea con le indicazioni della letteratura di settore.



I risparmi energetici derivanti dalla sostituzione dei gruppi frigoriferi con le pompe di calore sono stati stimati in circa 85.000 euro all'anno, con un tempo di rientro dell'investimento compreso fra 7 e 8 anni (Proeco).

d'aria esterna. Di conseguenza solo alcune delle u.t.a. sono dotate di recuperatori di calore del tipo diretto ad alta efficienza, dovendo optare per recuperatori di tipo indiretto. Nell'ottica di effettuare un ulteriore recupero energetico, le espulsioni dell'aria degli ambienti aulici non vengono inviate direttamente all'esterno ma nella zona tecnica del sottotetto e da qui poi estratte. In questo modo si riescono a limitare i carichi termici e le sovratemperature di tale zona senza far ricorso alla climatizzazione diretta con beneficio (riduzione del carico termico per trasmissione) del piano sottostante oltre che delle apparecchiature in esso contenute.

L'assenza di interventi sulla copertura dell'edificio non ha permesso l'installazione di impianti solari termici e fotovoltaici sulle coperture. Ciò nonostante – e sebbene l'edificio possa essere soggetto a deroga – il progetto è conforme alle prescrizioni normative sullo sfruttamento delle energie rinnovabili (D.L. 28/2011). Inoltre, la scelta di aggiornare il progetto originario, prevedendo l'impiego della fonte geotermica e di sistemi ad elevata efficienza ($COP \geq 4,6$; $EER \geq 7,4$ in caso di copertura del 25% del fabbisogno complessivo; $EER \geq 7,67$ in caso di copertura del 100%) ha restituito un edificio rispondente ai più virtuosi criteri energetici contemporanei.

Analisi degli stoccaggi dell'acqua di falda

La variante in corso d'opera degli impianti termomeccanici è stata sviluppata con l'obiettivo di limitare al valore massimo di 50 l/s sia la portata dell'acqua attinta dalla falda, sia quella da restituire alla falda, mantenendo perciò le medesime condizioni di impiego della sorgente geotermica già utilizzate per il progetto originario.

Quest'ultimo, in estrema sintesi, prevedeva l'impiego di:

- 3 caldaie a condensazione, per il riscaldamento invernale e la produzione di a.c.s.;
- 3 gruppi frigoriferi raffreddati ad acqua di falda;
- sistema di accumulo del freddo mediante vasca ipogea, per il condizionamento estivo;

La capacità dell'accumulo freddo è stata mantenuta e suddivisa in due bacini separati, creando di fatto due vasche distinte destinate a:

- stoccare l'acqua attinta dalla falda;
- ricevere l'acqua in uscita dal circuito primario degli scambiatori di calore (a temperatura superiore), quando questa eccede il limite massimo; l'eccedenza è smaltita, con portate ridotte, durante i periodi di basso o nullo carico termico.

La verifica delle capacità degli accumuli e della portata di acqua di falda attinta dal pozzo sono state effettuate considerando i profili orari di cari-

co desunti dalla relazione di calcolo, facendo riferimento alle condizioni di picco di progetto invernali ed estive e alle caratteristiche e prestazioni delle macchine individuate dal progetto di variante. Condotta dalla società Onleco con il supporto del prof. Marco Perino (Politecnico di Torino, Dennerg), lo studio ha evidenziato come, nel periodo estivo, il volume massimo d'acqua prelevato dalla vasca di accumulo è di 69,5 m³, pari a circa il 35% del volume totale; inoltre, fra le ore 13 e le 17, la portata di prelievo dell'acqua dalla vasca di accumulo (56,2 l/s) supera il limite.

Ipotizzando una portata costante di estrazione/immissione dai pozzi, il ripristino dello stato iniziale (riempimento dell'accumulo e svuotamento della vasca di restituzione), può essere effettuato fra le ore 17 e le 24 con una portata di acqua di circa 3 l/s.

Nel periodo invernale, invece, la massima portata di acqua da emungere è di 43,8 l/s, perciò inferiore al limite.

Oltre alle modifiche al sistema di accumulo e alle centrali frigorifera e termica, con contestuale creazione delle relative connessioni, in sede di variante sono stati adeguati alle nuove esigenze tutti i dispositivi di pressurizzazione, scambio termico e trattamento dell'aria, i circuiti idraulici, i terminali in ambiente e il sistema di regolazione automatica.