

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

TESI DI LAUREA

*Analisi energetica ed economica di interventi di efficientamento
energetico presso la sede di Giurisprudenza dell'ateneo*

Federico II

Relatore:

Ch.mo Prof. Francesco Calise

Ch.mo Prof. Massimo Dentice
d'Accadia

Correlatore:

Fabio Siesto

Candidato:

Valentina Feola Matr. M67/99

ANNO ACCADEMICO 2014/2015

Abstract

E' noto che il continuo incremento della richiesta energetica mondiale di energia e del conseguente incremento della sua produzione determinano il problema di non poter garantire approvvigionamenti energetici adeguati, sicuri ed economicamente accessibili. Allo stesso tempo, il costante incremento dell'utilizzo delle fonti fossili di energia determina corrispondenti problematiche di carattere ambientale, legate alle emissioni di sostanze climalteranti. Si rende quindi necessario porre un limite all'uso dei combustibili fossili, di aumentarne la diversificazione e la provenienza geografica degli approvvigionamenti nonché di contenerne le emissioni inquinanti, favorendo anche l'utilizzo di fonti rinnovabili di energia.

All'emissione di gas serra è legato il riscaldamento del pianeta: proprio da questo nasce l'esigenza di contenere i fabbisogni di energia provenienti da fonti tradizionali, privilegiando il ricorso a fonti rinnovabili.

Il World Energy Outlook 2014 (WEO2014) presentato a Londra lo scorso novembre dall'IEA (Agenzia Internazionale dell'Energia), prospetta la probabile evoluzione degli scenari energetici fino al 2040, evidenziando che nonostante una forte crescita delle rinnovabili e un rallentamento del carbone, il trend di emissioni previsto nello scenario centrale porterà a sfiorare già entro il 2040 la quantità di gas serra che è possibile rilasciare senza superare la soglia critica dei 2 °C di riscaldamento rispetto ai livelli preindustriali. Inoltre potrebbe diventare critica anche la disponibilità di energia che possa soddisfare l'aumento delle richieste previsto del 37% al 2040.

Per l'Agenzia, al 2040 il mix energetico mondiale sarà suddiviso in quattro aliquote di ampiezza simile: petrolio, gas, carbone ed energie "low-carbon", cioè nucleare e rinnovabili, mentre il mix elettrico vedrà le rinnovabili pesare per un terzo del totale.

Per favorire il ricorso a fonti rinnovabili e contenere così le emissioni di gas serra, il Parlamento Europeo e il Consiglio dell'Unione Europea hanno emanato una serie di direttive che l'Italia ha recepito con l'emanazione di altrettanti decreti legislativi:

- la Direttiva Europea 2002/91/CE e i decreti legislativi 192/05 e 311/06, che promuovono il miglioramento del rendimento energetico degli edifici, con l'imposizione di

- valori limite di trasmittanza termica di pareti opache e trasparenti, e l'integrazione con fonti rinnovabili di energia;
- la Direttiva Europea 2009/28/CE e il decreto legislativo 28/11, i cui obiettivi principali il controllo del consumo di energia, il risparmio energetico, l'aumento dell'efficienza energetica e quindi il ricorso a tecnologie energeticamente efficienti. Il decreto 28/11 fissa inoltre obiettivi nazionali obbligatori per la quota complessiva di energia da fonti rinnovabili;
 - la Direttiva Europea 2010/31/UE e il decreto legislativo 63/13, il cui tema principale è la prestazione energetica nell'edilizia. Il decreto 63/13 introduce importanti novità, come il concetto di edificio a energia quasi zero: si tratta di un edificio ad altissima prestazione energetica il cui fabbisogno molto ridotto è coperto da energia prodotta da fonti rinnovabili all'interno del confine del sistema.

In questo ampio quadro legislativo trova posto la certificazione energetica degli edifici, che viene vista come uno strumento primario per perseguire con efficacia il miglioramento dell'efficienza energetica. La certificazione energetica non si pone come obiettivo quello di fornire indicazioni esatte circa il consumo di energia di un edificio, piuttosto quello di offrire agli interessati informazioni affidabili sui costi di gestione dell'immobile oggetto dell'analisi. In altre parole l'indicatore della prestazione energetica deve rappresentare una caratteristica del sistema Edificio – Impianto ed essere indipendente dalle condizioni al contorno che possono influenzare i consumi energetici.

Dall'analisi energetica si ottiene un indice, l' EP_{glob} , che esprime la prestazione energetica complessiva dell'edificio e tiene conto del fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione estiva ed invernale, per la fornitura dell'acqua calda sanitaria e per l'illuminazione.

La caratterizzazione di efficienza energetica del sistema Edificio – Impianto è rappresentata dalla classe energetica assegnata in base alla prestazione energetica complessiva. La classe energetica è contrassegnata, in ordine di efficienza decrescente, dalle lettere dalla A alla G.

In questo ambito si inserisce il presente lavoro di tesi, in cui viene affrontato il tema della diagnosi energetica degli edifici. In particolare, lo scopo è quello di elaborare l'analisi del sistema "Edificio-Impianto" di uno degli stabili in uso dell'Ateneo Federiciano, utilizzando la procedura standardizzata della "Diagnosi Energetica" (anche detta Audit).

L'edificio Universitario individuato è quello di via Nuova Marina, facoltà di Giurisprudenza; tale scelta è scaturita dall'attuale necessità dell'Ateneo di prevedere, nell'immediato, interventi di riqualificazione ad alcune delle proprie Centrali Termofrigorifere.

L'edificio di via Nuova Marina, la cui costruzione risale alla fine degli anni '90, ospita sia ambienti destinati ad attività didattica (Aule e locali afferenti) e sia ambienti destinati a mansioni amministrative (Studi per docenti).

Lo scopo finale dell'intera Diagnosi è stato perciò quello di valutare e proporre vari possibili scenari di intervento atti a realizzare un miglioramento dell'attuale prestazione dell'edificio, sia in termini funzionali che gestionali; questi potranno riguardare sia interventi edili all'involucro e sia a componenti e parti di impianto.



A tale scopo vengono proposte tre soluzioni impiantistiche alternative e per ciascuna di esse viene effettuata l'analisi energetica, con l'individuazione degli indici di prestazione del sistema Edificio – Impianto che permettono di classificarlo secondo quanto previsto dalla normativa vigente, e l'analisi economica, con la stima dei costi di investimento relativi alle varie soluzioni proposte ed una valutazione preliminare della fattibilità tecnico-economica.

Per la valutazione degli indici di prestazione è stato utilizzato il software MC4 Suite 2014 della MC4 software. Il programma consente la progettazione del sistema Edificio – Impianto e la

valutazione dell'impatto dei materiali e degli impianti in termini di CO₂ emessa. È inoltre possibile calcolare gli indici di prestazione energetica, ottenuti nell'ipotesi di funzionamento in regime stazionario, e di stampare gli attestati APE (Attestato di Prestazione Energetica). L'implementazione del calcolo energetico in MC4 ha richiesto la definizione di un modello 3D dell'edificio, nonché la definizione di tutte le caratteristiche termofisiche dell'involucro edilizio e delle peculiarità degli impianti di climatizzazione estiva ed invernale.

Gli indicatori ottenuti dallo studio effettuato forniscono una valutazione del comportamento del sistema Edificio – Impianto.

Allo stato attuale il complesso edilizio appartiene alla classe energetica G. Le principali criticità che penalizzano le prestazioni energetiche del sistema Edificio – Impianto sono riconducibili a:

- ✓ *isolamento termico di alcuni componenti edili (copertura esterna) migliorabile;*
- ✓ *sistema di produzione usurato: gli attuali generatori (pompe di calore aria-acqua), infatti, risultano essere funzionanti dall'anno 1998, anno di costruzione dell'edificio; le loro prestazioni sono quindi gradualmente diminuite a seguito dell'ingente numero di ore lavorate ed a causa dell'azione deteriorante degli agenti atmosferici;*
- ✓ *sistema di termoregolazione: i terminali risultano essere dotati di sistemi basati su logiche di regolazione "ON-OFF";*
- ✓ *sistemi di trattamento aeraulici poco efficienti: gli impianti di trattamento dell'aria necessaria al rinnovo ed alla climatizzazione non risultano dotati di alcun sistema di recupero energetico;*

Inoltre, le unità pompa di calore esistenti sono dotate di circuiti frigoriferi che elaborano gas freon del tipo "HCFC R22", non più disponibile dal 2015 a causa dell'elevati valori degli indici GWP e ODP che rappresentano l'effetto dannoso per il riscaldamento globale e per il buco dell'ozono, rispettivamente.

Nella valutazione delle prestazioni delle due pompe di calore, si è ritenuto opportuno procedere in maniera sperimentale alla determinazione del Rendimento Termodinamico Reale, dato diverso da quello di targa considerando lo stato di usura delle apparecchiature.

La valutazione sperimentale del COP ha richiesto sia la misura della potenza elettrica assorbita realmente da ciascuna unità e sia il valore di potenza termica realmente erogata.

La misura della potenza elettrica assorbita è stata eseguita mediante misurazione con Pinza Amperometrica direttamente sulla linea elettrica di alimentazione di ogni unità.

La determinazione della potenza termica fornita, invece, ha richiesto la conoscenza delle temperature dell'acqua nei tubi di mandata e ritorno, e la misura della portata del fluido. Le temperature sono state lette dai termomanometri posti sui tubi, mentre per quanto riguarda la portata è stato necessario ricorrere ad un flussimetro a ultrasuoni, modello SITRANS FUE1010 della Siemens.

Per l'effettuazione della misura, tale strumento utilizza due trasduttori elettroacustici da collocarsi sul tubo mediante l'ausilio di una barra spaziatrice, seguendo le indicazioni fornite dal costruttore, le quali variano in funzione del materiale e caratteristiche geometriche del tubo e della temperatura dell'acqua. Al fine del corretto posizionamento dei trasduttori è stato necessario provvedere alla rimozione del materiale di copertura e di isolamento posti esternamente al tubo e poi procedere ad una pulizia della superficie di quest'ultimo. Infine i trasduttori sono stati collegati all'unità principali che provvede al controllo e all'elaborazione dei segnali elettrici e alla visualizzazione dei risultati.



Per avere una valutazione più completa, per le unità esistenti sono state effettuate n.2 misurazioni: una nel pieno periodo invernale (metà dicembre) ed una in un periodo successivo, i quali hanno fornito dei valori del coefficiente di prestazione pari rispettivamente a 2,54 e 2,98. Una volta aver esaminato in maniera completa lo stato attuale dell'edificio, sono stati

proposti tre scenari alternativi non prima di aver provveduto al miglioramento delle caratteristiche dell'involucro, ottenibile con l'isolamento delle pareti esterne del solaio di copertura e aver previsto un miglioramento dei sistemi di regolazione esistenti dell'edificio di tipo ON-OFF, con altri di tipo proporzionale.

Nel primo scenario si è operato sulla configurazione impiantistica della centrale termofrigorifera esistente sostituendo quest'ultima con nuove pompe di calore aria-acqua ad alta efficienza. Tale intervento, al di là di considerazioni puramente energetiche, potrebbe considerarsi comunque obbligatorio in quanto, come descritto in precedenza, le unità della centrale utilizzano quale fluido refrigerante R22 ormai bandito dal 2015.

Nel secondo scenario si è ipotizzato invece la sostituzione delle unità esistenti con altrettanti Unità reversibili in pompa di calore condensate con acqua di falda. Rispetto allo scenario precedente, si è introdotto un'ulteriore modifica di configurazione: è stato infatti necessario prevedere le lavorazioni correlate all'emungimento di acqua dall'esistente falda superficiale.

Tale modifica è stata suggerita dai risultati di un'indagine relativa alla presenza di pozzi preesistenti nelle immediate vicinanze dell'edificio. Essendo stata rilevata la presenza di quattro pozzi poco profondi, ad una distanza non superiore a 200 m, ed avendo le analisi chimico-fisiche dimostrato che la qualità dell'acqua è adeguata, mediante opportuni trattamenti, all'utilizzo dell'impianto, si può concludere che in prossimità dell'edificio oggetto di riqualificazione sarà possibile procedere allo scavo di un pozzo che possa garantire l'attingimento dall'acqua di falda utilizzabile dai sistemi di produzione dell'energia termofrigorifera.

Il terzo ed ultimo scenario si è ipotizzato, infine, la sostituzione delle unità esistenti con un sistema di produzione dell'energia termica e frigorifera distinta rispettivamente con caldaia a condensazione da esterno e n.2 gruppi frigoriferi condensati ad acqua.

Implementando nel software le caratteristiche dell'involucro e degli impianti meccanici, si ottengono le valutazioni energetiche che ci permettono di classificare energeticamente un sistema Edificio – Impianto.

Per tutti gli scenari proposti si è evidenziato un miglioramento delle prestazioni energetiche del sistema Edificio – Impianto, più elevato nel sistema con uso di acqua di falda, meno sensibile in quello con caldaia. Per quest'ultimo il vantaggio maggiore non consiste tanto nel lieve miglioramento dell'efficienza energetica, dovuto alla diminuzione del fabbisogno invernale

di energia primaria, che passa da 28,64 kWh/ m³anno dello scenario attuale, a 22,43 kWh/ m³anno, ma principalmente da considerazioni di carattere economico. Occorre infatti tener conto della tendenza ad una progressiva diminuzione delle tariffe del gas utilizzato come combustibile.

Per gli altri due scenari le richieste di energia primaria nel periodo invernale presentano valori simili, entrambi molto più bassi di quello relativo allo scenario attuale.

Per quanto riguarda invece il fabbisogno di energia primaria per il periodo estivo, risulta molto evidente il vantaggio offerto dall'uso di acqua di falda come sorgente esterna per la Pompa di Calore; in questo caso si passa infatti da un valore pari a 7,66 kWh/ m³anno dello scenario attuale a 2,95, risultato dovuto principalmente al valore costantemente basso dell'acqua utilizzata. In questa situazione è stato necessario prevedere anche le lavorazioni correlate all'emungimento di acqua dall'esistente falda superficiale e i relativi costi aggiuntivi.

Considerando le difficoltà pratiche che potrebbero insorgere per l'utilizzazione di acqua di falda, si è valutata anche la possibilità di incrementare il rendimento del sistema di generazione attraverso la realizzazione di una centrale costituita da n.1 Unità frigorifera condensata ad acqua con Torre di raffreddamento (massimizzando così il rendimento di produzione nel solo ciclo estivo) da accoppiare a n.1 Unità Pompa di calore acqua-aria ad alta efficienza per il funzionamento invernale ed estivo. I calcoli hanno evidenziato prestazioni molto simili a quelli ottenuti con l'uso di acqua di falda.

I calcoli riportati fanno riferimento ad indici rappresentativi del consumo di energia primaria dell'edificio. Tuttavia, questi indici sono ottenuti in condizioni convenzionali (utilizzo sulle 24 h, carichi interni prestabiliti, etc.) non necessariamente rappresentative dell'effettivo utilizzo dell'edificio. La valutazione analitica dei risparmi di energia primaria sarebbe possibile solo con analisi sperimentali e/o con onerosi codici di simulazione dinamica del sistema edificio/impianto. Queste analisi dettagliate vanno oltre lo scopo del presente lavoro di tesi. Tuttavia, è possibile comunque utilizzare questi indici nella successiva analisi economica, in maniera comparativa, in modo da evidenziare la soluzione economicamente più vantaggiosa.

Dall'analisi economica risulta che la soluzione progettuale più conveniente sotto il profilo dei costi è quella che prevede l'installazione delle due unità termofrigorifere che utilizzano acqua di falda . L'investimento così definito, che ammonta a 196.000 €, ha un tempo di ritorno (DPB) di quasi 8 anni.

La soluzione peggiore, sempre dal punto di vista economico, risulta quella in cui si ipotizza l'installazione di due Pompe di Calore aria-acqua con un investimento superiore a quello precedente (210.000) e anche costi di esercizio maggiori, determinando un tempo di ritorno di 9 anni .

Miglioramenti sensibilmente più evidenti delle prestazioni energetiche del sistema Edificio-Impianto si potrebbero ottenere soltanto apportando significative modifiche all'involucro esistente, opzione non prevista sia per motivi di carattere economico, sia perché non si è voluta prendere in considerazione un'alterazione dell'estetica dell'edificio .

Nella tabella della pagina successiva si riportano i dati che consentono un confronto più accurato fra le varie configurazioni proposte.

	Unità di misura	Stato di fatto	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
<i>Fabbisogno annuo di energia primaria non rinnovabile per la climatizzazione invernale.</i>	kWh/anno	704.479	347.343	306.112	551.459
<i>Fabbisogno annuo di energia primaria non rinnovabile per la climatizzazione estiva</i>	kWh/anno	188.494	118.582	72.582	96.818
<i>Fabbisogno annuo di energia primaria non rinnovabile totale.</i>	kWh/anno	892.973	465.925	378.694	648.277
<i>Energia primaria rinnovabile per la climatizzazione invernale.</i>	kWh/anno	306.091	282.217	357.811	-
<i>Energia primaria rinnovabile per la climatizzazione estiva</i>	kWh/anno	-	129.835	66.336	66.862
<i>Energia primaria rinnovabile totale.</i>	kWh/anno	306.091	412.052	424.147	66.862
<i>Fabbisogno annuo di energia primaria globale</i>	kWh/m ³ anno	36,3	18,9	15,4	26,37
<i>Fabbisogno annuo di energia primaria per la climatizzazione invernale.</i>	kWh/m ³ anno	28,64	14,12	12,45	22,43
<i>Fabbisogno annuo di energia primaria per la climatizzazione estiva</i>	kWh/m ³ anno	7,66	4,82	2,95	3,94
<i>Quota di energia rinnovabile totale</i>	%	0,00	37,72	48,58	52,09

Si può concludere che la soluzione progettuale più conveniente sia dal punto di vista energetico che economico è quella che prevede l'installazione delle due unità termofrigorifere che utilizzano acqua di falda. Il punto critico di tale soluzione consiste nella lunga trafila burocratica, nonché nella difficoltà nell'ottenere le concessioni per lo sfruttamento dell'acquifero, che deve rispettare codici e regolamenti locali in materia.

Se, per i motivi addotti, non dovesse essere praticamente possibile realizzare il tipo di intervento precedentemente proposto, la soluzione migliore dal punto di vista economico, dati i più bassi costi di esercizio, risulta essere quella in cui si utilizza una caldaia a condensazione per il periodo invernale.

Tuttavia questa soluzione non è la più conveniente dal punto di vista energetico, dal momento che si è ottenuto un EP_i di 22,43 kWh/m³anno, valore poco inferiore a quello relativo

allo scenario attuale .Non può inoltre essere trascurata l'emissione annua di circa 106 ton di CO₂ .

Per questi motivi, la soluzione impiantistica alternativa a quella con acqua di falda è ,dal punto di vista energetico, quella che prevede l'installazione di due pompe di calore aria-acqua.