



GEOLOGIA URBANA DI MILANO
Palazzo delle Stelline - 15 novembre 2007, Milano

L'ACQUA DI FALDA. NUOVA ENERGIA PER MILANO IL TELERISCALDAMENTO DELLA CITTÀ CON L'USO DELLA FALDA

Michele SPARACINO



GEOLOGIA URBANA DI MILANO
PALAZZO DELLE STELLINE - 15 NOVEMBRE 2007, MILANO

L'ACQUA DI FALDA. NUOVA ENERGIA PER MILANO IL TELERISCALDAMENTO DELLA CITTÀ CON L'USO DELLA FALDA

Michele SPARACINO*

SOMMARIO

L'esperienza maturata sulla cogenerazione e sulle pompe di calore, ha convinto AEM ad adottare, per i propri futuri sistemi di teleriscaldamento cittadino, un assetto impiantistico standard che coniuga i vantaggi delle due tecnologie, ottenendo così le migliori prestazioni sia energetiche che ambientali.

Questa soluzione impiantistica permetterà di razionalizzare l'utilizzo delle fonti energetiche primarie, quali l'energia elettrica e il metano.

1. INTRODUZIONE

AEM ha pertanto avviato un piano di sviluppo di una nuova filiera di impianti a pompe di calore, che verranno realizzati in cinque sedi di proprietà (Canavese, Gonin, Ricevitrice Nord, Ricevitrice Sud, e Bovisa), attualmente già destinate ad usi tecnologici.

Lo schema di impianto verrà anche proposto per le altre iniziative di teleriscaldamento in essere sul territorio urbano (Quartiere Santa Giulia).

La figura 1 evidenzia sulla planimetria di Milano gli episodi citati.

* AEM SPA, Responsabile Area Produzione, corso di Porta Vittoria, 4 – 20122 Milano

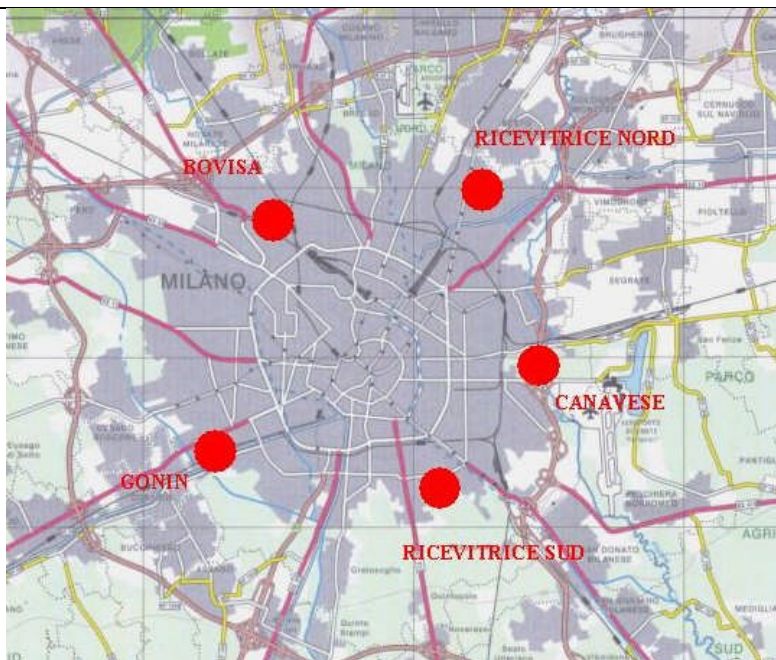


Figura 1 - planimetria degli episodi di teleriscaldamento previsti dal progetto unificato a pompa di calore

2. L'IMPIANTO STANDARD DI COGENERAZIONE A POMPA DI CALORE

L'impianto del progetto unificato farà riferimento a una dimensione e configurazione standard così da semplificarne la fase realizzativa e gestionale.

Nella figura 2 è riportato lo schema di impianto prescelto. L'impianto è costituito da una sezione di cogenerazione, un sistema a pompe di calore, una sezione di integrazione e da serbatoi di accumulo termico.

La sezione a pompe di calore, che rappresenta la parte più innovativa del progetto, garantisce una consistente produzione termica, integrata dai contributi provenienti dalle sezioni di cogenerazione e integrazione.

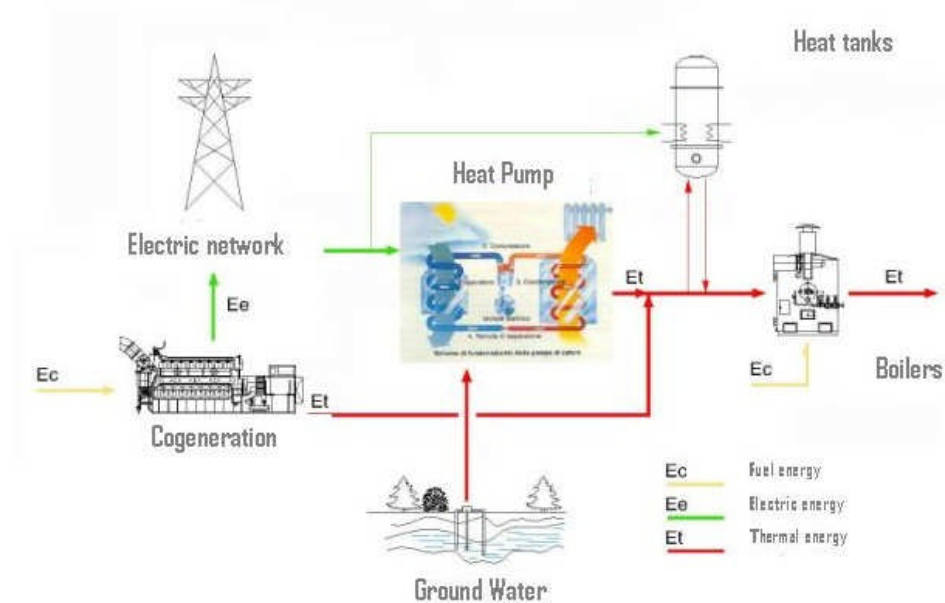


Figura 2 - schema dell'impianto standard a pompe di calore

2.1 LA POMPA DI CALORE

La pompa di calore è una macchina in grado di trasferire calore da un corpo a temperatura più bassa ad un corpo a temperatura più alta, grazie ad un apporto di lavoro esterno fornito da un compressore azionato da energia elettrica.

Il parametro di prestazione che definisce l'efficienza di una pompa di calore è il COP (Coefficient of Performance), che viene definito come rapporto fra potenza termica resa e potenza elettrica richiesta per alimentare la pompa.

Le pompe di calore utilizzate nel progetto fanno riferimento a uno specifico know-how sviluppato in Svezia per il teleriscaldamento urbano su macchine di grossa taglia di potenza superiore a 10 MWt. Questi impianti garantiscono prestazioni eccellenti (COP di circa 3) con produzione di acqua calda a 80-90 °C.

2.2 L'EFFETTO SUL SISTEMA ELETTRICO

Le pompe di calore sono alimentate con energia elettrica; la connessione alla rete elettrica e la presenza degli accumuli termici garantiscono la possibilità di modulare il funzionamento dell'impianto.

E' importante osservare che la diffusione di sistemi di produzione termica alimentati ad energia elettrica, e in special modo quelli a pompe di calore con accumulo termico, può garantire un importante contributo a ricalibrare l'andamento orario del fabbisogno elettrico nazionale aumentando la richiesta notturna.

2.3 IL PROGETTO UNIFICATO

La realizzazione dei cinque impianti standard previsti dal progetto fornirà calore per un totale di 650.000.000 kWh/anno per teleriscaldamento a circa 20.000.000 m³ di stabili serviti e 250.000 abitanti equivalenti.

3. IL PROGETTO DI FATTIBILITÀ

Il progetto di fattibilità è stato sviluppato con la finalità di individuare la configurazione migliore per l'impianto in termini di dimensionamento delle macchine principali e dell'accumulo considerando un'utenza potenziale dalle caratteristiche tipiche riscontrabili sul territorio milanese. Questa è stata modellata secondo quanto di seguito riportato in base all'esperienza maturata da AEM nel teleriscaldamento.

I dati base dell'utenza tipo considerata sono i seguenti:

- potenza termica assorbita a bocca di centrale: 90 MWt
- energia termica annua distribuita: 150 GWht/anno
- ore equivalenti: 1.700 h/anno

Per l'individuazione della configurazione ottimale dell'impianto AEM si è affidata alla metodologia già sviluppata e consolidata per i propri studi di fattibilità di impianti di cogenerazione: la programmazione matematica e specificatamente i modelli lineari a interi.

3.1 IL MODELLO DI CALCOLO PER IL DIMENSIONAMENTO DELL'IMPIANTO

Il modello è stato sviluppato per indirizzare la progettazione verso configurazioni d'impianto che oltre ad ottemperare ai vincoli di tipo ambientale, siano economicamente sostenibili e

reddittizie, e realizzino soluzioni tecnologiche d'avanguardia. Servendosi di uno specifico ambiente di sviluppo matematico si è messo a punto un codice di calcolo che basandosi su algoritmi di ottimizzazione, ha permesso, a partire dai parametri di processo e dalle condizioni di funzionamento delle macchine, di confrontare diverse configurazioni impiantistiche.

Dato di ingresso del modello è il carico termico dell'utenza, ipotizzato noto su base oraria per tutti i giorni di un anno tipo, e calcolato a partire dai gradi giorno dell'area in cui sarà realizzato l'impianto; la funzione obiettivo è la massimizzazione del margine di contribuzione lordo dell'investimento nel rispetto dei vincoli di fornitura dei vettori energetici e di rispetto dei vincoli di tipo ambientale.

Problemi quale quello in esame, che comportano la minimizzazione o massimizzazione di una funzione obiettivo, possono essere analizzati facendo riferimento ad una particolare classe di modelli: i *modelli di programmazione matematica (MP)*.

Essi vengono definiti attraverso i seguenti elementi:

- variabili decisionali, che rappresentano le quantità che possono essere controllate;
- vincoli che sono relazioni matematiche che corrispondono a relazioni nel mondo reale, come relazioni tecnologiche, leggi fisiche, requisiti di marketing, vincoli di legge, requisiti sociali;
- una funzione obiettivo che può essere, per esempio, un profitto da massimizzare o un costo da minimizzare.

Risolvere un problema di programmazione matematica significa scegliere i valori delle variabili che soddisfano i vincoli e ottimizzano la funzione obiettivo:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ x \in S \end{cases}$$

dove la funzione $f(x)$ è la funzione obiettivo, S è l'insieme delle soluzioni ammissibili.

Con notazione matematica, risolvere il problema consiste nel determinare un $x^* \in S$ tale che risulti $f(x^*) \leq f(x)$ per ogni $x \in S$.

Un'importante classe di modelli di programmazione matematica è quella dei *modelli di programmazione lineare (Linear Programming, LP)* in cui sia la funzione obiettivo che i vincoli sono funzioni lineari di variabili decisionali; per questi modelli sono stati sviluppati software che risolvono in modo efficiente problemi molto complessi con diverse migliaia di variabili e vincoli.

Un'estensione della classe dei modelli di programmazione lineare sono i *modelli di programmazione lineare a interi (Mixed Integer Linear Programming, MILP)* in cui alcune variabili decisionali sono intere o logiche, a rappresentare decisioni sì/no quali la scelta fra diversi investimenti.

Il problema di ottimizzazione, analizzato e risolto in questa applicazione, può essere affrontato con successo a partire da un modello lineare ad interi, la cui risoluzione è dal punto di vista computazionale molto onerosa; è infatti necessario gestire un numero di variabili reali molto elevato, ed è inoltre indispensabile introdurre nel modello variabili intere e binarie (boolean variables), per determinare quali e quante macchine installare, e per imporre, nel caso in cui una classe di generatori sia chiamata a produrre, il rispetto delle quantità minime di energia termica producibile su base giornaliera dalla singola classe di macchine.

In particolare il problema in esame appartiene a quelli che ricadono nella categoria dei modelli di dimensionamento ottimo d'impianto e di ottimizzazione della produzione; essi nascono quando si voglia determinare il modo più economico di produrre beni o servizi (nel caso in esame l'energia termica generata presso l'impianto a pompe di calore e di cogenerazione) ottimizzando il costo d'investimento dei sistemi e delle macchine necessarie a produrli (motori a gas, caldaie, pompe di calore).

In dettaglio, nel caso in esame, la funzione obiettivo che viene massimizzata è data dalla differenza tra il ricavo per la vendita dell'energia termica ed elettrica prodotta dall'impianto e la somma del costo di realizzazione dell'impianto, ammortizzato su più anni, e di quelli d'acquisto del combustibile e di gestione e manutenzione dell'impianto.

La soluzione è stata trovata a partire da una serie di vincoli numerici; per quello che attiene ai motori primi, ovvero motori a gas – caldaie – pompe di calore, questi vincoli traducono il rispetto delle condizioni di funzionamento delle macchine installate, in termini di produzione minima di energia su base giornaliera e di soddisfacimento del carico termico su base oraria.

Altri vincoli da rispettare, imposti al modello, riguardano le seguenti condizioni:

- per una classe di generatori può essere installata solo un tipo di macchina, scelta dal modello;
- esiste una dipendenza lineare tra energia termica generata e combustibile/energia elettrica in ingresso ai generatori, ovvero si ipotizza rendimento di macchina costante;
- la temperatura di mandata dell'acqua per il teleriscaldamento è funzione, secondo un algoritmo noto, dei gradi giorno misurati.

Il modello, sviluppato secondo gli indirizzi e la metodologia illustrata, compilato in linguaggio AMPL e risolto con il solutore CPLEX 7.0, richiede tempi di calcolo dell'ordine di qualche minuto, lavorando con processore di classe INTEL Pentium IV.

3.2 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

Per ogni configurazione presa in esame e per un valore prefissato di energia minima da produrre con le pompe di calore il modello ha permesso di determinare su base annua, con risoluzione oraria, i flussi termici prodotti dalle singole macchine, i consumi di combustibile, le energie prodotte, l'energia elettrica venduta e acquistata dalla rete elettrica arrivando a

dimensionare correttamente i serbatoi d'accumulo necessari a disaccoppiare la produzione termica dalla richiesta termica dell'utenza. Un'attenta disamina dei risultati ha permesso di arrivare ad una scelta su quella che, alla stato attuale, deve ritenersi la configurazione d'impianto da privilegiare, in termini di risultato economico garantito e di flessibilità di esercizio; flessibilità che deve essere assicurata, a partire da condizioni normative che mutano rapidamente, per poter rispondere alla sfida lanciata dalla borsa dell'energia in cui i prezzi di vendita del vettore elettrico variano di ora in ora, in modo non facilmente prevedibile, premiando i sistemi energetici che presentano grande capacità nel modulare la produzione elettrica in funzione dell'andamento dei prezzi che si formano sul mercato del giorno prima.

La configurazione che è emersa come configurazione "ottima" è quella in cui si realizza un impianto con 15 MW_{th} da motori a gas, 30 MW_{th} da pompe di calore e 30 MW_{th} da caldaie a gas, installando un serbatoio d'accumulo ad acqua calda della capacità di 80 – 100 MWh_{th}.

Le figure 3, 4 e 5 evidenziano il piano di produzione della centrale tipo in termini di energia termica prodotta dalle diverse sezioni di impianto, energia elettrica, combustibile.

Si osservi come la maggior parte dell'energia termica prodotta dall'impianto è prodotta dalle pompe di calore (circa 75 GWh/a); si tratta di circa il 60 % del totale del calore fornito all'utenza di teleriscaldamento.

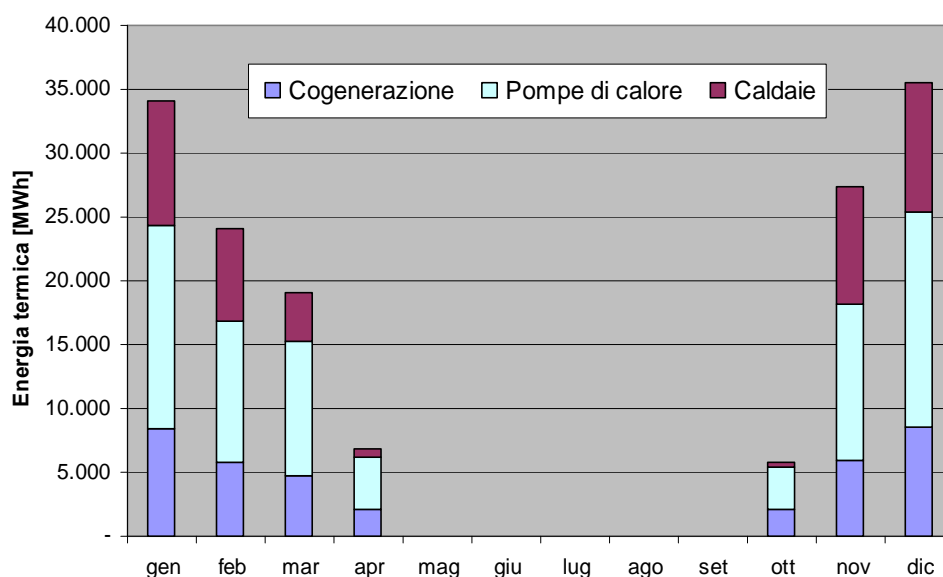


Figura 3 - energia termica distribuita dall'impianto standard

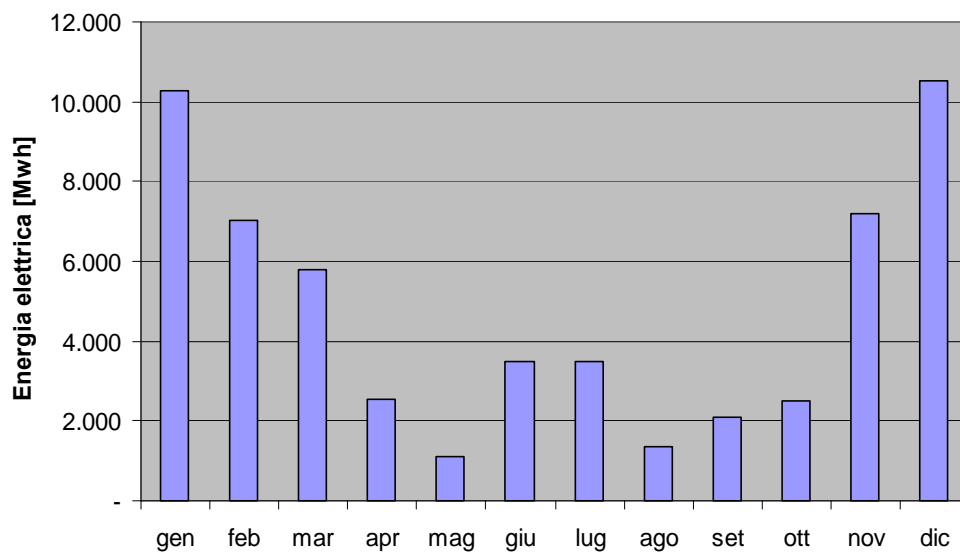


Figura 4 - energia elettrica prodotta dall'impianto standard

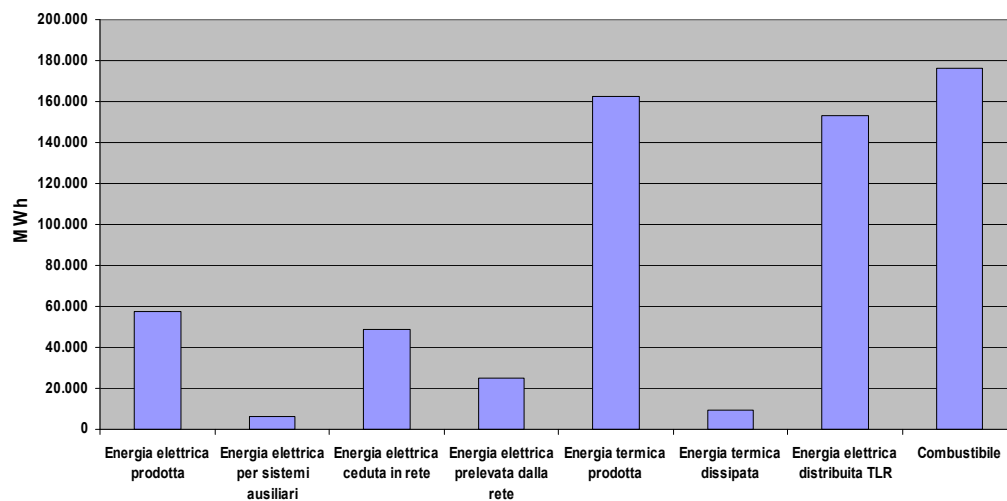


Figura 5 - flussi energetici dell'impianto standard

Lo schema di figura 6 evidenzia invece il bilancio energetico dell'impianto in un anno di funzionamento.

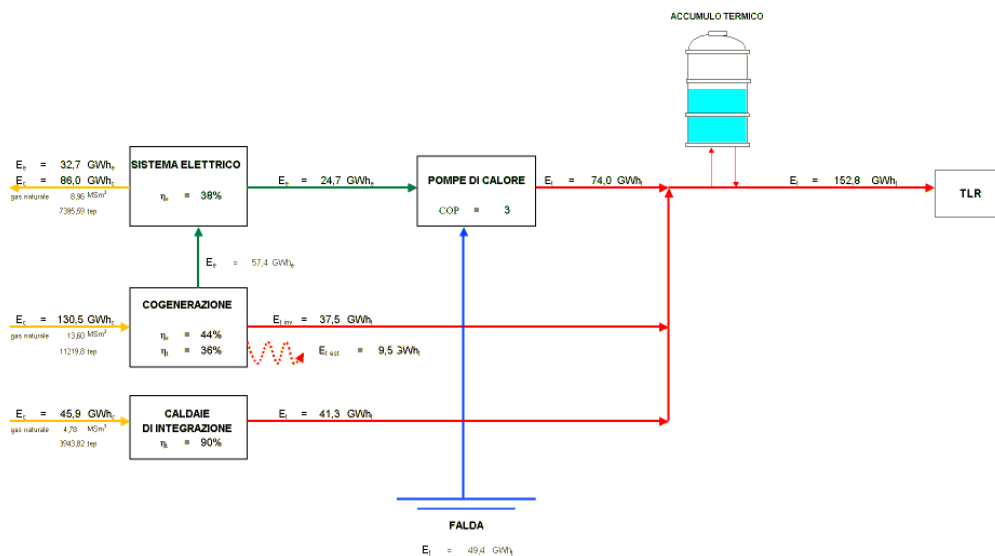


Figura 6 - bilancio energetico annuo

4. BENEFICI SULL'AMBIENTE

La realizzazione dei cinque episodi previsti dal progetto unificato avrà effetti di miglioramento energetico/ambientale, apprezzabili anche su scala urbana, in termini di:

- elevato risparmio energetico;
- riduzione dell'inquinamento atmosferico;
- controllo del livello della falda freatica.

4.1 RISPARMIO ENERGETICO

L'unione di cogenerazione e pompe di calore ha come effetto una riduzione molto consistente del combustibile: si calcola (tabella 1), che a compimento del progetto, in termini di energia

primaria (combustibile), si otterrà un minor consumo di 40.900 tep/anno (tonnellate equivalenti di petrolio) pari a un risparmio energetico del 35%.

Tabella 1 - risparmio energetico (tep)

Combustibile risparmiato utenti TLR	Combustibile risparmiato dalla cogenerazione	Combustibile impianto standard	Riduzione	Riduzione %
79,700	37,000	75,800	40,900	35

4.2 RIDUZIONE DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO

L'effetto dell'inserimento dei nuovi impianti di teleriscaldamento a pompa di calore in termini di qualità dell'aria è evidenziato in **tabella 2**. Si osserva, da un lato l'azzeramento delle emissioni di polveri e SO₂, dovuto all'alimentazione delle centrali con solo gas naturale, dall'altro la riduzione del 50% delle emissioni di NO_x, ottenuta grazie alla presenza delle pompe di calore, che producono energia termica con emissioni nulle. Le simulazioni effettuate hanno evidenziato che il 50% del calore distribuito sarà prodotto dalle pompe di calore e quindi con "zero emissioni" locali. La maggior parte di questo calore (i 2/3) verrà estratto dalla falda, cioè da una sorgente naturale totalmente rinnovabile disponibile in buona quantità sul territorio metropolitano di Milano.

Tabella 2 - riduzione delle emissioni inquinanti su Milano (t/a)

Inquinante	Emissioni impianti civili esistenti	Emissioni impianto unificato	Riduzione	Riduzione %
NO _x	190	95	95	50
SO ₂	150	2	148	99
PM ₁₀	14.5	0.5	14.0	97

L'effetto positivo per la qualità dell'aria di Milano è anche apprezzabile in termini di riduzione dell'inquinamento complessivo della città di Milano. Di fatto è come se una gran parte di abitanti di Milano (circa 120.000) spegnesse il loro impianto di riscaldamento eliminando le emissioni ad esso collegate.



GEOLOGIA URBANA DI MILANO
PALAZZO DELLE STELLINE - 15 NOVEMBRE 2007, MILANO

4.3 RIDUZIONE DELLA CO₂

Il ricorso massiccio all'energia rinnovabile (acqua di falda) permette di ottenere un effetto altamente positivo in termini di riduzione di emissioni di CO₂. La tabella 3 mostra come si può attendere una riduzione delle emissioni di circa 145.000 t/anno pari a circa il 45%.

Tabella 3 - riduzione delle di CO₂ (t/a)

Emissioni impianti civili esistenti	Emissioni risparmiate dalla cogenerazione	Emissioni impianto unificato	Riduzione	Riduzione %
210,000	113,000	178,000	145,000	45

4.4 CONTROLLO DEL LIVELLO DI FALDA

La principale risorsa idrica per le funzioni civili, industriali e irrigue presenti in tutto il territorio di Milano è rappresentata dalle falde sotterranee che vengono intercettate da numerosissimi pozzi sia pubblici che privati.

La forte richiesta d'acqua che caratterizza l'abitato di Milano e la massiccia presenza di attività industriali in tutto il settore Nord sono la causa dell'ampia depressione piezometrica che si estende entro un settore di oltre 30 km di raggio e la cui superficie si attesta su valori di circa 100 m s.l.m. Il fenomeno è apprezzabile nella carta della soggiacenza della falda di figura 7.

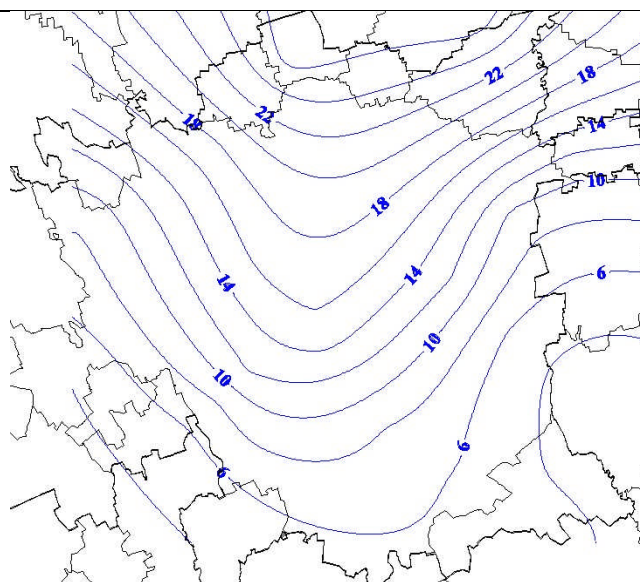


Figura 7 - andamento della soggiacenza della falda freatica a Milano (in metri dal piano campagna) – marzo 2004, Provincia di Milano

Negli ultimi decenni, con la riduzione dei prelievi idrici conseguenti alla dismissione delle grandi aree industriali di Milano e nord Milano, si è verificato un fenomeno di innalzamento della falda.

Il quadro generale del fenomeno può essere così riassunto: a partire dagli anni '50 è stato riscontrato un costante abbassamento del livello freatico; alla fine degli anni '70 si è registrata una risalita che si è mantenuta fino a circa il 1980, con un massimo nel periodo 1977-1978 (innalzamento legato al regime pluviometrico). Nel decennio '80-'90 si è verificato un leggero abbassamento del livello della falda, al massimo di qualche metro. Negli anni 1991-1993 il livello si è mantenuto costante con locali risalite; dal 1994 al 1999 si è verificato un notevole innalzamento del livello freatico. Quanto detto è visibile nella figura 8.

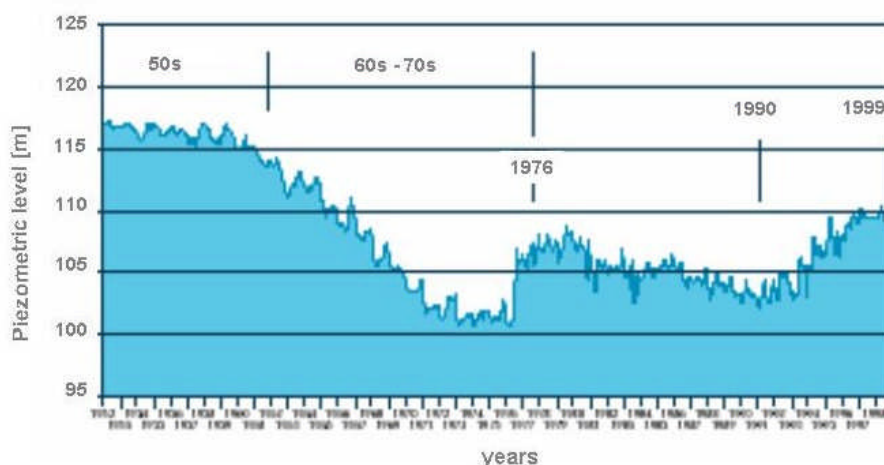


Figura 8 - oscillazione della superficie piezometrica (Provincia di Milano “Relazione sullo stato dell’ambiente 2000”)

La tendenza all’innalzamento della superficie piezometrica ha determinato e continua a determinare gravi disagi, dovuti alla sempre più frequente interferenza delle acque di falda con le strutture sotterranee presenti quali: parcheggi, linee metropolitane, sottopassi, scantinati, ecc., costruite “in asciutta”, quando la falda presentava un livello piezometrico molto inferiore ed attualmente soggette a periodici o costanti fenomeni di allagamento, che ne determinano l’inutilizzo parziale o totale. Inoltre, la dismissione di impianti industriali comporta l’arresto dell’emungimento idrico e la tendenza della falda a riprendere la sua conformazione naturale. Il recupero del livello piezometrico, se da un lato rappresenta un miglioramento del bilancio idrico di un’area, dall’altro comporta il nuovo contatto delle acque di falda con contaminanti presenti in porzioni di terreno non saturo.

Per il controllo del livello della falda e la protezione dei manufatti sotterranei, il Comune di Milano, in accordo con la Provincia e la Regione, ha avviato l’attuazione di un piano di emungimento di acqua dalla prima falda e restituzione in corsi d’acqua superficiali che già oggi costituisce una risorsa per la produzione di calore con pompe di calore.

Il progetto unificato AEM si propone di razionalizzare con l’utilizzo presso i propri impianti il controllo del livello dell’acqua di falda, unificandolo a un’attività continuativa ed efficace di produzione di calore per teleriscaldamento.

5. CONCLUSIONI

La figura 9 evidenzia come, a seguito del completamento del progetto unificato, la parte della città di Milano teleriscaldata raggiungerà una quota considerevole.

L'obiettivo per il 2010 è di una fornitura di calore per circa 1.000 MW_{th} complessivi, che corrisponderà a una riduzione di 400.000 t/a di emissioni di CO₂.

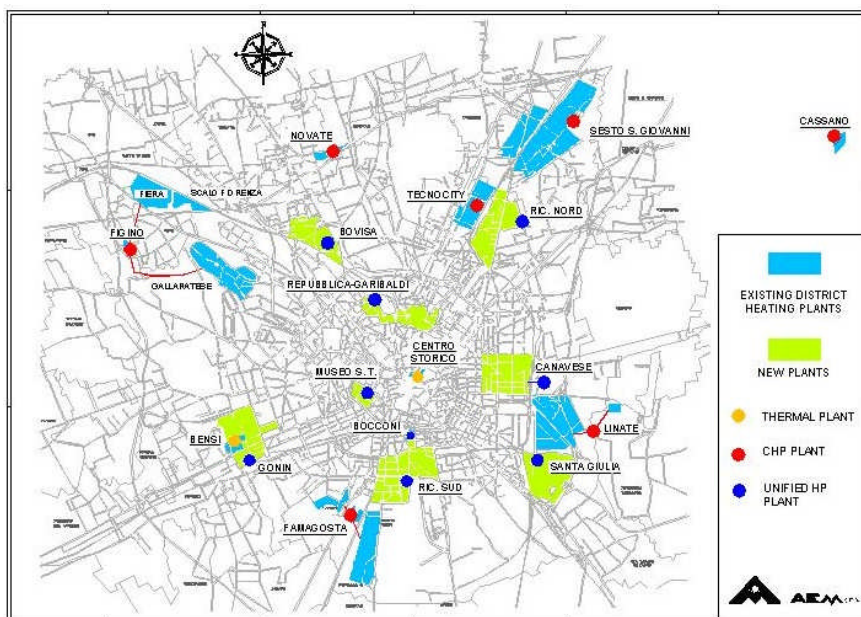


Figura 9 - il teleriscaldamento AEM a Milano – stato a completamento del progetto unificato

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Camussi Marco, Di Giorgio Paolo (AEM SPA), “Opportunità di generazione distribuita di energia elettrica, calore e freddo alimentata a gas naturale in area urbana”, on Conference ATIG “Il gas per la protezione dell'ambiente e il raggiungimento degli obiettivi di Kyoto”, Rimini, 04/11/2004

Landberg Hakan, “Experiences from Heat Pumps and Chillers in District Heating and District Cooling in Sweden”, on Conference “Energia e Ambiente”, Milano 27/01/2006

Sparacino Michele (AEM SPA), “Le pompe di calore: esempi applicativi”, on AIRU course “Riscaldamento individuale o teleriscaldamento”, Stresa, 29/09/2005



GEOLOGIA URBANA DI MILANO
PALAZZO DELLE STELLINE - 15 NOVEMBRE 2007, MILANO

Ilog Corp., AMPL CPLEX System 7.0, 2001

Provincia di Milano: "Sistema informativo falda", Milano 2005