

**Zeitschrift:** Archi : rivista svizzera di architettura, ingegneria e urbanistica = Swiss review of architecture, engineering and urban planning

**Herausgeber:** Società Svizzera Ingegneri e Architetti

**Band:** - (1999)

**Heft:** 1

**Artikel:** Concezione di reti avanzate per il teleriscaldamento

**Autor:** Vinicio, Curti

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-131643>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 19.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Concezione di reti avanzate per il teleriscaldamento

Dr. Ing. Curti Vinicio

## Introduzione

Mentre durante gli Anni Settanta l'attenzione dell'opinione pubblica era focalizzata per lo più sulla disponibilità delle risorse fossili, oggi le preoccupazioni sono piuttosto da mettere in relazione con l'impatto che il loro uso potrebbe avere a lungo termine sull'ambiente. Questo è ben illustrato, per esempio, dal timore di un aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub>, dovuto alle attività umane, che contribuisce ad un riscaldamento globale accresciuto. Queste stesse attività sono pure legate ad emissioni di altre sostanze nocive. Inoltre, complica le cose il fatto che a ciò si sovrappone la crescita economica dei paesi in via di sviluppo, che sarà causa di ulteriore pressione sull'ambiente della Terra. Due tra i fattori chiave necessari per affrontare questa situazione sono delle efficienze energetiche elevate e delle tecnologie di approvvigionamento energetico a basso impatto ambientale [Schmidheiny 1992]. Il riscaldamento di ambienti influisce in maniera molto elevata sul consumo energetico di un paese. In Svizzera il 56% dell'energia finale va a soddisfare i bisogni di energia termica. Di questa, i tre quarti sono dedicati al riscaldamento di ambienti [OFEN 1995].

Questi fabbisogni sono ancora in gran parte coperti da caldaie ad olio individuali. Tuttavia, solo delle tecnologie facenti capo alle pompe di calore permettono di sorpassare il limite di 100% posto all'efficienza energetica intesa come rapporto tra energia utile ed energia pregiata assorbita, grazie ad una valorizzazione dell'energia presa dall'ambiente [Favrat, Curti et al. 1996]. L'uso di pompe di calore costituisce quindi un passo in favore dei concetti chiave di uno sviluppo sostenibile.

Una grande parte della popolazione, inoltre, risiede in località prossime a laghi, mari o fiumi. Queste masse d'acqua costituiscono degli enormi serbatoi naturali di energia, che tuttavia si trovano a temperature troppo basse per un uso diretto. Grazie all'uso di pompe di calore questa energia può essere invece sfruttata per il riscaldamento e per la produzione di acqua calda. Le economie di scala e

le alte efficienze associate alla loro taglia fanno dei sistemi di teleriscaldamento alimentati da pompe di calore dei sistemi ideali per lo sfruttamento efficace di questa energia termica. Numerosi sistemi di teleriscaldamento alimentati con pompe di calore esistono nel mondo, dando prova da decenni della loro efficienza [Calm 1988].

Ciononostante, l'efficienza energetica delle pompe di calore dipende fortemente dalle temperature della sorgente termica a bassa temperatura, p. es. l'acqua di un lago, e quella del fluido lato utente, p. es. la rete di teleriscaldamento. Tradizionalmente, la rete viene portata ad una temperatura sufficientemente elevata per permettere uno scambio termico presso ogni utente. In pratica, essa dovrà essere ad una temperatura sufficientemente elevata affinché anche l'utente il cui circuito di distribuzione ha la temperatura più elevata di tutti possa essere servito tramite scambio termico, indipendentemente dalla potenza richiesta! Questo, però, può penalizzare fortemente le prestazioni della pompa di calore installata nella centrale termica. Questo ostacolo può essere evitato mediante produzione mista alla centrale (pompe di calore, cogenerazione e/o caldaie) e grazie a sistemi a produzione distribuita, in particolare con pompe di calore decentralizzate. In quest'ultimo caso la rete può lavorare a temperatura relativamente debole e gli utenti più esigenti in temperatura vengono allacciati tramite una pompa di calore locale, che lavora tra la rete e il circuito locale di distribuzione in questione. E' da notare che esiste la possibilità di allacciare utenti alla condotta di andata e/o a quella di ritorno. Prelevare, sia con scambiatori sia con pompe di calore, sul ritorno della rete diminuirebbe i costi di rete, per minore portata e minore diametro delle condotte, e di gestione della pompa di calore centrale, grazie ad un abbassamento della temperatura di condensazione.

Il problema deve comunque essere risolto nella sua globalità, tenendo conto simultaneamente dei fabbisogni di tutti gli utilizzatori, in termini di temperatura dei circuiti locali di riscaldamen-

to, di potenza calorica massima richiesta per il riscaldamento e per l'acqua calda sanitaria, di ubicazione geografica, ecc. Si tratta di valutare quali temperature di rete devono essere adottate (poiché abbassare la temperatura d'andata della rete significa potere allacciare meno utenti con scambiatore diretto e quindi aumentare l'investimento, ma può anche significare un miglioramento delle prestazioni della pompa di calore centrale). La concezione che tenga conto simultaneamente delle caratteristiche di ogni utilizzatore, considerando che il sistema potrebbe comprendere alla centrale elementi di cogenerazione, pompe di calore e/o caldaie, ottimizzando le rispettive potenze installate, e che inoltre ogni utilizzatore potrebbe essere allacciato mediante scambio diretto o pompa di calore alla condotta d'andata o a quella di ritorno (o da entrambi), il tutto valutato per ogni temperatura di rete possibile, si rivela un problema estremamente complesso.

L'ingegnere, ancora oggi, procede, nel processo di concezione di sistemi, anche semplici, ad analisi a criteri multipli più o meno formalizzati, sulla base di alcune configurazioni di sistemi definiti a partire dall'esperienza. Senza sminuire l'importanza dell'esperienza, che gioca comunque un ruolo determinante, vi è però uno svantaggio legato a questo modo di fare sin dall'inizio, essenzialmente dovuto al rischio di includere, nel set di varianti analizzate, unicamente le soluzioni sperimentate nel passato (rischio che aumenta con la complessità dei sistemi). Il numero di gradi di libertà (o numero di variabili indipendenti) del problema della produzione mista di energia e delle differenti alternative è elevato, tanto che l'ottimizzazione di un tale sistema rappresenta per l'ingegnere che procede secondo metodi tradizionali un incarico difficile, spesso addirittura impossibile, e comunque oneroso.

Appare quindi interessante usare dei modelli che considerino i criteri simultaneamente (modelli unificati) e che permettano di ottenere una risposta di validità secondo questi criteri per ogni punto dello spazio di definizione. L'accoppiamento di tali modelli ad algoritmi di ottimizzazione di tipo deterministico basati su relazioni matematiche (p. es. metodo del gradiente ridotto), largamente impiegati, non ha però dato i frutti sperati. In particolare a causa dell'alto grado di non linearità e del carattere non contiguo dello spazio di definizione di tale problema di programmazione non lineare mista-intera (MINLP), difficilmente risolvibile con algoritmi matematici tradizionali. Viceversa, l'uso di algo-

ritmi facenti appello unicamente a valori della funzione, sperimentato per la prima volta in questo tipo di problemi nel quadro dei lavori citati [Curti 1998], si è rivelato vincente. In particolare, l'accoppiamento con algoritmi evoluzionistici di tipo probabilistico, detti genetici [Goldberg 1991], i cui principi si rifanno al meccanismo di evoluzione delle specie naturali, ha prodotto i risultati sperati con ottimo riscontro di convergenza delle soluzioni [Curti 1998].

L'applicazione ad un'utenza identificata nel quartiere di Losanna-Ouchy [Utzmann, Curti et al. 1995] ha permesso di dimostrare la validità di questo tipo di approccio nella fase di concezione di tali sistemi. I risultati mostrano in particolare che grazie a questo tipo di modello si delineano delle scelte di concezione a priori non evidenti.

**Modelli unificati per l'ottimizzazione di sistemi energetici**  
I modelli detti unificati sono del tipo ad attributo unico, chiamato funzione oggetto, risultante dall'aggregazione dei vari criteri considerati. Contrariamente all'ottimizzazione multioggetto, dove sottoproblemi separati sono combinati tardi nel processo globale, qui i criteri sono aggregati sin dall'inizio in una formulazione comune. Nella pratica, per i negoziatori coinvolti nel processo decisionale, la somma dei costi rappresenta uno dei principali valori discriminanti associati con un progetto. Ragion per cui, la somma dei costi è stata presa come base comune per tutti i criteri considerati nel modello.

Se i criteri considerati simultaneamente sono termodinamici ed economici, il modello viene chiamato termoeconomico. Se quest'ultimo viene esteso ad includere criteri ambientali, allora il modello è detto environomico.

La funzione oggetto per tali modelli rappresenta la somma dei costi calcolati durante tutta la durata di vita del sistema. L'ottimizzazione del modello è effettuata tenendo conto dell'intero spazio delle soluzioni possibili. L'optimum globale entro questo spazio corrisponde al minimo globale della funzione oggetto. Una formulazione generale per il problema dell'ottimizzazione environomica è data dal sistema di equazioni che segue, dove  $C_{tot}$  è la funzione oggetto:

$$\text{minimizzare } C_{tot}(x,y) = C_{equip}(x,y) + C_{res}(x,y) + C_{pol}(x,y) + K \quad (1)$$

$$\text{rispetto a s.c. } h_j(x,y) = 0 \quad j = 1, \dots, J \quad (2)$$

$$g_k(x,y) \geq 0 \quad k = 1, \dots, K \quad (3)$$

$$\text{dove } x = (x_1, x_2, \dots, x_l) \quad (4)$$

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_j) \quad (5)$$

$$x_{i\_min} < x_i < x_{i\_max} \quad i = 1, \dots, l \quad (6)$$

$$y_{i\_min} < y_i < y_{i\_max} \quad j = 1, \dots, J \quad (7)$$

$C_{\text{equip}}$  è la somma estesa dei costi del materiale e  $C_{\text{res}}$  è la somma estesa dei costi delle risorse usate per il funzionamento del sistema. Queste grandezze sono definite da

$$C_{\text{equip}} = C_{\text{equip}} + C_{\text{pol\_equip}} \quad (8)$$

$$C_{\text{res}} = C_{\text{res}} + C_{\text{pol\_res}} \quad (9)$$

Nei membri di destra delle equazioni (8) e (9),  $C_{\text{equip}}$  rappresenta la somma dei costi tradizionali associati all'acquisto dei materiali,  $C_{\text{res}}$  rappresenta la somma dei costi tradizionali associati con l'acquisto delle risorse usate per il funzionamento del sistema, mentre  $C_{\text{pol\_equip}}$  e  $C_{\text{pol\_res}}$  sono le somme dei costi ambientali associati rispettivamente con la fabbricazione e l'eliminazione del sistema e con la produzione ed il trasporto delle risorse citate.

Nell'equazione (1),  $C_{\text{pol}}$  è la somma dei costi ambientali associati con l'operazione del sistema e  $K$  la somma dei costi fissi (cioè i costi indipendenti dall'ottimizzazione).

Il vettore  $x$  rappresenta le variabili di decisione o indipendenti (gradi di libertà) del modello, mentre il vettore  $y$  rappresenta le variabili dipendenti. Le condizioni d'uguaglianza (2) descrivono i bilanci di massa e d'energia cui il sistema obbedisce nonché, eventualmente, le caratteristiche di prestazione di componenti. I limiti fisici o matematici del modello sono controllati dalle condizioni di disuguaglianza (3).

I costi  $C_{\text{pol\_equip}}$ ,  $C_{\text{pol\_res}}$  e  $C_{\text{pol}}$ , chiamati costi ambientali, sono calcolati sulla base di costi relativi a danni all'ambiente provocati dall'emissione di sostanze nocive [Ott et al. 1994], e dipendono dal tipo di sostanza emessa, dall'entità dell'emissione e dalle condizioni locali d'immisione [Curti 1998]. Così, a parità di emissione risulta più penalizzante emettere in un luogo già carico dal punto di vista ambientale rispetto a un ambiente relativamente pulito. In questo modo è possibile includere, tra i parametri di disegno del sistema, l'ubicazione della centrale. Se nel bilancio dei costi l'ambiente risulta abbastanza importante, l'ubicazione della centrale sarà migliore in campagna; per contro, se per esempio questo influisce sensibilmente sui costi di pompaggio dell'acqua di lago, in caso di uso di una pompa di calore, allora essa resterà comunque in città, oppure si opterà per un altro elemento di produzione (se poi però questo non influisce troppo su altri costi, per esempio energetici).

Annulando i valori di  $C_{\text{pol\_equip}}$ ,  $C_{\text{pol\_res}}$  e  $C_{\text{pol}}$ , si passa da un modello environomico ad un modello termoeconomico.

### Applicazione ai sistemi avanzati di teleriscaldamento

Un utensile numerico, implementato nel quadro dei lavori citati [Curti 1998], ha permesso di mostrare la validità del metodo descritto per la definizione di un sistema di teleriscaldamento. Ciononostante, l'utensile può venire adattato per l'ottimizzazione di altri sistemi energetici, o venire usato addirittura in altri campi [Curti 1998b]. L'ottimizzazione è basata su modelli esaustivi, associati a quelle che sono chiamate superconfigurazioni, cioè configurazioni di sistemi comprendenti tutti gli elementi e le opzioni suscettibili di essere parte della soluzione ottimale. Il modello, inizialmente costruito a partire dalla superconfigurazione, è ottimizzato trattenendo elementi e opzioni interessanti e rigettando quelli non interessanti.

La figura 1 riporta la struttura del sistema modellizzato, comportante una linea di teleriscaldamento che parte da una centrale e passa presso diversi utenti. In un primo tempo si è adottato lo schema semplice citato, al fine di non sovraccaricare il modello, ma il passaggio a strutture più complesse (p. es. arborescenti) è semplicemente implementabile in caso di necessità.

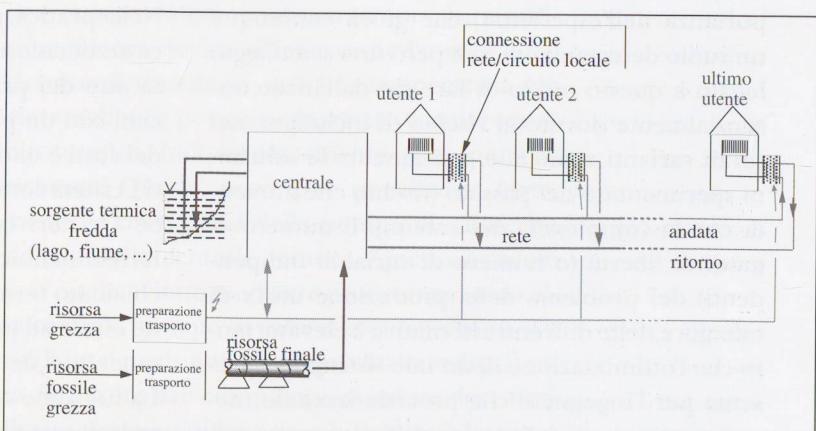


Fig.1 – Schema semplificato del sistema di teleriscaldamento ad una linea di utenti

Le figure 2 e 3, invece, mostrano schemi di principio semplificati, associati alle superconfigurazioni considerate per la centrale e per ogni utilizzatore. Come si può notare, tutti gli elementi suscettibili di fare parte della soluzione ottimale sono stati inseriti: alla centrale una pompa di calore, elementi di cogenerazione (una turbina e un motore a gas) e una caldaia, presso gli utilizzatori pompe di calore e scambiatori, allacciati rispettivamente all'andata e al ritorno della rete. L'acqua calda sanitaria è prodotta grazie a scambiatori, permettendo un utilizzo massimo del flusso già spillato per il riscaldamento e, se ne-

cessario, è portata alla temperatura desiderata grazie ad una resistenza elettrica. Al fine di non rendere il problema instazionario, a questo punto non sono stati considerati accumuli termici. Tuttavia, questo può essere introdotto in un secondo tempo, una volta vagliate le opzioni di base, in una fase progettuale ulteriore.

L'ottimizzazione dirà poi se alla centrale, sulla base dei dati del problema, è meglio prevedere una pompa di calore da sola, eventualmente con alimentazione da elementi di cogenerazione, una caldaia d'appoggio o sola, eccetera. Parimenti, ogni utente potrebbe essere allacciato da pompe di calore o scambiatori. Tutto questo a dipendenza delle temperature ottimali di andata e di ritorno della rete, per esempio. Si capisce quanto questo esercizio possa essere difficile se effettuato manualmente, e in particolare si capisce che ottimizzazioni parziali hanno poche probabilità di giungere ad un optimum globale piuttosto che ad uno locale (corrispondente al minimo locale della funzione costo).

Tale modello è stato accoppiato ad algoritmi genetici dell'ultima generazione, adattati al Laboratorio di Energetica Industriale (LENI) dell'EPFL [Molyneaux 1997]. Gli algoritmi genetici (AG), utilizzano alcune caratteristiche proprie del meccanismo dell'evoluzione naturale delle specie, come la sopravvivenza degli individui più adattati ("survival of the fittest"), la selezione e la riproduzione, effettuata con accoppiamento di individui diversi e con trasmissione di caratteri ereditari. Di diverse soluzioni (gli "individui") vengono combinate le informazioni relative alle variabili indipendenti (i "patrimoni genetici"), creando delle soluzioni "figlie", che se abbastanza adattate vengono selezionate e a loro volta usate per riprodurre altre soluzioni. In questo senso, gli AG sono detti "evolutivi". Se viene fatto corrispondere il grado di "fitness" per esempio con l'opposto del costo associato ad una soluzione (un individuo), allora la "popolazione" di soluzioni si avvicina sempre più all'optimum globale caratterizzato dal costo minimo, a patto che la regione di ricerca venga esplorata in modo sufficientemente esteso prima dell'impoverimento del patrimonio genetico della popolazione.

Il principio di superconfigurazione è stato sviluppato per la gestione di reti di riscaldamento e di raffreddamento. Si tratta di un principio di gestione che consente di ottimizzare la produzione di calore e di raffreddamento in modo integrato, considerando le diverse fonti di energia disponibili e le diverse destinazioni di calore e di raffreddamento. Il principio di superconfigurazione permette di ottimizzare la produzione di calore e di raffreddamento in modo integrato, considerando le diverse fonti di energia disponibili e le diverse destinazioni di calore e di raffreddamento.

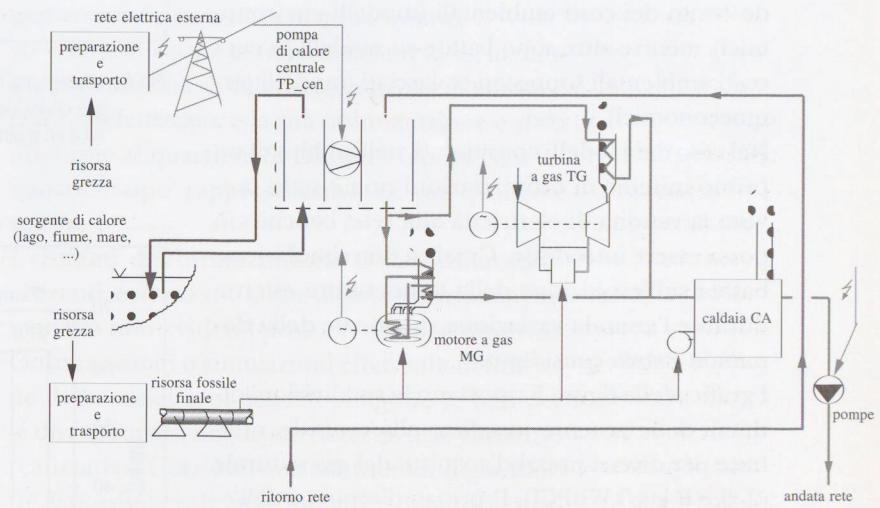


Fig.2 – Schema semplificato del principio di superconfigurazione relativa alla centrale

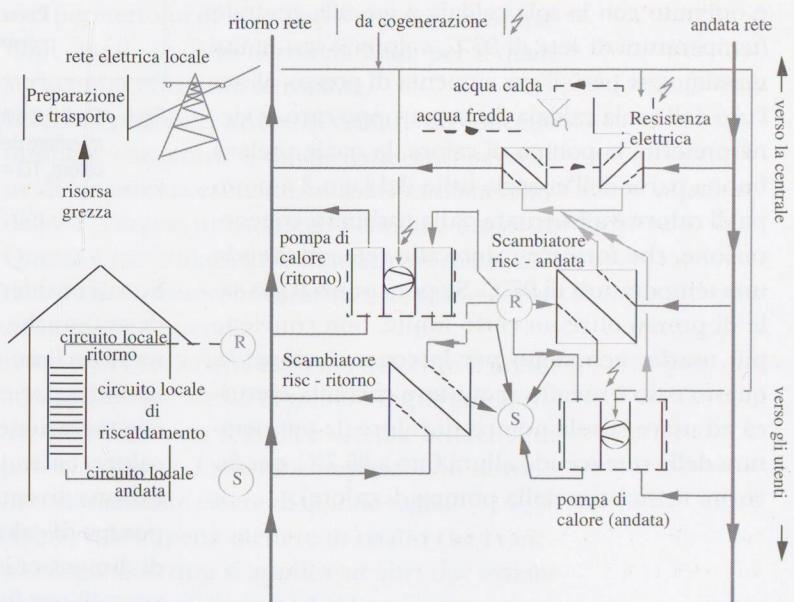


Fig.3 – Schema semplificato del principio di superconfigurazione relativa ad ogni utente

## Applicazione numerica - risultati

Delle ottimizzazioni del concetto di sistema di tereriscaldamento del quartiere di Losanna-Ouchy sono state effettuate applicando la metodologia descritta. Nel corso di un primo approccio risolutivo, l'attenzione è stata concentrata su 4 classi di utenti, di cui la tipologia della domanda di riscaldamento è schematizzata alla figura 4, identificate in questo quartiere, la cui potenza totale richiesta per riscaldamento ed acqua calda è stimata a 67 MWth [Utzmann, Curti et al. 1995].

Alcune ottimizzazioni sono state effettuate tenendo conto dei costi ambientali (modelli ambientali), mentre altre sono basate su modelli in cui i costi ambientali sono stati trascurati (modelli termoeconomici).

Nel caso dei modelli considerati, nell'ambito di un primo insieme di ottimizzazioni non è stata prevista la vendita di elettricità alla rete, benché ciò possa essere introdotto. Grazie a una simulazione basata sull'evoluzione della temperatura esterna durante l'anno la variazione stagionale della domanda è stata considerata.

I grafici della figura 5 riportano le suddivisioni ottimali delle potenze installate alla centrale, ottenute per diversi prezzi d'acquisto del gas naturale (2, 5 e 8 cts/kWhPCI). Il prezzo d'acquisto dell'elettricità è invece costante (13 cts/kWh). Il grafico di sinistra della figura è ottenuto non considerando i costi ambientali, contrariamente a quello di destra.

Si noti l'evoluzione della configurazione alla centrale: quando il gas è acquistabile a buon mercato e non si considerano i costi ambientali, l'optimum è ottenuto con la sola caldaia a gas alla centrale (temperatura di rete di 97°C, valore al suo limite massimo); se però il gas aumenta di prezzo, allora l'uso della sola caldaia diventa troppo caro, e viene preferita la pompa di calore, la quale preleva buona parte dell'energia utile dal lago. La pompa di calore è alimentata dalla turbina a cogenerazione, che fornisce calore alla rete, ottenendo una temperatura di 97°C. Se per contro il gas sale di prezzo oltre un certo limite, non conviene più usarlo, nemmeno per la cogenerazione; in questo caso è meglio acquistare corrente elettrica ed usare la sola pompa di calore (la temperatura della rete scende allora fino a 85.7°C, per favorire l'efficienza della pompa di calore).

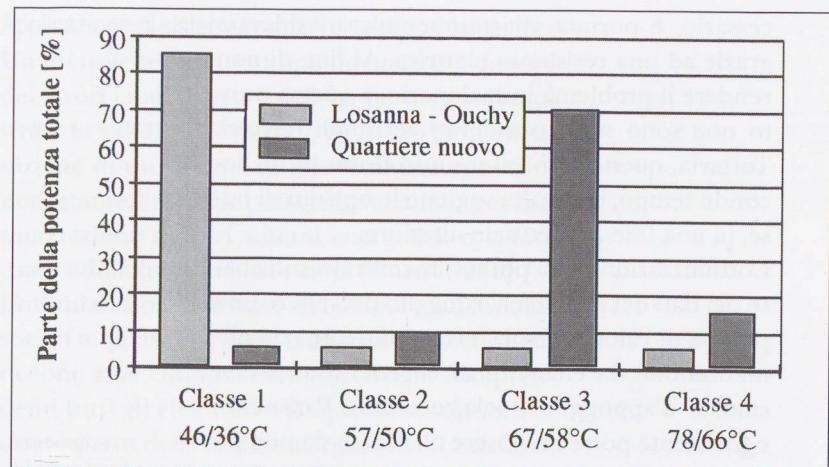


Fig.4 – I due gruppi di classi di utenti considerati, corrispondenti alle classi identificate nel quartiere di Losanna-Ouchy ed a un quartiere nuovo fittizio.

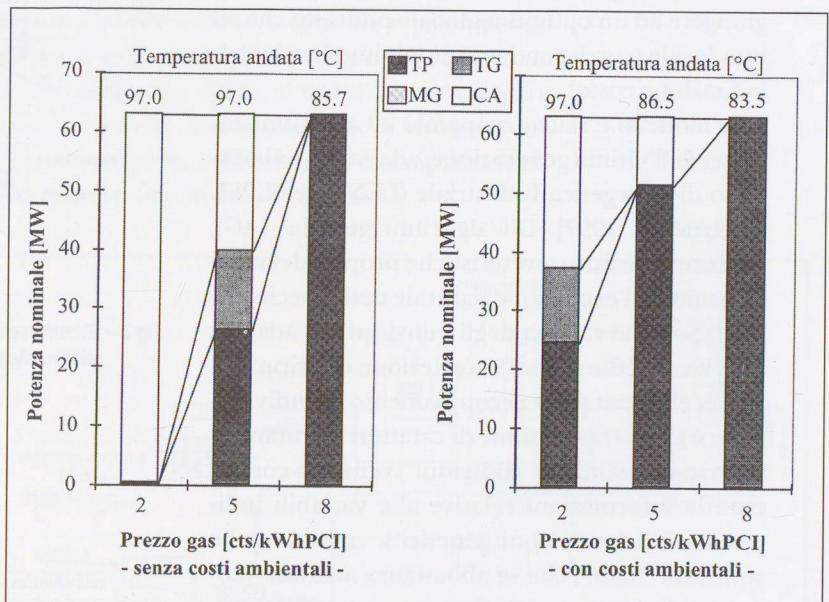


Fig.5 – Grafici di sintesi dei risultati di sensibilità della soluzione ottimale al variare del prezzo d'acquisto del gas naturale (TP = pompa di calore, TG = turbina a gas, MG = motore a gas, CA = caldaia a gas).

Se si considerano i costi ambientali (grafico di destra), anche quando il gas è acquistabile a buon mercato l'uso della caldaia da sola diventa penalizzante, per cui viene preferito un elemento di cogenerazione (turbina) abbinato alla pompa di calore. Salendo con il prezzo del gas la cogenerazione diventa troppo cara; si preferisce usare la pompa di calore, ma comunque con una caldaia di dimensioni ridotte (appoggio per le punte invernali) per limitare il costo associato all'investimento. Quando però il gas diventa troppo caro, l'unica soluzione risiede nell'uso della sola pompa di calore con acquisto dell'elettricità dalla re-

te. Si noti anche l'evoluzione della temperatura della rete, il cui valore ottimale diminuisce con l'aumentare della potenza installata della pompa di calore. Per i casi di prezzo elevato d'acquisto del gas, quando vengono considerati i costi ambientali la temperatura della rete è inferiore (anche a scapito dei costi ad essa legati); questo è dovuto all'influenza dei costi ambientali associati con la produzione dell'elettricità assorbita dal sistema. Non riportate qui, le configurazioni delle connessioni degli utenti alla rete comportano, quando vi è la pompa di calore alla centrale, un prelievo massimo di calore sul ritorno, grazie a scambiatori, delle classi 1 e 2; gli utenti delle classi 3 e 4 sono invece allacciati tramite scambiatori connessi all'andata della rete. Se invece la caldaia è installata sola, tutti gli utenti sono connessi all'andata della rete mediante scambiatori.

Alcune ottimizzazioni sono state effettuate cambiando la tipologia della domanda. Il quartiere di Losanna-Ouchy considerato per l'applicazione sopra menzionata è esistente, e comportante anche delle costruzioni relativamente datate. Una tipologia di domanda che potrebbe corrispondere ad un quartiere nuovo, comporterebbe una maggioranza di edifici equipaggiati di sistemi di distribuzione a bassa temperatura. Mantenendo le classi di temperatura considerate sopra, ma modificando le proporzioni di potenza termica richiesta, delle ottimizzazioni sono effettuate per la seconda domanda corrispondente al grafico della figura 4.

L'optimum trovato per questa tipologia con un modello environomico comporta alla centrale la pompa di calore sola, con una rete la cui temperatura è solamente di 52°C. Gli utenti della classe 1 sono connessi alla rete mediante scambiatori, mentre quelli delle classi 2, 3 e 4 lo sono tramite pompe di calore locali, poiché sarebbe troppo oneroso lavorare ad alta temperatura con la pompa di calore centrale. E' da notare che gli utenti della classe 2 utilizzano pompe di calore che prelevano calore sul ritorno della rete, con conseguente abbassamento dei costi di rete (dimensionamento delle condotte e pompaggio) e di gestione della pompa di calore centrale (temperatura di condensazione inferiore).

## Conclusioni

Le tappe di concezione di sistemi energetici sostenibili o comunque energeticamente razionali, devono includere l'uso di utensili che considerino simultaneamente il largo spettro di parametri legati agli aspetti termodinamici, economici ed anche ambientali, in tutte le loro combinazioni possibili, e cioè in tutto lo spazio delle possibili soluzioni. L'approccio proposto fa appello a modelli unificati, che permettono l'uso di potenti algoritmi di ottimizzazione (p. es. algoritmi genetici) per risolvere tali problemi complessi (programmazione non-lineare mista-intera).

Al fine di mostrare la validità del metodo, un modello di sistema di teleriscaldamento avanzato è stato modellizzato, e la sua ottimizzazione è stata applicata al quartiere di Losanna-Ouchy ed a un quartiere-tipo rappresentativo di un quartiere nuovo.

I risultati dell'ottimizzazione si sono dimostrati coerenti, e illustrano come alcune soluzioni a prima vista non evidenti possono rivelarsi ottimali. Ottimizzazioni o simulazioni effettuate in funzione delle condizioni-quadro pongono le basi per le discussioni di negoziato necessarie al consenso realizzativo. Grazie ad una tale metodologia, inoltre, è possibile valutare l'influenza di fattori esterni variabili, come i tassi economici, i prezzi dell'energia, eccetera, effettuando studi di sensibilità rispetto a questi fattori e annotando l'influenza sul concetto ottimale.

L'introduzione dei costi ambientali, i cui valori devono comunque essere sottomessi al consenso dei decisor, e l'estensione dell'analisi al ciclo di vita permettono di effettuare valutazioni compatibili con il concetto di sostenibilità, per il quale si riscontra crescente sensibilità.

E' altresì possibile, invece di cercare un concetto ottimale, concentrarsi unicamente sull'operazione di un sistema esistente, introducendo nel modello le caratteristiche degli elementi installati. Questo è particolarmente indicato nei casi di elementi che operano in concorrenza, come nei sistemi bi- o trivalenti.

Il modello di teleriscaldamento descritto si presta ad applicazioni anche di minore importanza, come può essere un semplice sistema bivalente di potenza ridotta. I sistemi complessi non devono necessariamente essere di grande taglia!

Infine, vale la pena mettere in risalto che la metodologia descritta si applica ad altri tipi sistemi energetici e ad altri campi, laddove i sistemi sono sufficientemente complessi perché l'ingegnere non riesce ad avere il controllo dell'intero spazio delle soluzioni.

Sicuramente non si tratta che di primi passi verso un capitolo estremamente interessante dell'ingegneria, molto promettente e che si svilupperà ulteriormente in particolare grazie alla potenza di calcolo oggi disponibile a prezzo contenuto.

#### Referenze Bibliografiche

- Calm, James M. "District Heating and Cooling with Heat Pumps Outside the United States", ASHRAE Transactions, V. 94, 1988.
- Curti, Vincenzo, Globes - Global Energy Solutions SA, Bellinzona 1998b.
- Curti, Vincenzo. Modélisation et optimisation environnementales de systèmes de chauffage urbain alimentés par pompes à chaleur, Rapporto di dottorato EPFL No. 1776, Lausanne 1998.
- Favrat, Daniel. Curti, Vincenzo, von Spakovsky, Michael R. "Cogénération et pompes à chaleur, Utilisation pour les réseaux de chauffage urbain", Giornale GWA, Organo della Società svizzera dell'industria del gas e dell'acqua, No. 3/96, 1996.
- Goldberg, D. E. Genetic Algorithms, Addison-Wesley U.S.A. 1991.
- Molyneaux, A. K. et al., Alliance for Global Sustainability: Sustainable Development Based Methodology for the Optimised Integrated Design and Operation of Energy Conversion Systems and Networks, Rapporto intermedio, LENI-EPFL, Lausanne, September 1997.
- Office fédéral de l'énergie (OFEN) et Comité national suisse du Conseil mondial de l'énergie, Statistique globale suisse de l'énergie, Tirage à part du bulletin ASE/UCS No. 16, 1995
- Ott et al. Externe Kosten und Kalkulatorische Energiepreiszuschläge für den Strom- und Wärmebereich, Ufficio federale svizzero dell'energia, rapporto 724.270 D, 1994.
- Schmidheiny, Stephan. Changer de cap, Dunod, Paris, 1992.
- Utzmann, C. Curti, V. et al. Projet Paclac, valorisation de l'énergie thermique des lacs pour le chauffage urbain, Rapporto del fondo nazionale per la ricerca energetica, NEFF, EPFL, Lausanne, Mars 1995.

#### Summary

*Although heat pump based district heating is often an obvious solution, adapting the delivery temperature to the most exigent users is detrimental to overall system performance. This pitfall can be avoided with a centralized plant of heat pumps, cogeneration and an auxiliary furnace, supplemented by decentralized heat pumps.*

*However, the problem of mixed energy production and delivery is complex and presents for the engineer the daunting if not impossible task of adequately, much less optimally, determining the best system for the job.*

*Recent research works have contributed developing an approach for the solving of such type of complex problems, which lead to entire satisfaction [Curti 1998]. Thanks to this methodology, such a system may now be optimized, taking into simultaneous consideration those thermodynamic, economic and environmental aspects associated with the synthesis, the design and the operation of the system. The analysis may be extended to the entire life cycle of the system, thus including the manufacturing and destruction (e.g. by recycling) processes of the system equipments, as well as the production and transport processes of the energy resources utilized for the system operation.*

*The optimization of the model developed results in a highly nonlinear, non-contiguous solution space effectively searched using a genetic algorithm. The system's environmental characteristics are introduced into the model through pollution damage cost terms and pollution penalty functions adapted to the system's changing emissions and to local and global pollutant conditions. Results are shown for the district of Lausanne-Ouchy, showing the power of the method, which may be extended to other domains.*