

IMPIANTO URBANO TERMOFRIGORIFERO IN COGENERAZIONE

R. Degl'Innocenti¹, G. Grazzini², A. Rocchetti²

¹) Fiorentinagas S.p.a.

²) Dipartimento di Energetica, Università di Firenze.

SOMMARIO

Il presente articolo espone i risultati di uno studio di fattibilità, condotto dal Dipartimento di Energetica di Firenze in collaborazione con Fiorentinagas S.p.A., per la realizzazione di un impianto di cogenerazione, teleriscaldamento e teleraffrescamento nell'area fiorentina "Fiat – Carapelli". Per tale area è previsto il recupero e la riqualificazione con la realizzazione di nuove volumetrie fra cui il nuovo Palazzo di Giustizia ed alcune sedi dell'Università di Firenze. Sono state esaminate differenti configurazioni per la rete di teleriscaldamento. E' stata realizzata una simulazione al computer che partendo dalla stima del fabbisogno di energia termica delle utenze sulla base dell'andamento orario della temperatura secondo l'Anno Tipo di Firenze e dell'energia frigorifera secondo un modello verificato su un campione statistico di edifici a Firenze, seguendo l'analisi energetica dell'impianto con il conseguente dimensionamento della centrale secondo un proporzionamento in funzione della richiesta termofrigorifera del bacino di utenza, ha portato alla formulazione di un'analisi economica del progetto mediante il calcolo di indici economici per il confronto delle soluzioni esaminate.

1. INTRODUZIONE

La cogenerazione è una tecnologia che consente di ottenere la simbiosi di più processi con macchine che producono simultaneamente energia elettrica ed energia termica da un'unica sorgente di energia primaria. L'applicazione di tale tecnologia al teleriscaldamento e teleraffrescamento è già una realtà collaudata in molti paesi. Le prime applicazioni furono negli Stati Uniti, penetrando poi nel Nord Europa e infine nel Nord Italia, in cui realtà applicative sono rappresentate, ad esempio, dalle reti di teleriscaldamento delle città di Brescia, Torino e Verona.

Il teleriscaldamento presenta notevoli vantaggi sia economici legati al risparmio di energia primaria rispetto ad un sistema che produca separatamente energia elettrica e termica, sia di natura ambientale come riduzione delle emissioni di inquinanti a parità di copertura di richiesta energetica delle utenze, sia come fattore sicurezza escludendo l'utilizzo di caldaie autonome, spesso responsabili di gravi incidenti. D'altra parte un impianto di teleriscaldamento e teleraffrescamento prevede l'impiego di ingenti capitali d'investimento di cui occorre valutare attentamente la redditività.

Il Piano Regolatore di Firenze prevede per l'area "Fiat – Carapelli", nella zona nord ovest di Firenze, un recupero e riqualificazione proponendo la realizzazione di importanti volumetrie da destinarsi al nuovo Palazzo di Giustizia, all'Università degli Studi di Firenze, ad attività commerciali, ricettive e residenziali, per un volume edificato totale di circa 1 400 000 m³. La zona risulta perciò interessante dal punto di vista energetico, dato che la presenza di diverse funzioni fornisce una combinazione di richieste termiche ed elettriche che potrebbe permettere la produzione di energia in cogenerazione. Al fine di appurare la fattibilità di un impianto di questo tipo è opportuno però estendere ad altre utenze presenti nella zona lo studio, al fine di raggiungere livelli di potenza sufficientemente alti da giustificare la realizzazione di un impianto centralizzato. Per questo motivo sono stati considerati anche utenze nella zona limitrofa, principalmente di carattere terziario, industriale e sportivo.

2. DIAGNOSI ENERGETICA

La diagnosi energetica del territorio rappresenta la preliminare indagine da attuare nel caso di ipotesi di teleriscaldamento. Si concretizza nella valutazione dei carichi termici da fornire agli edifici nella stagione di riscaldamento invernale, e da asportare nella stagione di condizionamento estivo, considerando i molteplici fattori che influenzano tale valutazione fra cui la tipologia degli edifici e le destinazioni d'uso, la potenza installata, la temperatura esterna e quelle interne desiderate. A tal fine è

¹ E-mail: renato.deglinnocenti@fiorentinagas.it

² E-mail: ggrazzini@ing.unifi.it

necessaria una raccolta dei dati relativi alle caratteristiche degli edifici ed alle potenze installate o da installare per il riscaldamento e per la climatizzazione. Tali dati può sono indicati nel seguente elenco:

- Energia Termica
 - Schema dell'impianto termico esistente con i dati di targa delle caldaie, lo sviluppo della rete termica, i valori delle potenze termiche degli utilizzatori e del tempo di utilizzo giornaliero, nell'arco mensile e per un periodo annuo.
 - □ilievo del diagramma di carico termico giornaliero, mensile ed annuale (potenza termica in funzione del tempo).

Per gli edifici esistenti è auspicabile anche ottenere:

- Contratto di fornitura del metano, con i valori del costo a Nm³ e dei costi accessori.
- Consumi e costi mensili di combustibile (metano o altro combustibile) per il periodo di un anno
- Energia elettrica
 - Schema elettrico dell'impianto con i valori delle potenze utilizzate e del tempo di utilizzo giornaliero nell'arco di un mese e di un annuo.
 - Contratto di fornitura dell'energia elettrica, prezzo del kWh, valore del sovrapprezzo termico, delle imposte e del corrispettivo di potenza.
 - Dati di misure mensili per il periodo di uno/due anni: potenza elettrica attiva, massima energia attiva

2.1 Fabbisogno energetico

Per la determinazione dei fabbisogni energetici invernali degli edifici è stata realizzata una procedura di simulazione considerando la reale differenza di temperatura fra ambiente interno imposto a 20°C e la temperatura oraria dell'ambiente esterno ottenuta dall'Anno Tipo indicato per Firenze (Alabisio e Sidri, 1985), utilizzando come coefficiente globale di scambio il rapporto fra la potenza utile degli impianti esistenti o ipotizzati nei vari progetti impiantistici dei singoli edifici e la differenza di temperatura "di progetto" che per Firenze è pari a 20°C. E' stata quindi ottenuta un curva di fabbisogno termico invernale che fornisce ora per ora la potenza termica richiesta dalle utenze.

Per il fabbisogno per condizionamento non esistono al momento specifiche indicazioni normative; conseguentemente, è stato fatto riferimento ai dati ed alle metodologie di letteratura. Un metodo presentato in un articolo (P.Brunello, L.De Santoli, 1997), basa la valutazione del fabbisogno energetico estivo dell'edificio su un'espressione semplificata, verificata su 1.080 edifici.

L'energia che è necessario prelevare dall'ambiente per garantire una temperatura definita è data da:

$$E_{cond} = \left\{ f_c (U_o S_o + U_v S_v) + c_p G (T_i - T_e) - S_{equiv} I_{sole} \right\} \tau \quad (1)$$

in cui:

- T_e rappresenta la temperatura fittizia sole-aria che tiene conto del coefficiente di assorbimento emisferico globale, del coefficiente liminare esterno e dell'irradianza solare media giornaliera sulla parete.
- f_c tiene conto della variabilità del coefficiente liminare interno e della trasmittanza media U dell'ambiente cui la parete di superficie S appartiene.

Il fabbisogno energetico per il condizionamento estivo dell'edificio, viene quindi calcolato applicando a tutte le pareti l'espressione sopra riportata, stimando il flusso di energia legato alla portata media di aria esterna G di infiltrazione e di ventilazione e in riferimento a periodi τ di un mese.

Quest'ultima semplificazione consente di utilizzare i dati climatici medi disponibili sul territorio nazionale e di individuare i periodi in cui l'edificio richiede apporti o sottrazioni di energia nell'ipotesi di temperatura interna costante.

Questo metodo è stato applicato a tutti gli edifici di un campione statistico estratto sull'area urbana di Firenze, considerando una temperatura interna costante di 25°C. (C.Balocco, 1995, G.Grazzini, C.Balocco, 1997)

Al fine di ottenere un metodo che potesse essere utilizzato per la stima del fabbisogno energetico per il condizionamento di edifici nel Comune di Firenze, senza sviluppare un'analisi approfondita di ogni edificio in base alle sue caratteristiche termofisiche, sono stati usati i suddetti dati.

E' stato così ottenuto un parametro estivo espresso dalla seguente relazione:

$$F_{estate} = E_{cond} / \left(V \sum (t_i - t_e) I_{ms} n_g \right) \quad (2)$$

Al denominatore appare un parametro climatico caratteristico della località.

La relazione di Brunello-DeSantoli considera due distinti contributi, uno dovuto alle caratteristiche dell'edificio, ed uno ai ricambi d'aria. Anche quest'ultimo dipende dalla differenza di temperatura tra interno ed esterno oltre che dal numero dei ricambi orari in volume dell'ambiente. Sottraendo questo contributo al parametro sopra definito si ottiene un indicatore E_{fe} delle caratteristiche dell'edificio.

La stima del fabbisogno energetico per il condizionamento estivo è stata condotta utilizzando l'indicatore estivo medio P_{ce} , risultante dalle valutazioni fatte sul campione statistico degli edifici di Firenze. Questo è stato moltiplicato per il volume totale di ciascun edificio e per il parametro climatico a denominatore dall'espressione, con l'aggiunta di un termine che considera le caratteristiche termofisiche dell'aria, il numero dei ricambi d'aria r , e la differenza di temperatura sommata sulla stagione P_{ct} , altro parametro climatico locale. Per la temperatura interna di riferimento per il calcolo dei parametri si è assunto il valore di 23°C, più basso del valore usuale di 26°C, perché la relazione utilizzata considera la variazione di temperatura soltanto e non la variazione di entalpia dell'aria.

La variazione di entalpia tiene infatti conto anche dell'umidità relativa dell'aria, che è un parametro che aumenta la richiesta di raffrescamento e di energia, a causa della sua influenza sul benessere ambientale.

La relazione di calcolo sviluppata è stata la seguente:

$$E_{cond} = (E_{fe} \cdot P_{ce} + r \cdot C_a \cdot P_{ct}) \cdot V \quad (3)$$

I valori utilizzati nel calcolo sono $E_{fe}=6.304E-9$ [m^3K^{-1}]; $P_{ce}=2.462E6$ [$J K$]; $P_{ct}=102$ [$K s$]; $C_a=30240$ [$Wm^{-3}K^{-1}$]

Dove $P_{ce}=\sum \Delta t I_{tot} n_g$ sul periodo considerato e $P_{ct}=\sum \Delta t n_g$. Per l'elaborazione dei dati climatici sono stati usati i dati UNI 1994 e quelli in letteratura (Franceschini, 1981).

In tab. 1 vengono riportati i dati raccolti nella diagnosi energetica e i risultati ottenuti per il fabbisogno energetico delle utenze.

Tab. 1 – Fabbisogno energetico totale richiesto.

	Potenza termica installata in riscaldamento (kW)	Consumo termico annuo in riscaldamento (GJ)	Potenza termica installata in condizionamento (kW)	Consumo termico annuo in condizionamento (GJ)
Rete Ovest	3 860	14 216	4 325	1 960
Rete Sud	42 575	163 057	28 920	28 024
Rete Est	5 167	13 665	1 400	1 800

3. CODICE DI SIMULAZIONE NUMERICA

E' stato realizzato un programma al computer per simulare il funzionamento dell'intero impianto di cogenerazione e teleriscaldamento su base oraria valutato per un intero anno. Il codice, sulla base dei dati raccolti in fase di diagnosi energetica, calcola il fabbisogno orario di ciascuna utenza, ottenendo quindi il fabbisogno energetico orario per ciascun ramo di rete e quindi l'energia termica oraria richiesta alla centrale di cogenerazione. E' prevista la simulazione sia con utilizzo di acqua calda a 90°C che di acqua surriscaldata a 120°C come fluido termovettore della rete. Dai dati prestazionali della centrale il codice calcola, sempre su base oraria, il consumo di energia primaria e la produzione di energia elettrica. Sulla base dei fabbisogni di energia primaria richiesta e di energia termica ed elettrica prodotta il codice calcola l'indice energetico IEN dell'investimento e, dalla stima dei costi e ricavi della gestione dell'impianto, con un definito costo di investimento iniziale, i parametri economici idonei alla valutazione dell'investimento.

I risultati della simulazione numerica rappresentano uno strumento per la progettazione della centrale e della rete di teleriscaldamento, permettendo un'efficiente previsione dei tempi e modalità di funzionamento della centrale, e forniscono inoltre dei parametri di stima economica su cui poter costruire i piani finanziari di investimento.

4. IPOTESI IMPIANTISTICA

Nell'ipotesi di servire con la un'unica centrale di cogenerazione le utenze precedentemente descritte, la locazione della centrale ed i percorsi schematici delle reti sono presentati in fig. 2. Dalla centrale, collocata in posizione spazialmente baricentrica rispetto alla distribuzione delle utenze, sono stati tracciati tre rami di rete con un percorso ramificato anziché ad anello in quanto tale tipo di realizzazione risulta più adatto per la localizzazione, il numero e la potenzialità delle utenze da collegare. La rete denominata "Rete Sud" è destinata a servire le utenze dell'area "Fiat - Carapelli", quella denominata "Rete Ovest" le utenze di carattere industriale e sportivo della zona limitrofa ad ovest dell'area "Fiat - Carapelli", mentre quella denominata "Rete Est" le utenze di carattere terziario e sportivo della zona limitrofa a nord-est dell'area "Fiat - Carapelli".

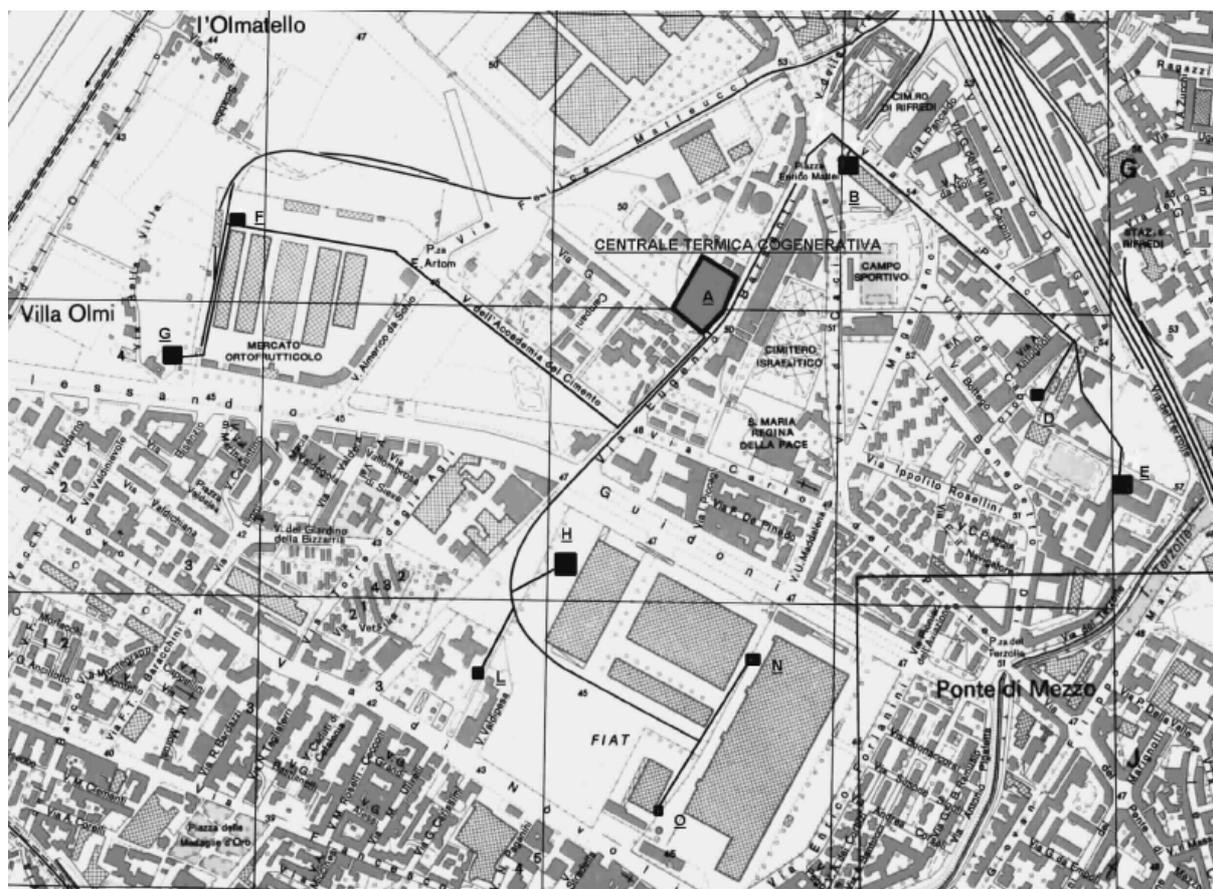


Fig. 1 - Mappa della zona considerata con tracciato indicativo della rete e localizzazione centrale cogenerativa

3.1 Rete di teleriscaldamento

L'energia termica recuperata dalla centrale termica può essere utilizzata per produrre acqua calda (90°C) o acqua surriscaldata (120°C) da inviare alle utenze mediante la rete di teleriscaldamento; le due possibilità sono state analizzate separatamente. Tale rete ha uno sviluppo complessivo di circa 7,6 km (ovvero circa 15 km complessivi di tubazioni considerando la mandata ed il ritorno) e si articola in tre rami principali, ciascuno alimentato da un proprio sistema di pompaggio:

- Rete ovest - sviluppo complessivo circa 2300 m
- Rete sud - sviluppo complessivo circa 3000 m
- Rete est - sviluppo complessivo circa 2300 m

La rete di teleriscaldamento parte dalla centrale di cogenerazione, a valle delle pompe installate in centrale termica, per arrivare fino in prossimità delle utenze allacciate alla rete. E' stato previsto un funzionamento della rete con sistemi di pompaggio a portata variabile: l'energia termica recuperata

dall'impianto di cogenerazione o prodotta dalla centrale termica di integrazione e soccorso, potrà essere vettoriata indifferentemente su uno dei tre rami della rete, entro i limiti di funzionamento dei gruppi di pompaggio ed in funzione delle richieste degli utilizzatori. Il punto di risalita delle tubazioni può essere situato all'interno o all'esterno degli edifici dove potranno essere posizionate le sottostazioni. È prevista una valvola di chiusura su ciascuna tubazione della linea in prossimità della derivazione dal ramo principale, per ciascun utilizzatore finale o gruppo di utilizzatori.

La tubazione ipotizzata per la rete di teleriscaldamento è una tubazione precoibentata, con sistema di allarme per la rilevazione dell'umidità interna all'isolamento, sistema Bonded in acciaio saldato. La caratteristica principale del sistema Bonded è che il tubo di servizio, l'isolamento e il tubo guaina costituiscono un corpo unico. La superficie interna del tubo guaina e la superficie esterna del tubo di servizio vengono pretrattate in modo che la schiuma aderisca ai tubi e che le forze agenti su di essi vengano trasferite attraverso la schiuma. I tubi, quando posizionati, si spostano come un unico corpo e gli spostamenti vengono limitati dall'attrito del terreno. L'impiego della tubazione precoibentata è giustificato dalla maggior rapidità di posa in opera nonché dal miglior risultato raggiungibile in termini di isolamento delle tubazioni ed affidabilità nel tempo.

3.2 Centrale termica

Trattandosi di un impianto per un utilizzo prevalentemente diurno e fortemente discontinuo, la scelta cade necessariamente sull'impiego di motori endotermici a gas naturale abbinati ad una centrale termica con caldaie di tipo tradizionale che copre i fabbisogni di punta.

Dalla procedura di simulazione numerica è stata ottenuta, su base oraria, la curva cumulata annuale della potenza termica richiesta alla centrale, riportata in fig. 2, che è stata utilizzata per il dimensionamento della centrale di cogenerazione.

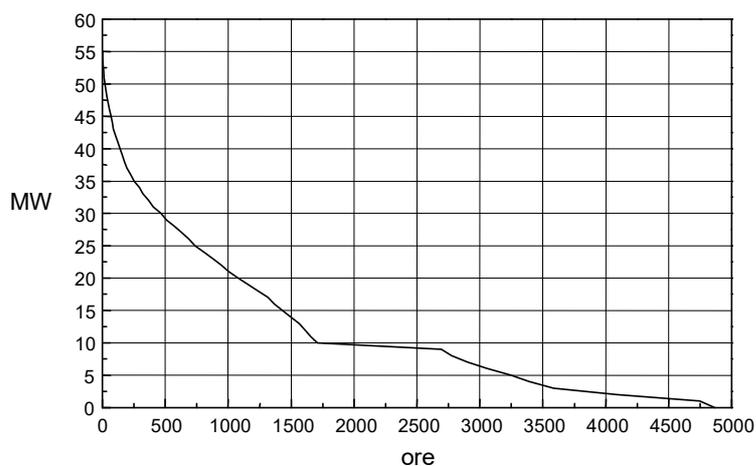


Fig.2 – Curva cumulata della potenza termica richiesta alla centrale cogenerativa

Il dimensionamento della centrale termica è stato valutato sulla base delle seguenti considerazioni:

- La rete è in grado di fornire un apporto di calore aggiuntivo, avendo ipotizzato di utilizzare dei sistemi di pompaggio a portata variabile e delle basse velocità di rete in condizioni nominali;
- Occorre considerare la non totale contemporaneità delle richieste;
- È possibile realizzare degli accumuli di calore anche locali;
- Trattandosi di teleriscaldamento è possibile spostare gli orari di accensione e spegnimento degli impianti, accorgimento che evita i picchi di richiesta che prevalentemente si verificano nella prima mattina quando le temperature sono più basse;
- È possibile dare la priorità a quelle utenze eventualmente non dotate di sistemi di riscaldamento autonomo.

Non si è quindi ritenuto opportuno dimensionare le reti per l'intera potenza termica richiesta dalle utenze in quanto questa in ogni caso sarebbe richiesta per un numero limitatissimo di ore annue e costringerebbe ad un eccessivo sovradimensionamento degli impianti e delle reti. Si è considerato di

raggiungere un funzionamento medio di ciascun motore di almeno 1900 ore/anno. La taglia di ciascun motore, pari a circa 2700 kW_e, è stata individuata considerando una modularità dell'impianto e il tipo di esercizio discontinuo previsto per tali motori. Motori di taglia superiore potrebbero essere considerati in una successiva analisi.

Pertanto la configurazione ipotizzata per la centrale prevede:

- 6 motori da 2,7 MW_e cadauno in grado di erogare alla rete una potenza termica di 16 MW;
- 4 caldaie di soccorso ed integrazione in grado di erogare alla rete una potenza termica massima di punta pari a 20 MW

In tab. 2 sono riportate le prestazioni dei motori scelti.

Tab. 2 – Caratteristiche dei motori primi

Caratteristiche di ciascun motore			Note
Potenza elettrica	kW	2 700	
Potenza termica recuperabile	kW	2 700	Con raffreddamento dei gas di scarico a 120 °C
Potenza termica recuperabile	kW	2 600	Con raffreddamento dei gas di scarico a 150 °C
Potenza termica introdotta	kW	6 800	
Rendimento elettrico	%	39,7	
Consumo metano	Nm ³ /h	770	

3.3 Produzione di energia frigorifera in cogenerazione

Per alcuni utilizzatori viene richiesta la possibilità di disporre di acqua refrigerata per il condizionamento estivo. Disponendo di energia termica di risulta dall'impianto di cogenerazione anche in periodo estivo e nelle stagioni intermedie (o almeno da alcuni motori, che in tal modo potrebbero prolungare il loro periodo di funzionamento, in funzione dei criteri di gestione adottati), l'acqua refrigerata può essere prodotta attraverso l'impiego di gruppi ad assorbimento. Un ulteriore vincolo viene posto dalle dimensioni delle reti e dalle limitate differenze di temperatura normalmente utilizzati nelle reti di acqua refrigerata a servizio di sistemi di condizionamento.

Esistono due possibili alternative:

- Produzione centralizzata di freddo. In tal caso dovendo evidentemente utilizzare le stesse tubazioni della rete di teleriscaldamento, in periodo estivo quando le differenze di temperatura fra mandata e ritorno oscillano attorno ai 6 – 8 °C, sarà possibile vettoriare solo il 20-25% della potenza termica che viene distribuita in periodo invernale sotto forma di acqua calda. Nel caso in cui si utilizzino le tubazioni di una rete in acqua surriscaldata la potenza frigo erogabile si riduce ulteriormente.
- Produzione decentralizzata. In tal caso la rete di teleriscaldamento viene utilizzata sempre alla stessa temperatura in estate ed in inverno ed potrà rendere disponibile al sistema ad assorbimento circa il 30-40% della potenza termica che viene distribuita in inverno.

Esistono però alcuni vincoli del progetto che condizionano la scelta: in particolare per la rete Sud non sembra possibile installare localmente gli impianti ad assorbimento, a causa di mancanza di spazi per le torri evaporative, mentre sulla rete Ovest esiste già un gruppo ad assorbimento presso una utenza che, anche se di limitata potenzialità, potrebbe essere riattivato.

In tali ipotesi di lavoro le reti vengono utilizzate in maniera diversa in funzione del loro utilizzo in periodo estivo, come indicato in tab. 3.

Tab. 3 – Esercizio delle reti in funzione della locazione della

Tratto rete	Apparecchiature installate	Esercizio rete	
		Inverno	Estate
Rete Ovest	Assorbitore locale	Calda	Calda
Rete Sud	Assorbitore in centrale	Calda	Refrigerata
Rete Est	Assorbitore presso utenza esistente	Calda	Calda

5. ANALISI ECONOMICA

Un progetto non è altro che una successione di capitali, di segno qualsivoglia, previsti alle loro scadenze. L'acquisto da parte di una impresa di una attrezzatura produttiva (immobilizzazione) seguita dal suo utilizzo e dal suo eventuale rinnovo, genera flussi finanziari, cioè fondi di cassa in entrata ed uscita, distribuiti su tutto l'arco temporale della vita utile del bene. Dunque non appena si riesce ad isolare questa successione di flussi di cassa connessi alla acquisizione, all'utilizzo e rinnovo del bene, cioè si riesce ad estrarre il risvolto finanziario di questa operazione, si individua compiutamente un progetto.

Al fine di valutare razionalmente la convenienza economica dei progetti di investimento industriale evidente è l'opportunità di tradurre i progetti stessi in uno o più indici di valutazione. I problemi, dei quali ci occuperemo riguardano la valutazione di un progetto, cioè il calcolo di un valore numerico che viene assunto come indicatore sintetico che, in qualche modo, misura l'utilità che il progetto riveste dal punto di vista finanziario per il soggetto economico chiamato ad attuarlo. Questa fase di valutazione è l'anticamera della scelta tra progetti; operazione nella quale quel soggetto deve individuare, tra più progetti alternativi, tutti realizzabili, quello che è preferibile attuare in quanto massimizza il valore dell'indicatore.

Esistono molteplici criteri di valutazione largamente usati nella pratica aziendale, spesso però senza la necessaria attenzione verso le ipotesi che essi incorporano. I problemi nascono dal fatto che ogni criterio nasconde una particolare visione del mondo, cioè incorpora una particolare modellizzazione sia del comportamento dell'operatore che attua i progetti, sia della realtà nella quale esso si muove.

Formalizzare, cioè descrivere un progetto, è semplice, almeno nel caso che si tratti di un progetto certo, nel senso che i suoi elementi (capitali e scadenze) sono tutti noti a priori con certezza. Ovviamente, nella maggioranza dei casi, ci troveremo ad analizzare progetti aleatori, cioè non certi.

Per formalizzare un progetto certo dovremo considerare le successioni dei suoi capitali alle successive scadenze (o epoche). I capitali positivi rappresentano flussi di cassa in entrata, per l'operatore, mentre quelli negativi descrivono gli analoghi flussi di cassa in uscita.

Nel seguito supponiamo che la scelta tra due o più progetti alternativi vada fatta in base al valore che ciascuno di essi fa assumere ad una assegnata funzione scalare f che dipende dal progetto. Essa è detta criterio di scelta, criterio di decisione, indice di preferenza, il progetto da scegliere sarà quello che massimizza il valore di f . In questo modo, il nostro problema, è ridotto al confronto tra due generici progetti, A e B, confronto che viene condotto calcolando e comparando tra loro $f(a)$ e $f(b)$; se risulta $f(a) > f(b)$ diciamo che il progetto A è progetto preferito a B (beninteso secondo il criterio f) e viceversa.

I criteri di valutazione standard più noti e più utilizzati sono:

- VAN (valore attuale netto o REA rendimento economico attualizzato).
- TIR (tasso di rendimento interno).
- PBT (pay-back time)

Analizziamo di seguito, brevemente, le caratteristiche, i pregi e i difetti, di ognuno di questi tre criteri di valutazione, utilizzati nel presente studio.

5.1 Valore attuale netto VAN.

Con questo criterio si valuta il progetto A semplicemente assegnandogli il suo valore attuale, calcolato sulla base di una qualche legge di capitalizzazione, il progetto in esame sarà inserito tra i progetti accettabili se il suo VAN > 0 , cioè se il progetto recupera il capitale investito, attualizzato all'anno zero e al tasso (i) , con una eccedenza, almeno positiva, pari al VAN. Per ragioni di semplicità e data la durata normalmente non breve dei progetti, si sceglie la legge di capitalizzazione composta ad un prescelto tasso di interesse periodale (i) , positivo e costante per tutta la durata del progetto. In altre parole si pone:

$$f(A) = VAN = \sum_{k=0}^n a_k v^k \quad (4)$$

Una notazione a parte, merita la variabile "tasso di attualizzazione" il cui valore, introdotto nella formula di calcolo del VAN, è determinante per la scelta, l'accettazione, o il rifiuto di un determinato progetto. La scelta del valore da attribuire a tale variabile, è conseguente, e non di univoca determinazione, ad una complessa serie di valutazioni che riguardano, sia aspetti patrimoniali e

finanziari dell'impresa, sia ipotesi su possibili strategie e scenari di sviluppo e/o diversificazione del business caratteristico dell'impresa.

Se il tasso di attualizzazione (i) viene scelto con riferimento al costo di provvista del capitale sui mercati finanziari, esso è influenzato; dalle dimensioni dell'impresa, dalla sua struttura patrimoniale e finanziaria, dal suo livello di capitalizzazione, in definitiva dal suo potere negoziale nei confronti del sistema bancario.

Se invece il tasso di attualizzazione (i) viene scelto, con riferimento al costo opportunità del capitale, è indispensabile operare una distinzione.

- Il progetto, di cui si valuta la redditività, è nell'area di business in cui già opera l'impresa, con la sua gestione caratteristica o in area di business affine, (si persegue una ipotesi di strategia di diversificazione lungo la catena del valore); allora il costo opportunità del capitale, da inserire nel processo di valutazione, è derivato, (con opportune considerazioni comparative rispetto ai competitors e alle sempre presenti difficoltà ad entrare in un nuovo segmento di mercato) dal tasso di redditività proprio dell'impresa.
- Il progetto, di cui si valuta la redditività, è in area di business diversa da quella in cui già opera l'impresa, con la sua gestione caratteristica, (si persegue una ipotesi di strategia di diversificazione lungo una diversa catena del valore); allora il costo opportunità del capitale, che è uno standard di redditività del progetto da inserire nel processo di valutazione, è determinato (con opportune considerazioni dovute alle sempre presenti difficoltà ad entrare in un nuovo business) nei mercati finanziari attraverso modelli di valutazione che fanno riferimento al tasso di rendimento di attività con rischio equivalente al progetto in esame. Il più noto, e usato in questo studio, è il modello del CAPM (Capital Asset Pricing Model):

$$(i) = r_f + \beta(r_m - r_f) \quad (5)$$

Quando si utilizza il criterio del VAN si accettano, più o meno, consapevolmente, le seguenti ipotesi finora sottintese:

- Se il progetto prevede costi iniziali, seguiti da ricavi, allora si considera sempre di accelerare la chiusura dell'esposizione iniziale utilizzando a questo scopo ogni ricavo che si rende disponibile; ciò significa che non è possibile investire ricavi in operazioni più redditizie di quanto siano costosi i fondi investiti nel progetto.
- Se il progetto prevede ricavi iniziali, seguiti da costi, allora si considera sempre di investire ogni ricavo disponibile, prelevando poi dal capitale investito i fondi necessari per coprire i costi del progetto; ciò significa che le operazioni nelle quali si investono i ricavi sono almeno redditizie quanto sono costosi i fondi che esse impiegano.
- Il criterio del VAN incorpora la cosiddetta ipotesi di simmetria dei tassi; cioè si assume che il tasso di attualizzazione, utilizzato per valutare il progetto, sia un tasso *passé-partout*, in grado di misurare sia la remunerazione dei fondi investiti nel progetto, sia il rendimento dell'impiego dei fondi che esso libera. Questa ipotesi contrasta pesantemente con la realtà, che invece, di norma, vede i tassi di provvista di fondi superare quelli di rendimento degli impieghi. Chi utilizza questo criterio di valutazione, è bene che abbia la massima consapevolezza del ruolo che, l'ipotesi di simmetria dei tassi, svolge.

Il VAN è un criterio assoluto, o dimensionale, poiché, una volta stabilito il tasso di attualizzazione, fornisce il valore monetario, attualizzato all'anno zero, eccedente il capitale investito nel progetto.

5.2 Tasso di rendimento interno TIR.

Il criterio del tasso interno è definito come segue:

Si parte dall'equazione che si ottiene azzerando il valore attuale netto $VAN(i)$ del progetto cioè dall'equazione

$$VAN(i) = \sum_{k=0}^n a_k v^k = 0 \quad \text{con } (i) > -1 \quad (6)$$

Qualora esista un unico tasso $(i) > -1$, chiamiamolo $(i)^\circ$, che verifica l'equazione, allora si assume $f(A) = (i)^\circ = \text{TIR}$ come tasso interno del progetto, ovvero tasso implicito, perché implicitamente definito in modo univoco dall'equazione. Questo tasso non è un tasso contrattuale assegnato a priori all'interno di un contratto, ma è nascosto nel progetto, è un tasso interno, cioè è l'unico tasso $(i) > -1$ che azzeri il valore attuale netto del progetto. Il tasso interno misura il rendimento dei capitali investiti nel progetto

ecco perché si parla di tasso interno di rendimento TIR. Quindi un progetto è accettabile se il costo opportunità del capitale, individuato come già visto al punto precedente, è inferiore al tasso interno di rendimento, chi fornisce il capitale necessario per sostenere il costo del progetto può recuperarlo ottenendo una remunerazione pari al TIR annuo composto ed il beneficio derivante dalla attuazione del progetto è tutto riassunto in tale remunerazione. E' appena il caso di avvertire che non si parla di tasso interno, sia quando l'equazione $VAN(i)=0$ non ammette alcuna radice $(i)>-1$, sia quando ne ammette più di una. Va detto che, per il fatto di presentarsi come un indicatore sintetico ed oggettivo, cioè da calcolarsi senza dare spazi al discrezionalità di alcun genere (al contrario del VAN), il criterio del tasso interno, gode di preferenze particolari tra gli utilizzatori di tali metodi di valutazione. E' opportuno ricordare che, mentre il criterio del VAN è un criterio assoluto o dimensionale, il criterio del TIR è un criterio relativo o adimensionale; la conseguenza di ciò è che il tasso interno è un criterio "daltonico" poiché possiamo trovare eguali tassi interni per progetti profondamente diversi, sia per la dimensione dei capitali investiti, sia per il periodo di recupero del capitale investito.

5.3 Pay-back time PBT.

Nel criterio del pay-back time si individua, la scadenza temporale (p) , alla quale il totale dei ricavi già scaduti eguaglia la somma dei costi iniziali; si pone $f(A)=(p)=PBT$ con $(p)\leq(n)$ il criterio conduce alla scelta del progetto che presenta il recupero più rapido dei costi iniziali. E' opportuno sottolineare che questo criterio di valutazione è totalmente insensibile alle perturbazioni che interessano capitali e scadenze oltre il tempo di recupero. Si può, in definitiva, affermare che il tempo di recupero non è un vero e proprio indice di redditività di un investimento, ma un indicatore di massima liquidità quindi, l'uso del criterio si giustifica nell'analisi di investimenti che presentano forti elementi di aleatorietà, per misurare il tempo durante il quale si corre il rischio di non riuscire a recuperare, per intero, nemmeno il capitale investito.

Nel presente studio, la mancanza di un definito soggetto economico idoneo ad affrontare l'operazione di investimento, ma anche l'incertezza sulle possibilità di vendita dell'energia elettrica e sui costi del combustibile, hanno reso necessaria l'individuazione di differenti prospettive tariffarie sia di vendita che di acquisto, ma anche la scelta di una forbice sul valore dei parametri economici necessari alla valutazione degli indici economici di confronto.

Dal punto di vista puramente impiantistico sono stati esaminati due scenari differenti:

- A. Centrale di cogenerazione e rete di teleriscaldamento e teleraffrescamento con acqua calda a 90°C;
- B. Centrale di cogenerazione e rete di teleriscaldamento e teleraffrescamento con acqua surriscaldata a 120°C;

Per il prezzo di acquisto del combustibile, metano in ogni scenario, sono stati considerati:

- un prezzo ricavato dalla tariffa della Fiorentinagas S.p.A. per un'utenza in cogenerazione
- un prezzo inferiore nel caso sia possibile per accedere ad una tariffa speciale

Per il prezzo di vendita dell'energia elettrica è stato stimato cautelativamente soltanto un prezzo per la vendita al gestore ed un prezzo di vettoriamento utilizzando la rete nazionale.

Sono stati valutati i prezzi di vendita dell'energia termica alle utenze ipotizzando un prezzo dell'unità di energia termica corrispondente al prezzo dell'equivalente energetico in gas metano.

6. RISULTATI E CONCLUSIONI

L'analisi energetica delle condizioni operative dell'impianto stimate annualmente su base oraria hanno portato a determinare l'indice energetico dell'impianto secondo la consueta relazione:

$$IEN = \frac{E_e}{E_c} + \frac{1}{0.9} \frac{E_t}{E_c} - a \quad (7)$$

dove

$$a = \left(\frac{1}{0.51} - 1 \right) \cdot \left(0.51 - \frac{E_e}{E_c} \right) \quad (8)$$

L'analisi annuale della gestione dell'impianto di teleriscaldamento ha fornito i valori dell'indice energetico riportati in tab. 4.

Tab. 4 – Indice energetico

Scenario	IEN
A – Rete in acqua calda	0.68
B – Rete in acqua surriscaldata	0.66

L'analisi economica ha dimostrato come lo scenario B presenti indici economici leggermente migliore che lo scenario A nel caso di utilizzo solo invernale della centrale di cogenerazione, grazie a costi di investimento inferiori nella realizzazione della rete, mentre il risultato si inverte nel caso di utilizzo anche estivo dell'impianto, in quanto nello scenario A la possibilità di erogare energia frigorifera alle utenze risulta nettamente superiore che nello scenario B.

Occorre inoltre considerare che l'impianto ad acqua surriscaldata risulta più rigido rispetto alla variazione del numero di utenze. Infatti la limitazione a 120°C per l'acqua surriscaldata è legata alla possibilità di utilizzare lo stesso tipo di tubazioni utilizzate per l'acqua calda, variando solo il diametro e riducendo perciò la spesa. Tuttavia anche la tubazione per acqua calda potrà essere in futuro alimentata eventualmente ad acqua surriscaldata permettendo così di ampliare la potenza trasmissibile. Essa permette inoltre di trasferire una maggior quantità di acqua refrigerata, aumentando la potenza e l'energia vendibile durante il periodo estivo.

Nel quadro di incertezze in cui è inserita l'analisi, parrebbe opportuno orientarsi verso sistemi a maggior flessibilità, stante lo scarso vantaggio economico relativo presentato dall'altra soluzione.

Alcune ipotesi considerate mostrano indicatori economici migliori per uso solo invernale, rispetto al caso di uso annuale. In effetti in questi casi si riscontra un prezzo di vendita estivo delle varie forme di energia, che non copre i costi; in questi casi il funzionamento estivo sarebbe da attuarsi solo per garantire alle utenze il servizio, qualora si decidesse comunque di effettuare l'investimento.

Alcune ipotesi considerate non presentano ritorno economico.

L'analisi delle diverse ipotesi considerate fa emergere i seguenti punti:

- Al fine di avere ritorno economico è fondamentale il regime delle tariffe, sia per la vendita di energia elettrica che per l'acquisto del gas
- Sarebbe opportuno aumentare il numero delle utenze servite, in particolare sulle due reti minori, cercando di aprirsi ad utenze con utilizzazione anche notturna.
- La tipologia di attività presenti nella zona presenta una domanda concentrata nel periodo diurno. Per permettere una gestione migliore dell'impianto attraverso l'uso di accumuli, diviene importante la gestione del servizio calore, dato che tali accumuli sarebbe opportuno fossero decentrati.
- La scelta di una rete con scambiatori nelle sottostazioni è legata alla ipotesi di gestione autonoma degli impianti locali da parte degli utenti. Il servizio calore permetterebbe, con la presa in carico degli impianti, di decidere gli aspetti tecnici che permetterebbero di modificare la gestione del sistema, aumentando ad esempio la differenza di temperatura utilizzabile in rete.

L'individuazione di differenti prospettive tariffarie e la necessità di individuare una forbice sul valore dei parametri economici necessari alla valutazione degli indici economici di confronto, oltre ad influenzare fortemente i parametri dell'analisi economica, comporta, in termini di simulazione, la creazione di un elevato numero di scenari possibili che richiedono tempi di simulazione piuttosto lunghi.

Legenda

\bullet_k	Flussi di cassa, su base annua, negativi (costi) positivi (ricavi) per il periodo di vita utile del progetto
C_a	Coefficiente per la ventilazione ($W m^{-3} K^{-1}$)
c_p	Calore specifico dell'aria ($J kg^{-1} K^{-1}$)
E_c	Energia primaria immessa annualmente nell'impianto (J)
E_{cond}	Energia per condizionamento (J)
E_e	Energia elettrica utile resa annualmente al netto di autoconsumi (J)
E_{fe}	Indicatore caratteristiche dell'edificio ($m^{-1}K^{-1}$)
E_t	Energia termica utile resa annualmente dall'impianto (J)
f_c	Fattore correttivo
G	Portata d'aria ($kg s^{-1}$)
i	Tasso di attualizzazione
I_{sole}	Irraggiamento solare ($W m^{-2}$)
I_{ms}	Irraggiamento solare medio stagionale ($W m^{-2}$)
n	Numero di anni di vita utile del progetto
n_g	Numero di giorni (s)
Pc_e	Parametro correttivo estivo medio ($J K m^2$)

Pc_t	Parametro correttivo di temperatura (K s)
r	Numero di ricambi orari d'aria
r_f	Tasso risk free
$r_m - r_f$	Premio per il rischio di mercato.
S	Superficie della parete (m^2)
S_{equiv}	Superficie equivalente dell'edificio (m^2)
t	Temperatura (K)
U	Trasmittanza della parete ($W m^{-2}$)
V	Volume dell'edificio (m^3)

Simboli greci

β	Coefficiente misura del rischio sistematico per la tipologia di investimento
v_k	Fattore di attualizzazione $(1+i)^{-1}$
τ	Intervallo di tempo (s)

Pedici

e	esterno
i	interno
o	superficie opaca
v	superficie vetrata

Bibliografia

- M. Alabisi, R. Sidri. Gestione archivio anno tipo. ENEL CRTN. Milano. 1985.
- Carla Balocco. Tesi di Dottorato di Ricerca in Energetica. Applicazione di Metodi di Campionamento Statistico per la Stima dei Fabbisogni Termici Urbani. 1995.
- P.Brunello, L.De Santoli. Valutazione dei consumi energetici stagionali negli impianti di condizionamento estivo. Cond. Dell'Aria Risc. Refr. n.5. maggio. 567. 1993.
- C.Franceschini. L'impiantistica solare nel campo delle basse temperature. Regione Toscana-ERTAG. 1981.
- G.Grazzini, C.Balocco. A statistical method to evaluate urban energy needs. Int. Journal Energy Research. Vol.21, n.14. 1321-1330. 1997.