

**IMPIEGO DEL SOLARE TERMICO (PRODUZIONE DI ACQUA CALDA),
TERMODINAMICO (ALTA TEMPERATURA PER LO “SPLITTING”
DELL’ACQUA IN H₂ E O₂) E FOTOVOLTAICO (ELETTRICITA’) NEGLI EDIFICI
NELL’AMBITO DI UNA PIANIFICAZIONE URBANA.**

Dr. Ing. Enrico Cingottini

Tutor: Dr. Ing. Giovanni Pino

Prefazione

Il Master dell'ing. Enrico Cingottini, nonché lo stage in APAT per il relativo tirocinio, si inserisce nelle attività del Settore Innovazione Tecnologica dell'APAT sulla valutazione degli aspetti ambientali connessi alla utilizzazione delle risorse energetiche rinnovabili, in particolare dell'energia solare, con il relativo studio sulle applicazioni nelle aree metropolitane del solare termico, foto-voltaico e termodinamico.

L'attività sviluppata ha avuto una grande ricaduta per il Progetto Aree Metropolitane dell'APAT per la preparazione del III° Rapporto APAT sulle Aree Metropolitane, attraverso soprattutto l'utilizzo del solare termico nel riscaldamento domestico, dove contribuisce per quasi i 2/3 del fabbisogno stagionale, e per la produzione di acqua calda sanitaria necessaria per l'intero anno solare. Ciò anche allo scopo di adempiere agli obblighi posti dal Protocollo di Kyoto, limitazione dei gas serra, e dalla normativa della UE, limitazione degli inquinanti vari. Tali applicazioni comporteranno dunque la riduzione di inquinanti e gas serra durante la produzione di acqua calda per il riscaldamento e per gli usi sanitari.

Anche l'utilizzo del solare fotovoltaico, integrato negli edifici delle abitazioni, potrà ridurre i consumi elettrici domestici che attualmente vengono coperti soltanto dalla rete elettrica nazionale e sostenuti solo con l'impiego di combustibili fossili.

Pure il solare termodinamico potrà fornire, attraverso le relative reti, l'energia elettrica e quella termica necessaria per i quartieri delle aree metropolitane attraverso un sistema di generazione di energia distribuita nel territorio.

Tale integrazione energetica sarà di grandissimo interesse per gli anni a venire in quanto si cominceranno finalmente a ridurre le grandi quantità di inquinanti vari e gas serra che sempre di più opprimono le popolazioni che vivono all'interno delle aree metropolitane.

La speranza sarà dunque quella di coprire tutta la domanda elettrica e termica (caldo/freddo) con l'energia solare che soprattutto in Italia ancora non è adeguatamente sfruttata e sviluppata nonostante l'ottima posizione geografica relativa alla insolazione del territorio nazionale.

Colgo dunque l'occasione di ringraziare sia l'Università di Pisa per avere predisposto un Master in materia di energia solare in ambito metropolitano sia l'ing. Enrico Cingottini che ha trascorso il periodo di tirocinio del Master presso l'APAT – Dipartimento Nucleare, Rischio Tecnologico ed Industriale, Servizio Osservatorio sulle Tecnologie/Settore Innovazione Tecnologica, dimostrando entusiasmo e rigore scientifico negli studi e ricerche che sono stati effettuati.

I risultati inseriti nella tesi dimostrano la grande mole di tecniche e tecnologie che sono state individuate, i processi termodinamici utilizzati ed i rispettivi dati raccolti nei vari utilizzi.

Mi auguro che tale lavoro possa avere una ricaduta immediata nel contesto dei vari enti locali (regionali, provinciali e comunali) cominciando così a diffondere dal basso verso l'alto (approccio bottom-up) sia le tecniche che le tecnologie solari che potranno risolvere gli enormi problemi di inquinamento derivanti dai consumi energetici delle abitazioni e dall'attuale sistema di trasporto.

Ing. Giovanni Pino

Responsabile Settore Innovazione Tecnologica

Roma, 27 Novembre 2006

Abstract

La presente relazione propone una valutazione sull'applicazione generalizzata della tecnologia relativa al solare termico, in seguito ST, fotovoltaico, in seguito FV, e termodinamico in ambito urbano, con particolare riferimento per le prime due al settore residenziale. Per il ST sono trattati i casi di impiego comune, come la produzione di acqua calda sanitaria, in seguito ACS, e di calore per il riscaldamento degli ambienti, e così anche per FV, destinato alla produzione diretta di energia elettrica. Per il solare termodinamico dopo essere state introdotte le soluzioni esistenti e le destinazioni d'uso, è stata valutata l'applicazione nell'ambito della produzione di idrogeno attraverso la scissione diretta della molecola d'acqua. Oltre alla descrizione delle caratteristiche tecnologiche sono presi in considerazione i benefici ambientali legati all'applicazione di tali tecnologie.

English Version

The present relationship proposes an evaluation on the application generalized of the technology related to the solar thermal, subsequently called ST, photovoltaic, subsequently called FV, and thermodynamic in an urban situation, the first two refer particularly to the residential sector. For the ST, cases of common use such as the production of sanitary warm water, subsequently called ACS, and for the heating of the environment are considered and it is the same also for FV, destined for the direct production of electric energy. After the existing solutions and the destinations of use for the solar thermodynamic have been introduced, the application destined for the production of hydrogen through the direct splitting of the water molecule has been. Besides the description of the technological characteristics environmental benefits of the application of such technologies are also considered.

Indice

PREFAZIONE	2
1 INTRODUZIONE	8
2 METODOLOGIA	13
3 SCENARIO ENERGETICO-AMBIENTALE	14
3.1 ASPETTO ENERGETICO	14
3.2 ASPETTO AMBIENTALE	17
4 APPLICAZIONE DEL ST E FV.	22
4.1 SOLARE TERMICO	22
4.1.1 Energia termica prodotta da fonte solare.....	22
4.1.2 Superficie di collettori necessaria	33
4.1.3 Realizzazione Pratica	39
4.1.4 Valutazione Economica	43
4.1.5 Considerazioni aggiuntive	46
4.2 SOLARE FOTOVOLTAICO.....	49
4.2.1 Considerazioni aggiuntive	58
5 SOLARE TERMODINAMICO (CENNI)	60
5.1 TIPOLOGIE DI IMPIANTI SOLARI A CONCENTRAZIONE (CSP)	61
5.1.1 Impianti a torre solare con ricevitore centrale (Solar Tower).....	62
5.1.2 Impianti con collettori a disco parabolico (Parabolic Dish)	63
5.1.3 Impianti con collettori parabolici lineari (Parabolic Trough).....	65
5.1.4 Ricerca e sviluppo futuro.....	68
5.2 SOLARE TERMODINAMICO PER LA PRODUZIONE DI COMBUSTIBILI ECO-COMPATIBILI ..	69
5.2.1 Termolisi della molecola d'acqua	70
5.2.2 Processi Termochimici	75
5.2.3 Sistema SOLAREC.....	77
5.2.4 Solare termodinamico e elettrolisi dell'acqua.....	85
5.3 IMMAGAZZINAMENTO E TRASPORTO DELL'IDROGENO.	86
5.4 UTILIZZO	88
6 CONCLUSIONI	93
7 BIBLIOGRAFIA	94
7.1.1 Siti internet	94
7.1.2 Testi e manuali	94
8 APPENDICE	95
8.1 DATI SUL FABBISOGNO NAZIONALE DI ENERGIA PRIMARIA.....	95
8.2 DATI SUL FABBISOGNO ENERGIA PRIMARIA NEL SETTORE CIVILE (RESIDENZIALE E TERZIARIO).....	96
8.2.1 Residenziale.....	96
8.2.2 Terziario	98
8.3 EMISSIONI CO ₂ SU SCALA REGIONALE.....	99
8.4 DATI.....	100
8.4.1 Calore specifico dell'acqua allo stato liquido saturo.....	100
8.4.2 Dati ISTAT ("Edifici ed abitazioni"- Censimento 2001).....	101
8.5 EQUIVALENTE ENERGETICO DI ALCUNI COMBUSTIBILI	102
8.5.1 Dati rendimento medio centrali elettriche (ENEA)	103
8.5.2 Dati Fattori di Emissione dei combustibili maggiormente usati nel settore residenziale	104
8.5.3 Tabelle di energia libera, entalpia molare standard di formazione	105
8.5.4 Caratteristiche e proprietà dell'idrogeno.....	106

Indice Figure

Figura 1-1 Spettro radiazione solare in condizioni AM0 e AM 1.5	9
Figura 1-2 Distribuzione della radiazione solare nel passaggio attraverso l'atmosfera.	9
Figura 1-3 Componenti della radiazione solare al variare delle condizioni meteorologiche	10
Figura 1-4 Angoli caratteristici che descrivono la posizione del Sole	11
Figura 1-5 Carte solari polari e cartesiane	12
Figura 2-1 Variazione delle emissioni di CO ₂ nei principali macrosettori energetici in Italia. Anni 1990-2003 (%).Fonte ENEA,APAT	18
Figura 2-2 Emissioni di GHG (kton CO ₂ eq) tra 1990-2002	20
Figura 3-1 Impianti a circolazione naturale e a circolazione forzata	24
Figura 3-2 Confronto emissioni (ACS)	32
Figura 3-3 Confronto emissioni(Comby)	32
Figura 3-4 Confronto emissioni(ACS)	33
Figura 3-5 Andamento dell'efficienza dei vari tipi di collettori	36
Figura 3-6 Soluzioni tecniche e architettoniche per l'installazione.	38
Figura 3-7 Distanza tra le schiere di collettori	41
Figura 3-8 Carta solare in coordinante cartesiane	41
Figura 3-9 Distanza tra le file di collettori	42
Figura 3-10 Flussi di cassa relativi ad un impianto ACS a circolazione naturale	44
Figura 3-11 Flussi di relativi ad un impianto ACS a circolazione forzata	45
Figura 3-12 Flussi di cassa relativi ad un impianto Comby a circolazione forzata	45
Figura 3-13 Esempificazione di una cella FV.ISES Italia.	49
Figura 3-14 Rendimenti celle e moduli. Fonte ENEA	52
Figura 3-15 Schemi relativi alle possibili connessioni previste dal meccanismo di scambio sul posto	56
Figura 3-16 Andamento dei flussi di cassa per kWp	57
Figura 3-17 Andamento dei flussi di cassa per utenza residenziale media	58
Figura 3-18 Dispositivo FV a concentrazione. Fonte Università di Ferrara	59
Figura 4-1 Esempi delle tre tecnologie	61
Figura 4-2 Schema sistemi solar tower	62
Figura 4-3 Impianto Solar Two (California)	63
Figura 4-4 Schema sistemi parabolic dish	64
Figura 4-5 Impianto Eurodish (CESI)	64
Figura 4-7 Impianto di Kramer Junction (California)	65
Figura 4-8 Collettore adoperato e schema impianto solare termodinamico con tecnologia ENEA	66
Figura 4-9 Costi di investimenti (da: "Il Mondo" 2004)	67
Figura 4-10 Costi di di produzione (da: "Il Mondo" 2004)	67
Figura 4-11 Previsioni di costi di produzione per quanto riguarda le varie tecnologie	68
Figura 4-12 Frazione molare residua dell'acqua a seguito della termolisi al variare di temperatura e pressione	71
Figura 4-13 Sezione del ricevitore del sistema SOLAREC	78
Figura 4-14 Fasi di funzionamento del ciclo di termolisi della CO ₂	79
Figura 4-15 Grado di dissociazione della molecola di CO ₂ in funzione della temperatura e della pressione	84
Figura 4-18 Confronto tra le emissioni di impianti tradizionali e impianti a celle combustibili (2002). Fonte ENEA	89
Figura 4-19 Esempi di mezzo pubblico, con distributore, e autovettura alimentati ad idrogeno	91
Figura 4-20 Confronto tra motori a combustione interna alimentati da derivati del petrolio e celle a combustibile	92

Indice Tabelle

Tabella 2-1 Consumi finali energia nel settore residenziale per funzione d'uso (ktep).Fonte ENEA,MAP.	14
Tabella 2-2 Consumi finali energia nel settore residenziale per funzione d'uso (ktep). Fonte ENEA, MAP	15
Tabella 2-3 Consumi finali energia nel settore residenziale per funzione d'uso (ktep).Fonte ENEA,MAP	15
Tabella 2-4Consumi di energia per produzione di acqua calda per fonte (Ktep).Fonte ENEA,MAP	16
Tabella 2-5Consumi elettrici obbligati(ktep). Fonte ENEA,MAP	16
Tabella 2-6 Consumi di energia elettrica in GWh relativi al settore terziari. Fonte GRTN	16
Tabella 2-7 Emissioni di CO ₂ dal sistema energetico Italia. Fonte APAT	17
Tabella 2-8 Emissioni di CO ₂ per macrosettori energetici in Italia. Anni 1990-2003 (Tg).Fonte ENEA,APAT	17
Tabella 2-9. Obiettivi previsti con il protocollo di Kyoto	19
Tabella 2-10. Variazioni di emissioni di CO ₂	19
Tabella 2-11 Scenari emissioni tra 2000-2005. Fonte ENEA.....	19
Tabella 2-12 Emissioni comunali totali e percentuali comunali delle emissioni provinciali. Fonte APAT	20
Tabella 2-13. Emissioni di GHG (kton CO ₂ ,eq) tra 1990-2002 nel comune di Roma. Fonte Roma per Kyoto	21
Tabella 2-14 Emissioni di inquinanti per settore in Mg. Fonte APAT	21
Tabella 3-1 Procedimento per il dimensionamento impianto ST.....	25
Tabella 3-2 Ministero dell'Ambiente – Specifica Tecnica di Fornitura	25
Tabella 3-3 Classi e consumi degli edifici. Fonte Legam,biente	28
Tabella 3-4 Fattore di copertura(AmbienteItalia).....	28
Tabella 3-5 Consumi evitati.....	29
Tabella 3-6 Consumi evitati di energia	29
Tabella 3-7 Emissioni di gas serra e inquinanti evitate(produzione ACS).....	30
Tabella 3-8 Emissioni di gas serra e inquinanti evitate(Comby)	30
Tabella 3-9 Emissioni di gas serra e inquinanti evitate intero settore residenziale (produzione ACS)	31
Tabella 3-10 Emissioni di gas serra e inquinanti evitate intero settore residenziale (Comby)	31
Tabella 3-11 Emissioni evitate di CO ₂	33
Tabella 3-12 Dimensionamento superficie collettore	34
Tabella 3-13 Dimensionamento superficie collettore	34
Tabella 3-14 Radiazione solare su Roma	35
Tabella 3-15 Dimensionamento impianti Comby	37
Tabella 3-16 Fattore di copertura per abitazioni ad elevata efficienza energetica	39
Tabella 3-17 Tipologia di edifici, tetti e realizzabilità dell'impianti	40
Tabella 3-18 Coefficienti di correzione della superficie di collettori	40
Tabella 3-19 Costi medi delle varie fonti di energia	43
Tabella 3-20 Fabbisogno procapite di ACS per utenze del settore terziario.....	47
Tabella 3-21 Caratteristiche delle celle FV.....	51
Tabella 3-22 Rendimenti celle e moduli.	52
Tabella 3-23 Energia convertita sistemiFV	53
Tabella 3-24 Superficie del sistema FV (1 kWp)	53
Tabella 3-25 Emissioni di gas serra e inquinanti evitate per kWp	54
Tabella 3-26 Superficie necessaria al completo soddisfacimento di un'utenza residenziale media.....	54
Tabella 3-27 Tariffe relative al meccanismo del conto energia. Fonte ISES Italia.....	55
Tabella 4-1 Fattore di concentrazione e temperature di esercizio	62
Tabella 4-2 Rendimento solare annuo (rendimento di picco)	66
Tabella 4-3 Coefficienti per il calcolo del calore specifico	72
Tabella 4-4 Coefficienti per il calcolo del calore specifico	73
Tabella 4-5 Entalpia ed entropia molare standard di formazione	80
Tabella 4-6 Coefficienti per il calcolo dei calori specifici	80
Tabella 4-7 Variazione della costante di equilibrio in funzione della temperatura	82
Tabella 4-8 Variazione della costante di equilibrio in funzione della temperatura	83
Tabella 4-9 Grado di dissociazione della molecola di CO ₂ in funzione della temperatura e della pressione.....	83
Tabella 4-10 Grado di dissociazione della molecola di H ₂ O in funzione della temperatura e della pressione ...	83
Tabella 4-11 Entalpia molare standard di formazione della reazione di Water Shift Gas.....	85
Tabella 4-12 Dati di esercizio delle più comuni tecniche di produzione di idrogeno	86
Tabella 4-13 Destinazione d'uso e potenza nominale delle varie tipologie di celle.	90
Tabella 4-14 Emissioni gas serra, in Mt CO ₂ equivalenti, nel settore dei trasporti a livello nazionale.....	91
Tabella 4-15 Emissioni gas serra, in Mt CO ₂ equivalenti, nel settore dei trasporti nel Comune di Roma	91
Tabella 7-1 Fabbisogno nazionale di energia primaria	95
Tabella 7-2 Bilancio energetico nazionale 2004.	95
Tabella 7-3 Consumi di energia nel settore civile per fonte.....	96

Tabella 7-4	<i>Consumi di energia nel settore residenziale per fonte</i>	96
Tabella 7-5	<i>Beni durevoli posseduti dalle famiglie</i>	97
Tabella 7-6	<i>Consumi finali di energia per tipologia di impianto di riscaldamento</i>	97
Tabella 7-7	<i>Consumi finali di energia per tipologia di impianto di riscaldamento</i>	98
Tabella 7-8	<i>Consumi di fonti energetiche nel settore terziario</i>	98
Tabella 7-9	<i>Emissioni regionali di CO₂</i>	99
Tabella 7-10	<i>Calore specifico dell'acqua allo stato liquido saturo</i>	100
Tabella 7-11	<i>Dati ISTAT "Edifici e abitazioni"</i>	101
Tabella 7-12	<i>Equivalente energetico di alcuni prodotti combustibili</i>	102
Tabella 7-13	<i>Conversione per combustibili liquidi</i>	102
Tabella 7-14	<i>Calcolo del rendimento medio delle centrali termoelettriche</i>	104
Tabella 7-15	<i>Fattori di emissione dei combustibili maggiormente usati nel settore residenziale</i>	104
Tabella 7-16	<i>Energia libera molare standard di formazione (kJ/kmol)</i>	105
Tabella 7-17	<i>Entalpia molare standard di formazione (kJ/kmol)</i>	105
Tabella 7-18	<i>Entropia molare standard (J/mol/K)</i>	106
Tabella 7-19	<i>Principali caratteristiche dell'idrogeno, del metano e del propano</i>	106
Tabella 7-20	<i>Proprietà dell'idrogeno, allo stato gassoso e liquido</i>	107
Tabella 7-21	<i>Proprietà dell'idrogeno</i>	107

1 Introduzione

Il panorama energetico internazionale mostra come la situazione attuale di dipendenza da fonti fossili non sia più sostenibile, causa esaurimento delle riserve, aumento dei prezzi di approvvigionamento dovuti a leggi di mercato, crisi a livello economico-politico nelle aree in cui sono situati i giacimenti, con il proliferarsi di conflitti tra Stati, e in ultimo, ma non per ordine di importanza, l'impatto ambientale disastroso. Da ciò il conseguente incremento dell'inquinamento e quindi dei danni alla salute in tutte le forme di vita e le ripercussioni sul clima terrestre.

Si rende quindi necessario un cambiamento radicale con applicazioni su larga scala di fonti di energia alternative e di un'ottimizzazione delle applicazioni energetiche esistenti con la ricerca di una migliore efficienza e una riduzione dei consumi. E' da notare come queste, al momento, non rappresentino le soluzioni alla questione, ma siano un'integrazione necessaria per traghettarci verso un mondo più sensibile ai problemi energetico-ambientale e di sviluppo eco-sostenibile dei vari Paesi. Nello scenario attuale la fonte solare rappresenta, attraverso le varie applicazioni dirette (fotovoltaico, solare termico e termodinamico), una delle soluzioni di maggior interesse.

L'energia che sprigiona quotidianamente il Sole è dovuta alle reazioni nucleari che si consumano al suo interno (in particolare la fusione dell'idrogeno in elio). Queste fanno sì che sulla superficie solare la temperatura sia di circa 5780 K e quindi rappresenti la fonte di energia principale per il nostro pianeta. L'energia che il sole trasmette alla terra attraverso lo spazio si propaga sottoforma di onde elettromagnetiche¹ con uno spettro compreso tra 0.2 e i 4.0 μm , come riportato nel seguente grafico² di figura 1, giungendo al limite dell'atmosfera terrestre con una potenza media, tenuto conto della variazione della distanza tra Terra e Sole nel corso dell'anno, di 1367 W/m^2 (costante solare).

¹ L'energia acquisita dagli atomi durante il processo di fusione che avviene all'interno del Sole viene rilasciata al momento in cui questi giungono in superficie. Tale rilascio di energia avviene sottoforma di radiazione elettromagnetica che può avvenire a differenti lunghezze d'onda a seconda dello stato di eccitazione al quale l'atomo era sottoposto.

² La sigla AM rappresenta l'acronimo di "Air Mass" e sta ad indicare il rapporto tra la lunghezza del percorso effettivo della luce solare a partire dall'atmosfera terrestre e la lunghezza del percorso minimo che si verifica nel caso di radiazione perpendicolare alla superficie terrestre (quindi la curva AM0 corrisponde alla radiazione solare in corrispondenza dell'atmosfera terrestre, mentre la AM1 con sole perpendicolare, AM1.5 considerando le latitudini europee, secondo le normative).

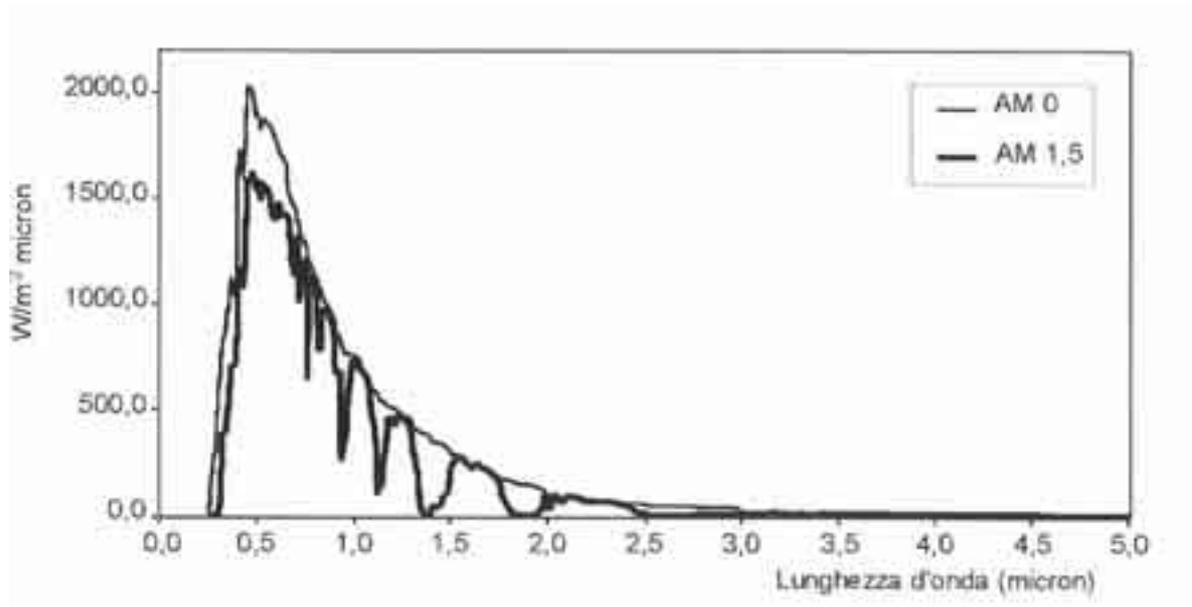


Figura 1-1 Spettro radiazione solare in condizioni AM0 e AM 1.5

Il valore della radiazione solare all'interno dell'atmosfera è sottoposto però ad una serie di attenuazioni dovute a fenomeni di riflessione, a livello dell'atmosfera e assorbimento e diffusione da parte di gas e vapori. Questi fanno in modo di ridurre l'entità della radiazione solare al suolo a valori che in una giornata con cielo completamente sgombro da nuvole può raggiungere, alle nostre latitudini, i 1000 W/m^2 .

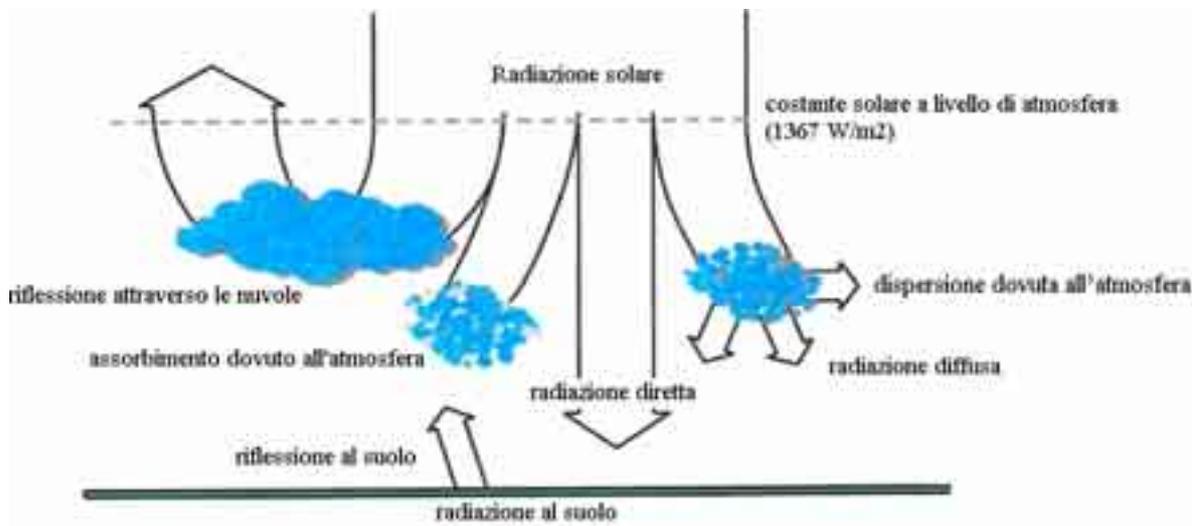


Figura 1-2 Distribuzione della radiazione solare nel passaggio attraverso l'atmosfera.

Come risulta evidente dalla figura precedente la radiazione solare su un piano orizzontale¹ rispetto alla superficie terrestre è possibile scomporla in due componenti:

¹ Considerato completamente pianeggiante con assenza di superfici riflettenti.

- una diretta che rappresenta la quota parte dell'energia radiante che raggiunge direttamente il suolo.
- una diffusa che rappresenta invece la restante parte della radiazione che ha subito i già citati fenomeni attenuativi presenti in atmosfera.

La seguente figura¹ permette di illustrare come varia la radiazione al suolo al variare delle condizioni meteo.

Radiazione solare	Condizioni atmosferiche							
	Cielo sereno	Nebbia	Nuvoloso	Disco solare giallo	Disco solare bianco	Sole appena percetibile	Nebbia fitta	Cielo coperto
globale	1000 W/m ²	600 W/m ²	500 W/m ²	400 W/m ²	300 W/m ²	200 W/m ²	100 W/m ²	50 W/m ²
diretta	90%	50%	70%	50%	40%	0%	0%	0%
diffusa	10%	50%	30%	50%	60%	100%	100%	100%

Figura 1-3 Componenti della radiazione solare al variare delle condizioni meteorologiche

Un'altra componente della radiazione che assume particolare importanza per alcuni dispositivi di captazione dell'energia solare è l'albedo: questa componente corrisponde alla quota di radiazione solare riflessa da una superficie circostante a quella in esame, che va ad incidere sulla superficie stessa (è il caso della presenza di superfici più alte rispetto al punto in esame come edifici, montagne ect, o il caso di superficie captante inclinata rispetto al suolo). Come è logico l'intensità dell'albedo dipende dal materiale che costituisce la superficie riflettente (metallo, neve, fogliame, terra ecc.) e dall'inclinazione della superficie. Quindi si può definire la radiazione globale al suolo come la somma delle tre componenti appena introdotte.

Per l'analisi che mi appresto ad esporre è necessario introdurre alcune grandezze che interessano l'argomento e in particolare gli angoli che permettono di descrivere le posizioni del sole e della superficie captante in funzione del piano orizzontale.

¹ Ing. Reggio Calabria.006450021620050621181657.pdf

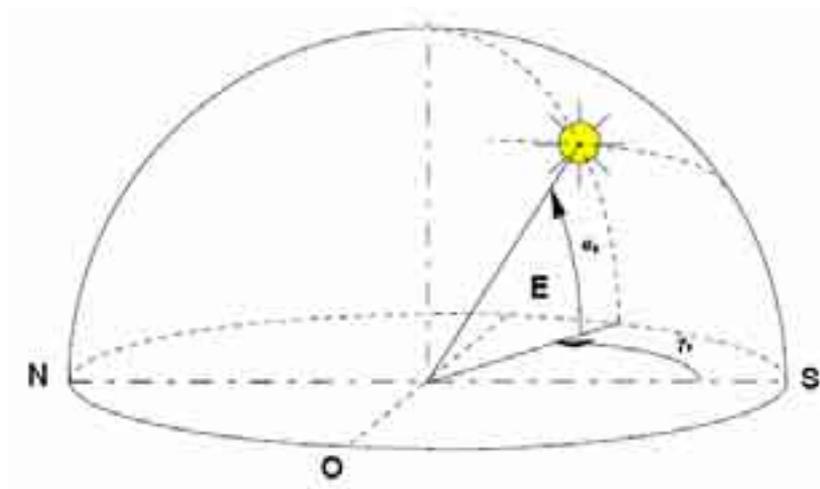
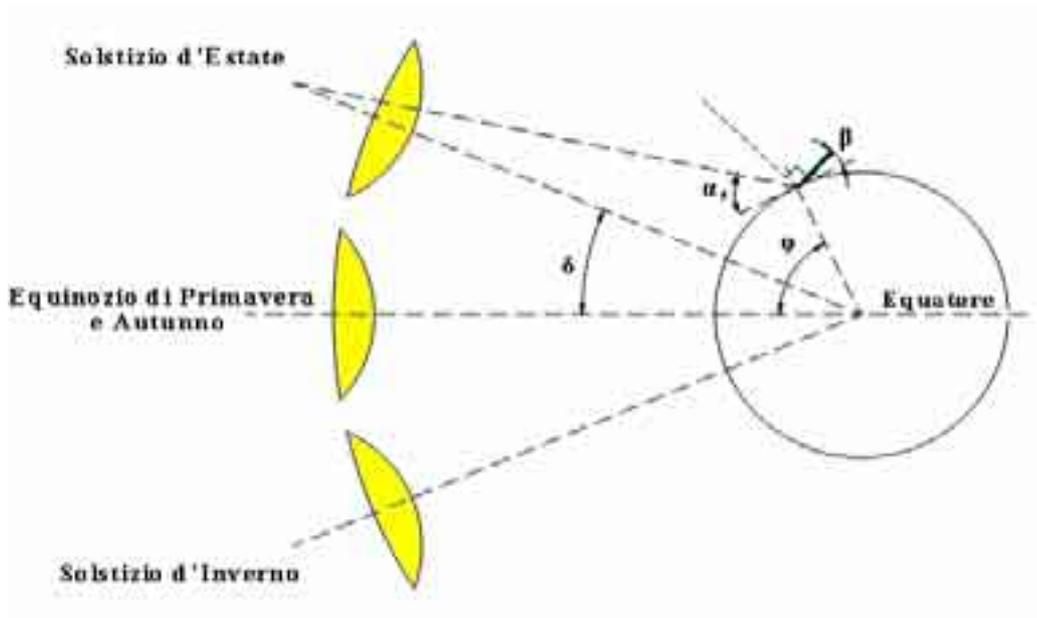


Figura 1-4 Angoli caratteristici che descrivono la posizione del Sole

dove:

- φ : indica la latitudine alla quale si trova la superficie rispetto al parallelo di riferimento, cioè l'Equatore
- α_s : indica l'altezza solare, cioè l'angolo compreso tra la direzione dei raggi solari e il piano orizzontale alla superficie terrestre
- δ : indica la declinazione cioè l'angolo che tra la direzione assunta dai raggi solari e l'Equatore.
- β : indica l'inclinazione della superficie in esame rispetto alla superficie terrestre (viene detto anche tilt).

- γ_s : indica l'azimut solare cioè l'angolo orizzontale compreso tra il piano verticale parallelo alla direzione dei raggi solari e la direzione sud.

Per quanto riguarda la determinazione dell'altezza solare e dell'azimut in un periodo dell'anno qualunque è possibile avvalersi di diagrammi che descrivono i percorsi solari, su assi polari e cartesiane, che variano a seconda della latitudine alla quale si trova la località in cui è posizionata la superficie in questione.

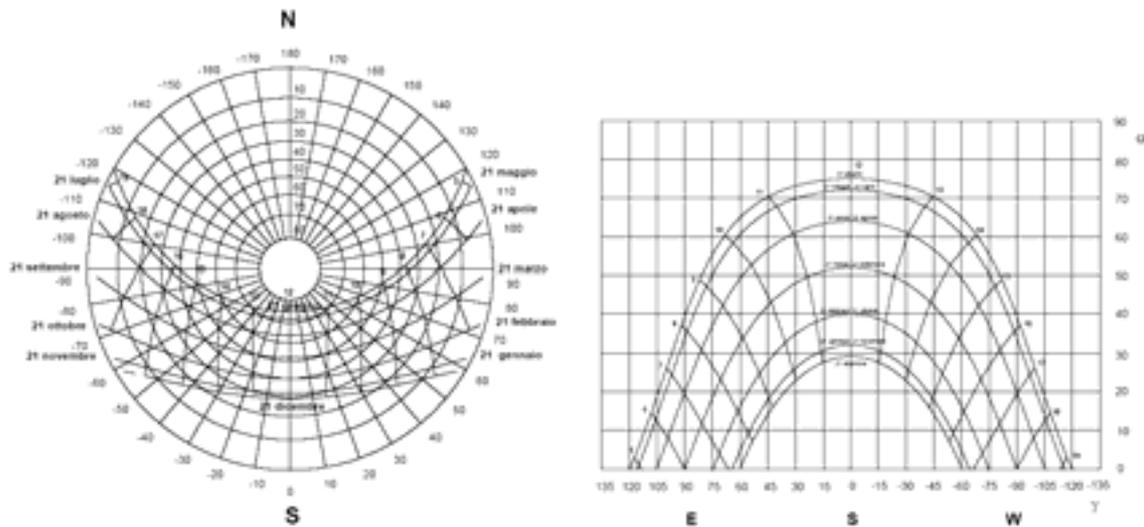


Figura 1-5 Carte solari polari e cartesiane

Esistono vari argomentazioni che permettono di ritenere la fonte solare tra le più promettenti per uno sviluppo eco-sostenibile dell'economia globale. In particolare questa rappresenta una fonte di energia gratuita, inesauribile¹, nonché disponibile su tutta la terra, anche se in concentrazioni differenti, e soprattutto pulita rispetto alle fonti tradizionali di energia.

Tra gli aspetti negativi quello di maggior peso è legato alla aleatorietà della fonte, dovuta essenzialmente ai seguenti fattori:

- il ciclo giorno- notte
- il ciclo estate- inverno
- l'elevata variabilità dovuta alla possibile presenza di nuvole che può incidere sulla già limitata concentrazione per unità di superficie.

Le tecnologie che sfruttano l'energia solare sono essenzialmente tre:

- il solare termico (di seguito ST)
- il solare fotovoltaico (di seguito FV)

¹ rispetto alla vita naturale dell'uomo

- il solare termodinamico

Mentre il FV consente trasformare l'energia solare direttamente in energia elettrica, i sistemi ST e termodinamici forniscono calore rispettivamente a bassa e alta temperatura. A differenza della tecnologia solare termodinamica che utilizza la componente diretta della radiazione solare, i sistemi ST e FV sfruttano sia quella diretta che quella diffusa e quindi possono essere previste utilizzazioni anche a latitudini più elevate.

2 Metodologia

Per la stesura della presente relazione è stata eseguita una ricerca esclusivamente bibliografica. I documenti presi come riferimento provengono dalle banche dati di enti e società¹ riconosciute a livello internazionale e quindi sono da ritenersi attendibili per quanto riguarda gli argomenti trattati.

¹ richiamate nelle note a piè di pagina e nella bibliografia

3 Scenario energetico-ambientale

Prima di fare una stima di quanto possono incidere le tecnologie solari, in particolare ST e FV, nel contesto nazionale e strettamente urbano è necessario avere un'idea dell'attuale situazione dei consumi energetici¹ e relative emissioni, in particolare nel settore civile (residenziale più terziario), dove tali tecnologie possono avere maggiori applicazioni.

3.1 Aspetto energetico

Dai dati ripresi dal “Rapporto Energia e Ambiente 2005” stilato dall'ENEA, dei 143,3 Mtep² consumati negli impieghi finali³ nell'anno 2004 circa 43,3 Mtep è da attribuirsi al settore civile, che rappresenta da solo circa un terzo del fabbisogno energetico nazionale (di cui il 65 % attribuibile al residenziale mentre il restante 35% al terziario⁴). Analizzando in maniera più accurata l'entità dei consumi per ogni tipologia di impiego del settore *residenziale* si ottiene quanto riportato di seguito:

	1990	1995	2000	2001	2002	2003
Riscaldamento	17.272	17.497	17.993	18.728	17.657	19.123
Acqua calda	2.807	2.857	2.907	2.939	2.900	2.952
Usi cucina	1.667	1.621	1.539	1.523	1.504	1.486
Usi elettrici obbligati	3.371	3.696	4.052	4.097	4.222	4.404
Totale residenziale	25.117	25.671	26.491	27.287	26.283	27.966

Tabella 3-1 Consumi finali energia nel settore residenziale per funzione d'uso (ktep).Fonte ENEA,MAP.

¹ In Appendice sono riportate tabelle riassuntive sul fabbisogno energetico nazionale e del solo settore civile.

² I dati sono espressi in Mtep, milioni di Tonnellate Equivalenti di Petrolio, dove 1 tep corrisponde a 10⁷ Kcal

³ Cioè consumi relativi all'utenza, altrimenti nel complesso (cioè se si tiene conto anche dei consumi e delle perdite nel settore energetico per la trasformazione) il fabbisogno nazionale di energia è di 196,2 MTEP.

⁴ Comprende le attività di erogazione di servizi non vendibili, offerti dal settore pubblico, e vendibili, quali commercio ristorazione, credito ed assicurazioni....

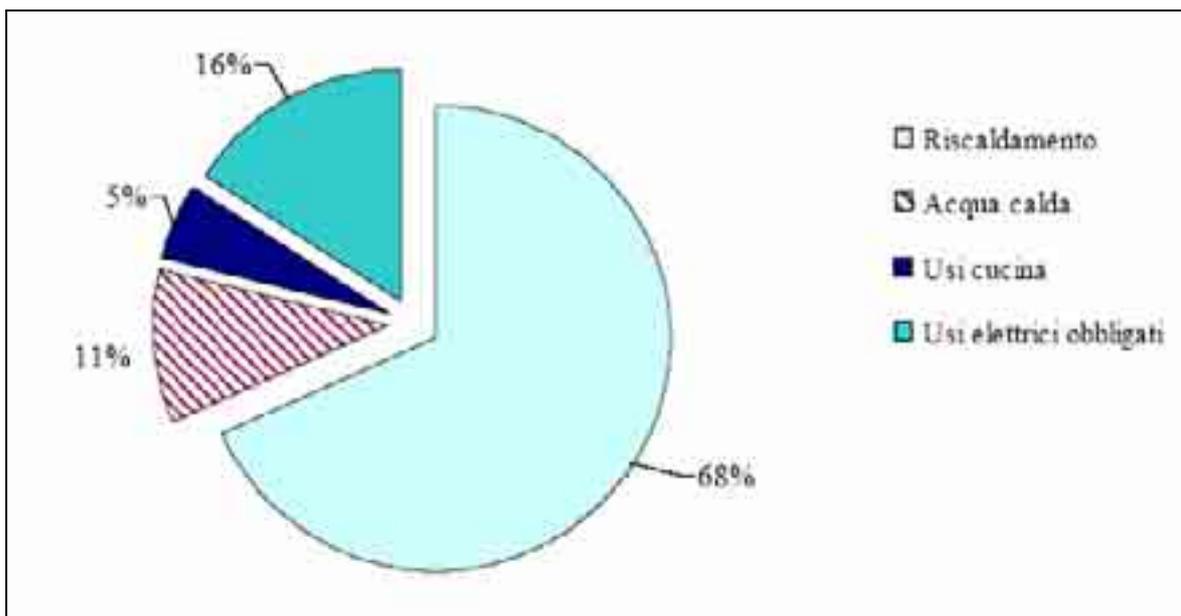


Tabella 3-2 Consumi finali energia nel settore residenziale per funzione d'uso (ktep). Fonte ENEA, MAP

E in dettaglio:

- Per il Riscaldamento:

	1990	1995	2000	2001	2002	2003
Energia elettrica	134	151	156	157	159	162
Gas	9.127	11.239	12.300	12.828	12.254	13.708
Prodotti petroliferi	7.288	5.089	4.340	4.456	4.171	4.114
GPL	903	984	994	980	955	1.026
Gasolio	6.071	4.029	3.291	3.422	3.165	3.040
Olio combustibile	315	76	55	54	50	48
Carbone	71	94	52	61	14	14
Totale fossili	16.486	16.421	16.692	17.346	16.438	17.837
Legna	652	925	1.145	1.225	1.059	1.125
Totale consumi ⁽¹⁾	17.272	17.497	17.993	18.728	17.657	19.123

Tabella 3-3 Consumi finali energia nel settore residenziale per funzione d'uso (ktep). Fonte ENEA, MAP

(Nella lettura dei dati relativi al riscaldamento è necessario considerare anche la componente climatica per ciò che riguarda le variazioni dei consumi tra i diversi anni)

- Per l' ACS:

	1990	1995	2000	2001	2002	2003
Energia elettrica	906	950	929	922	915	907
Gas naturale	1.312	1.476	1.602	1.631	1.625	1.690
Prodotti petroliferi	581	422	372	381	359	355
GPL	92	104	109	108	107	114
Gasolio	476	315	260	270	250	239
Olio combustibile	12	3	2	2	2	2
Carbone	8	9	4	4	1	1
Totale fossili	1.901	1.907	1.978	2.017	1.986	2.046
Totale usi finali ^(*)	2.807	2.857	2.907	2.939	2.900	2.952

Tabella 3-4 Consumi di energia per produzione di acqua calda per fonte (Ktep). Fonte ENEA, MAP

- Per elettrodomestici¹:

	1990	1995	2000	2001	2002	2003
Consumi (ktep)	3.371	3.696	4.052	4.097	4.222	4.404
Usi elettrici obbligati su totale consumi (%)	13,4	14,4	15,3	15,0	16,1	15,7
Usi elettrici obbligati su consumi elettrici famiglie (%)	74,3	75,1	77,1	77,4	78,0	78,8

Tabella 3-5 Consumi elettrici obbligati (ktep). Fonte ENEA, MAP

Buona parte dell'energia elettrica consumata dagli elettrodomestici serve a riscaldare l'acqua per il lavaggio (come nel caso della lavatrice e della lavastoviglie)² e quindi deve essere considerata nella trattazione relativa all'applicazione del ST.

Per quanto riguarda il settore **terziario**³ i dati a disposizione per funzione d'uso sono relativi al solo consumo di energia elettrica:

	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Commercio	13.797,1	14.748,7	15.632,2	16.358,5	17.519,9	18.992,0
Alberghi, ristoranti e bar	8.132,7	8.516,1	8.944,3	9.312,3	9.744,5	10.431,2
Credito e assicurazioni	2.340,3	2.410,2	2.410,9	2.440,1	2.462,7	2.571,5
Comunicazioni	2.751,4	2.849,2	3.114,8	3.337,1	3.277,9	3.582,9
Altri servizi vendibili	10.066,8	10.718,7	11.259,0	12.205,9	13.278,6	14.328,5
Totale servizi vendibili	37.088,3	39.242,9	41.361,2	43.653,9	46.283,6	49.906,1
Pubblica Amministrazione	3.234,0	3.364,1	3.453,2	3.499,8	3.603,6	3.897,8
Illuminazione pubblica	5.183,9	5.373,6	5.471,2	5.560,7	5.699,7	5.790,8
Altri servizi non vendibili	5.565,7	5.917,8	6.309,5	6.521,0	7.244,0	7.831,8
Totale servizi non vendibili	13.983,6	14.655,5	15.233,9	15.581,5	16.547,3	17.520,3
Totale	51.071,9	53.898,4	56.595,1	59.235,4	62.830,9	67.426,4

Tabella 3-6 Consumi di energia elettrica in GWh relativi al settore terziari. Fonte GR TN

¹ Vedi in Appendice il trend di elettrodomestici posseduti dalle famiglie

² Non sono menzionati gli scaldabagni in quanto considerati nella funzione d'uso precedente (produzione ACS)

³ Vedi in Appendice il trend dei consumi dal 1990 al 2003

E' da tenere presente che i dati sono aggiornati al 2003, il che non tiene conto degli ultimi tre anni in cui si è verificato un crescente aumento di energia nell'intero settore civile legato in particolar modo all'acquisto di impianti di condizionamento.

3.2 Aspetto ambientale

I dati relativi all'emissione di anidride carbonica (CO₂) legato al consumo energetico nel settore civile si desumono dalle seguenti tabelle¹:

Totale emissioni CO₂ (Gg)	468.960
Di cui da settore energia	456.755
▪ Industrie energetiche	160.883
▪ Industrie manifatturiere e costruzioni	85.035
▪ Trasporti	126.015
▪ Altri settori (Commerciale, Domestico, Agricoltura)	84.162
▪ Altro	660

Tabella 3-7 Emissioni di CO₂ dal sistema energetico Italia. Fonte APAT

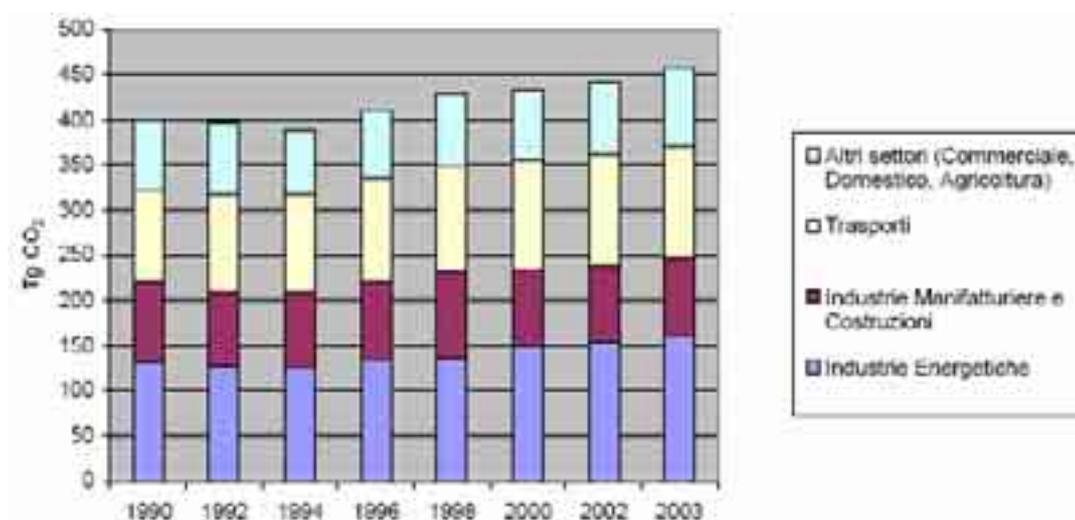


Tabella 3-8 Emissioni di CO₂ per macrosettori energetici in Italia. Anni 1990-2003 (Tg). Fonte ENEA, APAT

¹ ENEA-“Rapporto Energia e Ambiente 2005”, pag. 296 e 297. C'è da notare una discrepanza sui valori riportati sia nello stesso documento a pag. 346 e sia ad esempio con i valori riportati nel sito ARPA Lombardia per la medesima regione.

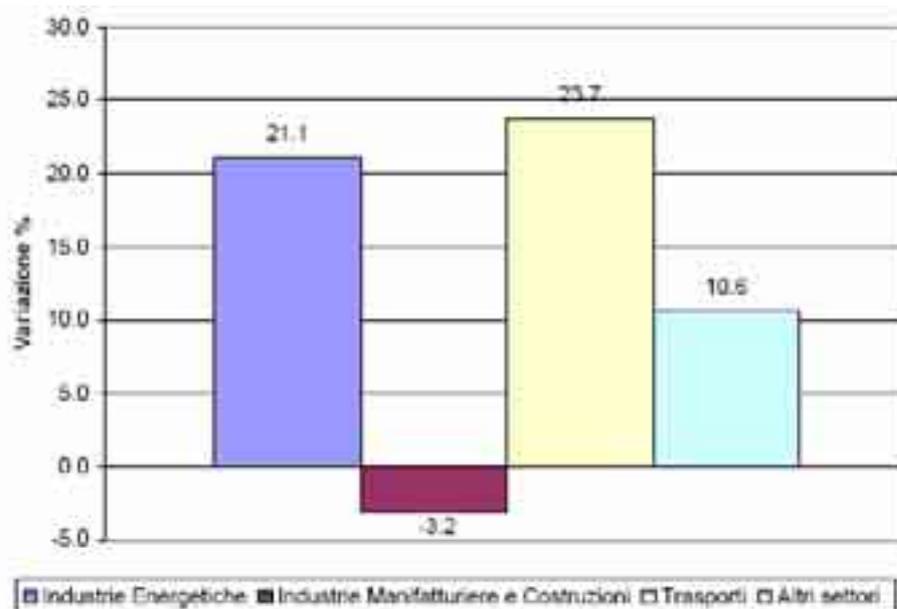


Figura 3-1 *Variazione delle emissioni di CO₂ nei principali macrosettori energetici in Italia. Anni 1990-2003 (%).Fonte ENEA,APAT*

Quest'ultimo grafico assume particolare importanza se tenuto conto degli obiettivi previsti dal Protocollo di Kyoto che impongono, per il nostro Paese, nel periodo compreso tra il 2008 e il 2012, una riduzione delle emissioni di gas effetto serra del 6,5% rispetto ai dati registrati nel 1990. Infatti si nota che nella realtà il trend delle emissioni si è comportato in maniera opposta a quanto stabilito, tranne che per il settore "Industrie Manifatturiere e Costruzioni"¹.

E' necessario precisare che parte delle emissioni di CO₂ relativa all'industria energetica è dovuta alla trasformazione di energia primaria in elettrica, che in seguito viene sfruttata nel settore civile (quota di circa il 20%). Tenuto conto di ciò, è possibile, in virtù dei dati a disposizione, fare una stima approssimata sulla riduzione di emissioni al quale sarà costretto l'intero settore civile² al fine di ottemperare agli obiettivi previsti dal Protocollo di Kyoto:

	1990	2003	Δ
Emissioni CO₂, [MT]	403,00	456,10	53,1
%	100%	113,2%	13,2%
Limiti imposti dal Protocollo di Kyoto (- 6,5% dati 1990)	377	121,0%	21,0%

¹ La diminuzione in questo caso è stata però influenzata oltre che da un miglioramento dell'efficienza energetica dei sistemi adoperati, anche da una crisi, soprattutto del campo manifatturiero.

² Ipotizzando che tutti i settori riducano le emissioni del 6.5%.

Tabella 3-9. Obiettivi previsti con il protocollo di Kyoto

Da cui:

		1990	2003
		MT	MT
<i>Trasporti</i>		130,07	160,9
<i>Ind. Manifatturiere e Costruzioni</i>		87,81	85,0
<i>Industrie Energetiche</i>		104,05	126,0
Settore (Commerciale, Domestico, Agricolo)		76,13	84,2
Settore Agricolo ¹	1,90%	7,66	8,67
Settore Civile	98,10%	68,5	75,5
Comprendendo il 20% delle emissioni dovute alla produzione di energia elettrica		89,3	100,7
Riduzione Emissioni CO₂		5,80	17,26

Tabella 3-10. Variazioni di emissioni di CO₂

Per quanto riguarda invece gli inquinanti come gli ossidi di azoto (NO_x), di zolfo (SO_x) e di polveri sottili (PM₁₀) i dati a disposizione a livello nazionale sono quelli evidenziati nella seguente tabella:

Settori	2000	2005	2000	2005
Civile	63.403	71.189	20.587	22.341
Trasporto stradale	722.533	604.383	10,87	13.124
Trasporto non stradale	168.403	186.376	1,726	1,949
Trasporto marittimo	83.252	98.402	76,71	94.394
Impianti energetici	160.025	149,47	368.325	130.714
Industria	232.769	212.001	307.664	177.692
Totale	1430.385	1321.821	786.152	440.414

Fonte: ENEA

Settori	2000	2005
Civile	20,2	40,2
Trasporto stradale	55,3	47,6
Trasporto non stradale	27,2	27,2
Trasporto marittimo	5,9	6,8
Impianti energetici	11,3	8,6
Industria	56,5	55,2
Agricoltura	16,1	16,1
Rifiuti	19,4	19,4
Attività umana	7,3	7,2
Totale	219,2	228,3

Fonte: ENEA

Tabella 3-11 Scenari emissioni tra 2000-2005. Fonte ENEA

Dal 2° Rapporto APAT “Qualità dell’Ambiente Urbano”, edizione 2005, è possibile conoscere i valori delle emissioni di inquinanti riferiti ai comuni delle maggiori città italiane (espressi in tonnellate):

¹ 1,9 % del totale (ENEA-“Rapporto Energia e Ambiente 2005”, pag. 344)

	CO		COVNM		NH ₃		NO _x		PM ₁₀		SO ₂	
	Comune	% Pr.	Comune	% Pr.	Comune	% Pr.	Comune	% Pr.	Comune	% Pr.	Comune	% Pr.
TO	57.191,8	32,5%	17.294,2	30,2%	142,7	1,3%	7.908,3	21,3%	1.017,3	18,7%	961,5	24,1%
GE	96.833,5	74,1%	20.584,6	68,2%	151,3	25,8%	15.516,7	64,4%	2.443,7	72,8%	14.311,2	90,8%
Mi	89.428,9	33,5%	28.201,7	30,2%	338,7	4,7%	14.005,4	27,8%	1.312,5	24,3%	2.530,2	23,5%
VE	36.276,3	43,9%	12.708,3	46,9%	1.800,4	21,7%	18.048,7	61,8%	2.137,3	50,3%	24.182,3	97,5%
TS	40.679,5	88,7%	14.710,8	87,5%	40,0	45,2%	4.138,8	86,1%	823,1	82,9%	2.841,4	96,1%
BO	24.154,2	32,2%	7.675,8	30,5%	112,7	2,7%	4.763,6	24,2%	503,4	20,5%	247,5	15,9%
R	23.828,0	31,6%	7.530,3	29,1%	58,7	4,3%	3.512,1	20,2%	389,4	17,2%	373,8	12,2%
RM	232.212,1	69,3%	59.638,2	65,8%	1.640,1	30,4%	34.200,9	52,1%	3.488,1	51,0%	5.863,8	25,8%
NA	98.094,0	38,0%	27.542,0	39,1%	195,4	5,6%	12.885,1	38,9%	1.388,0	33,1%	5.804,1	8,4%
BA	31.988,3	21,2%	9.089,9	24,3%	77,8	1,7%	4.826,6	18,5%	518,0	13,5%	3.032,7	65,8%
PA	48.268,8	48,0%	14.403,7	49,2%	140,4	4,8%	6.895,2	28,5%	659,8	25,5%	1.202,5	17,4%
ME	40.625,7	50,1%	11.214,6	46,6%	140,8	5,8%	32.236,1	58,8%	1.840,6	40,7%	31.829,2	8,9%
CT	26.881,0	31,6%	7.944,7	34,5%	121,3	5,9%	4.140,0	28,9%	477,2	23,3%	558,1	0,0%
CA	19.851,0	23,9%	7.547,2	29,2%	24,5	0,6%	3.044,9	13,6%	329,0	10,6%	1.393,7	4,1%

Tabella 3-12 Emissioni comunali totali e percentuali comunali delle emissioni provinciali¹. Fonte APAT

Nel comune di Roma, ad esempio, i dati relativi alle varie tipologie di impiego sono i seguenti³:

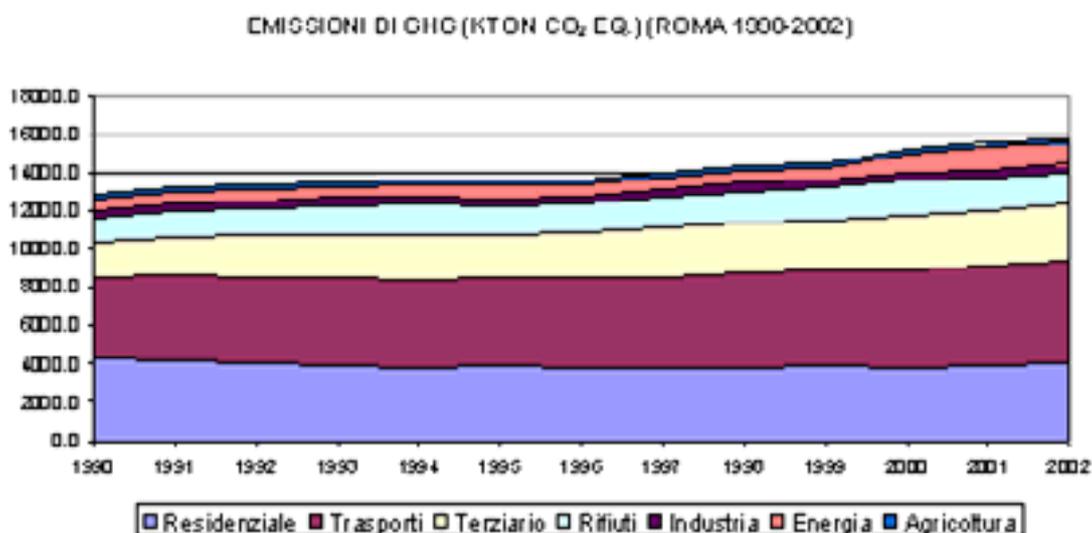


Figura 3-2 Emissioni di GHG (kton CO₂eq) tra 1990-2002

¹ CO = monossido di carbonio; COVNM = composti organici volatili non metanici; NH₃ = idrossido di azoto

³ RomaperKyoto - "Le emissioni di gas effetto serra ed analisi delle maggiori fonti di emissioni nel comune di Roma nel periodo 1990-2002." 9 Gennaio 2006

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Residenziale	4258.2	4201.5	3979.6	3958.1	3840.8	3877.8	3844.3	3819.5	3793.5	3903.8	3850.0	3941.7	3997.8
Trasporti	4296.2	4436.9	4573.7	4556.5	4567.4	4614.6	4699.7	4747.6	4953.2	5026.0	5037.5	5150.6	5355.7
Terziario	1863.7	2013.2	2135.8	2241.2	2297.9	2265.4	2352.2	2529.6	2651.1	2601.8	2870.5	2920.5	2972.1
Rifiuti	1200	1300	1400	1500	1600	1500	1500	1600	1600	1700	1800	1700	1700
Industria	411.8	432.7	439.0	429.1	461.1	383.6	376.9	397.6	425.4	417.6	430.3	433.0	387.5
Energia	532.1	571.6	594.2	572.7	649.5	687.4	633.5	682.2	697.5	626.2	1032.3	1222	1109.6
Agricoltura	200.7	224.9	214.5	224.9	220.7	222.3	200.2	194.8	186.9	178.5	165.6	157.1	154.2
Totale	12842.7	13180.8	13336.8	13482.4	13637.5	13551.2	13606.8	13971.4	14307.6	14453.8	15186.2	15524.8	15676.8

Tabella 3-13. Emissioni di GHG (kton CO₂eq) tra 1990-2002 nel comune di Roma. Fonte Roma per Kyoto

E' da notare come la sola città di Roma rappresenti circa 1/30 delle emissioni di CO₂ dell'intera nazione¹.

Agricoltura	CO	46,41	Natura	CO	2,90	Riscaldamento	CO	16450,74
	COVNM	5,70		COVNM	213,44		COVNM	1516,39
	NH ₃	1223,23		NH ₃	0,04		NH ₃	0,00
	NO _x	1,39		NO _x	0,08		NO _x	2517,96
	PM ₁₀	7,42		PM ₁₀	0,60		PM ₁₀	761,23
	SO ₂	0,00		SO ₂	0,03		SO ₂	852,71
Industria	CO	386,93	Rifiuti	CO	1400,54	trasporti strada	CO	208689,87
	COVNM	3280,67		COVNM	147,05		COVNM	40682,33
	NH ₃	0,95		NH ₃	51,34		NH ₃	364,40
	NO _x	3149,41		NO _x	84,00		NO _x	22803,69
	PM ₁₀	403,15		PM ₁₀	73,07		PM ₁₀	2051,73
	SO ₂	3992,00		SO ₂	350,59		SO ₂	3911,65

Tabella 3-14 Emissioni di inquinanti per settore in Mg. Fonte APAT

¹ In alcune tabelle viene riportato il termine "CO₂ equivalente" perché la CO₂ con gli effetti che genera è presa come gas di riferimento. Gli altri gas effetto serra quali, il metano (CH₄) e il protossido di azoto (N₂O), idrofluorocarburi (HFC), perfluorocarburi (PFC) e esafluoruro di zolfo (SF₆) seppur presenti in percentuale molto inferiore, vengono conteggiati per mezzo di fattori moltiplicativi che hanno come unità di riferimento appunto la CO₂ (es: 1 T di CH₄= 21 T di CO₂ e 14 T di N₂O = 310 T CO₂). Inoltre dalle tabelle presenti nel documento ENEA-"Rapporto Energia e Ambiente 2005. I dati" a pag. 264, si evidenzia come nel corso degli anni i valori registrati siano stati in pratica costanti.

4 Applicazione del ST e FV.

In questo paragrafo sono riportati i criteri adottati nel dimensionamento di impianti ST e FV, facendo riferimento ad un carico termico ed elettrico caratteristico di un'utenza media quale è ad esempio una famiglia con connotati descritti secondo i criteri ISTAT¹, ed i relativi benefici ambientali ed economici derivanti. E' opportuno evidenziare due aspetti legati all'applicazione di queste tecnologie. Il primo è connesso al fatto che essendo la fonte solare distribuita sul territorio permette di produrre energia, elettrica o sottoforma di calore, direttamente sul posto. Per quanto riguarda quindi l'energia elettrica, la possibilità di sfruttare questo aspetto permette di evitare le perdite di trasmissione e distribuzione che si verificano lungo gli elettrodotti, consentendo una riduzione di emissioni di gas effetto serra e di inquinanti e di consumi energetici legati a questo aspetto, ed influenzando positivamente sul prezzo dell'energia elettrica per quanto riguarda le penali dovute alle congestioni delle linee di trasmissione. Nell'ambito delle aree urbane invece il ST andando ad integrare localmente gli impianti alimentati da fonti fossili, permette di ridurre l'inquinamento direttamente nelle zone in cui tale aspetto negativo è particolarmente sentito.

L'altro aspetto da considerare per un'applicazione delle due tecnologie nel contesto urbano è quello legato, oltre che alle varie soluzioni tecniche esposte di seguito, a leggi e regolamenti vigenti in ambito edilizio. In particolare, esistono molte aree urbane protette da vincoli storico-paesaggistici dove l'applicazione del ST e FV non può essere prevista².

4.1 Solare Termico

4.1.1 Energia termica prodotta da fonte solare

L'applicazione dei sistemi solari termici è rivolta principalmente alla produzione di ACS ed è estesa, a seconda che le caratteristiche dell'edificio e dell'utenza lo consentano, anche all'integrazione degli impianti di riscaldamento alimentati da fonti fossili o rinnovabili, quali ad esempio i sistemi a biomasse. E' necessario in questi casi che l'utenza sia caratterizzata da un fabbisogno di energia termica costante nel corso dell'anno, in cui oltre alla richiesta per ACS e riscaldamento, durante il periodo estivo il surplus di energia

¹ ISTAT-“Edifici e abitazioni. Censimento 2001. Dati definitivi”, vedi in Appendice i valori ripresi dal documento

² Esistono realtà in cui comunque sono state fatte modifiche ai regolamenti edilizi permettendo quindi l'apertura a tali soluzioni.

prodotto possa essere adoperato ad esempio per riscaldare l'acqua di una piscina o per la climatizzazione degli ambienti¹.

I componenti fondamentali di un sistema ST sono il collettore solare, che converte l'energia solare in calore, e il serbatoio di accumulo, che permette di immagazzinare il calore rendendolo disponibile al momento in cui viene richiesto. I collettori possono essere di varie tipologie, ma quelli più presenti in commercio sono il collettore vetrato piano, non vetrato e sottovuoto. I primi sono caratterizzati da una piastra captante in rame dotata di uno strato selettivo che permette di trattenere e trasmettere la più alta quantità possibile di energia solare al fluido termovettore che scorre dentro la serpentina disposta sulla piastra stessa. Il fluido è composto da una soluzione di acqua e glicole, sostanza che permette di evitare il congelamento del fluido durante il periodo invernale² e quindi il relativo mal funzionamento dell'impianto. Altri componenti di questi pannelli sono la lastra di vetro, che svolge principalmente una funzione di protezione contro agenti esterni e il contenitore coibentato. Esistono altre tipologie di collettori tra cui i quelli non vetrati, destinati ad un uso esclusivamente estivo per via della mancanza di accorgimenti tecnici necessari per un uso continuativo, e i collettori sottovuoto. Questi, per le loro caratteristiche, permettono di ottenere risultati analoghi a quelli ottenuti con pannelli vetrati, ma con 1/3 in meno della superficie captante mantenendo un rendimento costante durante l'intero anno. Ciò è dovuto essenzialmente alla caratteristica sottovuoto che annulla i fenomeni di conduzione e di convezione il che permette di raggiungere valori di temperatura elevati anche durante il periodo invernale.

Il serbatoio di accumulo del calore è come detto un componente molto importante del sistema solare e varia la capacità a seconda del fabbisogno energetico dell'utenza e della funzione svolta dall'impianto (sola ACS o sistema comby).

Per quanto riguarda gli impianti, le configurazioni previste sono essenzialmente due, distinte in base al metodo con cui l'acqua viene movimentata nel circuito proveniente dai collettori³:

- sistemi a circolazione naturale: in cui la movimentazione dell'acqua avviene solo per mezzo della diversa densità dell'acqua stessa a temperature differenti e che necessita quindi che i sistemi di accumulo siano posizionati al di sopra dei collettori. Questi

¹ Quest'ultima applicazione è al momento ancora in fase poco più che sperimentale

² In base alla percentuale di glicole, varia la temperatura di congelamento del fluido.

³ Esiste inoltre una classificazione legata alla

impianti data la semplicità d'uso hanno dei costi limitati e sono indicati per le piccole utenze.

- sistemi a circolazione forzata: in cui la movimentazione dell'acqua si realizza per mezzo di una pompa¹. Questi sistemi sono adatti sia per piccole che per grandi applicazioni e prevedono una complessità impiantistica e un numero di componenti aggiuntivi che influiscono notevolmente nel prezzo.

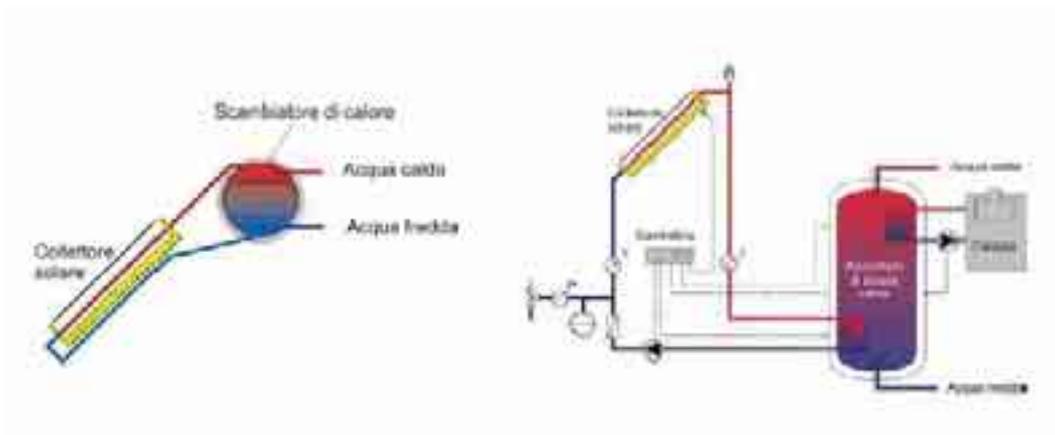


Figura 4-1 Impianti a circolazione naturale e a circolazione forzata

4.1.1.1 *Acqua calda sanitaria (ACS)*

Per il dimensionamento di un impianto di ACS il metodo adoperato è quello riportato di seguito².

¹ In realtà a seconda delle soluzioni impiantistiche adoperate il numero di pompe può essere anche 2 come ad esempio negli impianti a svuotamento.

²ISES Italia- "Impianti solari termici. Acqua calda con l'energia solare" pag. 84

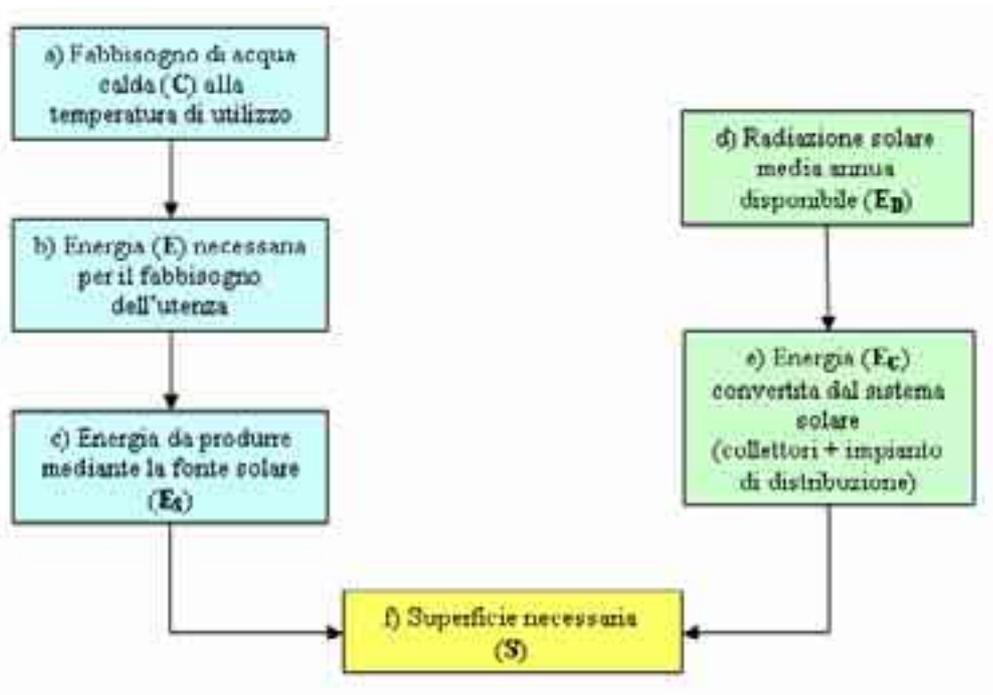


Tabella 4-1 Procedimento per il dimensionamento impianto ST

a) Il fabbisogno di ACS può essere determinato o attraverso un'analisi delle fatture dei distributori dell'energia elettrica e del gas, nel caso siano disponibili e nel caso che da esse si possa risalire alla nostra incognita, oppure mediante dati statistici di letteratura, eventualmente corretti in base alle abitudini dell'utenza.

Nel caso in esame, essendo un'analisi su basi statistiche, le considerazioni fatte si riferiranno a dati di letteratura, come la seguente tabella¹:

	Litri/giorno procapite	kcal/giorno procapite	MJ/giorno procapite	kWh/giorno procapite	NOTE Litri/giorno procapite
Abitazione	50	1650	6,9	1,92	-

Tabella 4-2 Ministero dell'Ambiente – Specifica Tecnica di Fornitura

Nota: La tabella sopra riportata oltre al fabbisogno di ACS di ogni utenza riporta anche la quantità di calore che è necessaria per produrlo. Tale valore si ricava dalla nota formula:

$$E = m \cdot c \cdot \Delta T, \quad [\text{kcal}]$$

dove:

- m , [kg]², indica la quantità di acqua calda richiesta e corrispondente al fabbisogno.

¹ Ministero dell'Ambiente – Specifica Tecnica di Fornitura, allegato A., 10-02-2003, pag. 3. Il dimensionamento è riferito ad una temperatura minima di 12 °C

² 1 litro di acqua coincide con 1 kg

- $c, \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$, rappresenta il calore specifico dell'acqua che convenzionalmente è preso pari a 1^1 .
- $\Delta T = T_U - T_I, [\text{K}]$, rappresenta la variazione di temperatura dell'acqua tra il valore di uscita (calda) e quello di ingresso (fredda).

I valori di T_U e T_I sono rispettivamente 45^2 e 12^3 gradi centigradi⁴. In genere (nei manuali) e anche nel presente documento T_I sarà preso pari a 10°C .

Negli appartamenti, data la presenza sempre più frequente⁵ di elettrodomestici che utilizzano acqua calda, come lavatrice e lavastoviglie⁶, è necessario incrementare il valore relativo alla voce "Abitazione" della quantità che viene appunto utilizzata da tali apparecchi.. Per tale scopo è ragionevole considerare un fabbisogno pari a $20 \div 30$ litri/giorno (per ogni lavaggio⁷).

Ad esempio una famiglia media costituita da tre persone che abita in una casa di superficie media pari circa a 100 m^2 necessita di una fabbisogno di acqua calda di circa:

3 persone (50 litri/persona/giorno)	$50 \cdot 3 = 150$ litri/giorno
2 elettrodomestici (20 litri/lavaggio/giorno)	$20 \cdot 2 = 40$ litri/giorno
Totale	190 litri/giorno

b) L'energia necessaria per riscaldare la massa di acqua appena determinata è:

$$E_{\text{ACS giorno}} = m \cdot c \cdot \Delta T = 190 \text{ kg} \cdot 1,0 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (45 - 10)^\circ\text{C} = \frac{6650 \text{ kcal}}{860 \text{ kcal/kWh}} = 7.73 \text{ kWh}$$

Quindi riferendosi ad un anno solare si ha che l'energia necessaria per la produzione di ACS è:

$$E_{\text{ACS anno}} = 7.73 \text{ kWh} \cdot 365 \text{ giorni} \cong 2822 \text{ kWh}$$

¹ In Appendice è riportato l'andamento del calore specifico dell'acqua allo stato di liquido saturo e alcune considerazioni sulla dipendenza con la temperatura.

² La legge 10/91 prevede che la temperatura dell' ACS sia di $48^\circ \pm 5^\circ\text{C}$. Il valore riportato nel presente documento è preso come riferimento in molti documenti del settore (R.Battisti, A.Corrado, A.Michelangeli- "Impianti solari termici. Acqua calda con l'energia solare"-2005. e Ambiente Italia -"Impianti solari Termici. Manuale per la progettazione e la costruzione"2003...

³ Questo valore rappresenta una media della temperatura dell'acqua fredda che si presenta durante l'anno.

⁴ I valori delle temperature sono espressi in gradi centigradi e non in Kelvin in quanto come è noto l'operazione di sottrazione tra due valori porta al medesimo risultato

⁵ Vedi Appendice nei dati sul settore residenziale.

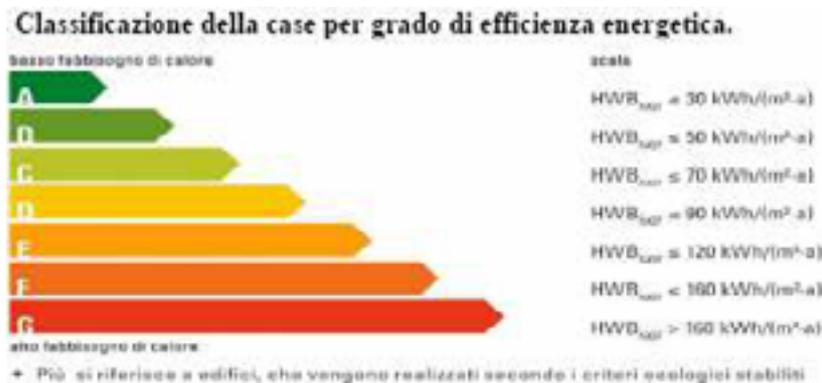
⁶ I valori della temperatura sono superiori quindi in questi casi sarà o lo stesso elettrodomestico a sopperire al ΔT di differenza attraverso la resistenza interna o mediante l'accensione del sistema tradizionale di riscaldamento (metodo più economico, come sarà successivamente evidenziato, ma poco utilizzato)

⁷ Ambiente Italia -"Impianti solari Termici. Manuale per la progettazione e la costruzione" 2003

4.1.1.2 Impianto combinato (ACS + riscaldamento)

E' opportuno considerare che un'analisi di questo genere, anche per un'utenza media, è effettivamente complessa in quanto il risultato può essere ancora meno attendibile di quella relativa alla sola ACS. Ciò è dovuto al fatto che un tale dimensionamento si basa oltre che sul fabbisogno dell'utenza (per ACS), anche sul fabbisogno energetico dell'abitazione (per il riscaldamento), il che dipende fortemente dalle componenti climatiche, a livello globale e locale, a cui un'abitazione è sottoposta. Prendendo spunto dai dati sugli usi finali dell'energia nel settore residenziale (produzione ACS uguale all'11% del fabbisogno energetico mentre al riscaldamento corrisponde il 68%), è possibile ottenere:

$$2822 : 11\% = E_{\text{Risc.anno}} : 68\% \Rightarrow E_{\text{Risc.anno}} = \frac{2822}{0.11} \cdot 0.68 = 17445 \text{ kWh}$$



Cioè circa 180 kWh/m²/anno e corrisponde ai dati riportati in letteratura¹ per consumi (160÷200 kWh/m²/anno) di abitazioni tipiche (cioè con materiali adoperati

Figura 4-2. Etichetta energetica degli edifici. Fonte Legambiente

quali muratura, calcestruzzo e altri).

Quindi il valore di energia consumata tra ACS e Riscaldamento è:

$$E_{\text{ACS+Risc, anno}} = 2822 + 17445 = 20267 \text{ kWh}$$

Nel caso di abitazioni con efficienza energetica superiore, i consumi sono molto minori rispetto a quanto determinato:

¹ Legambiente Italia – “Certificazione energetica degli Edifici”; EniaSpa- “Il mondo dell’energia”. Questo dato rappresenta anche il limite inferiore dell’etichetta energetica degli edifici (G indica infatti consumi > 160 kWh/m²/anno). Occorre sottolineare che comunque questo dato rappresenta una media dei valori.

Classe di consumo	Consumo Riscaldamento,[kWh]	
	m ²	Abitazione
A	30	3000
B	50	5000
C	70	7000
D	90	9000
E	120	12000

Tabella 4-3 Classi e consumi degli edifici. Fonte Legambiente

c) Occorre adesso stimare il fattore di copertura (F_C), cioè la percentuale di energia richiesta che deve essere soddisfatta su base annuale mediante l'impianto solare e che corrisponde quindi al risparmio energetico della fonte primaria di energia¹. Per quanto riguarda il valore da adottare per i sistemi combinati, occorre tenere presente quanto già detto sulle caratteristiche del carico. Quindi per evitare surplus di energia eccessivi nel periodo di minor utilizzo, con conseguenti sprechi energetici e rischi per la funzionalità dell'impianto, è necessario che per impianti fortemente "energivori" il valore preso sia contenuto. Nella scelta dei F_C influiscono più variabili², ma nella presente analisi si fa distinzione solo per la destinazione d'uso: ACS senza e con riscaldamento abbinato.

	F_C (ACS)	F_C (Combi)
Impianti con accumuli giornalieri	40÷80%	20÷60%

Tabella 4-4 Fattore di copertura(AmbienteItalia)

Dalla tabella può essere plausibile scegliere un F_C (ACS) = 65%, mentre F_C (Combi) = 20 %³, il che implica un'energia richiesta all'impianto solare (E_s) di:

¹ Non è logico a meno di casi eccezionali prevedere un F_C pari al 100% in quanto questo coefficiente rappresenta un compromesso (o meglio un'ottimizzazione) tra riduzione di utilizzo della fonte energetica tradizionale e convenienza economica. Infatti se d'inverno si può avere una copertura totale delle esigenze dell'utenza in estate si presenterà un eccesso che andrà disperso (a meno di un utilizzo in una piscina o nell'applicazione di sistemi di condizionamento) rendendo non conveniente l'intero investimento.

² quali: tipologia di utenza, combinazione di più applicazioni, dimensioni dell'impianto di riscaldamento e tipo di sistema irraggiante, presenza di ulteriori accorgimenti passivi

³ E' da notare come grandi impianti con accumuli stagionali possano fornire un F_C (Combi) compreso tra il 60÷80%, ma che questi tipi di impianti rappresentano per la loro complessità realizzativa un'eccezione.

$$E_s = E_k \cdot F_c, [\text{kWh/anno}]$$

dove: k (pedice): indica la tipologia di applicazione

Tipo di applicazione	E_s , [kWh/anno]
ACS	$2822 \cdot 0.65 \cong 1834$
ACS + Riscaldamento	$20267 \cdot 0.2 \cong 4053$

Tabella 4-5 Consumi evitati

Dai risultati ottenuti è possibile già da adesso trarre le prime conclusioni dal punto di vista ambientale. Calcolando la quantità di energia primaria risparmiata (m_i , con i che indica il tipo di fonte) per la presenza dell'impianto solare termico si ottiene quanto segue (considero solo le fonti maggiormente impiegate):

Fonte di energia		ACS		Combinato	
Energia Elettrica ¹		2264 kWh _e	5315 kWh	5019 kWh _e	11781 kWh
Fonti Fossili ²	Gas Naturale	250,0 m ³		552,5 m ³	
	GPL	93,7 m ³		207,1 m ³	
	Gasolio	228,5 litri		505,1 litri	

Tabella 4-6 Consumi evitati di energia

A ciò corrispondono le seguenti quantità di gas effetto serra e inquinanti³, per famiglia e persona, evitati (in un anno) a seconda dell'impiego di una sola delle seguenti fonti di energia:

¹ E' stato riportato sia il valore relativo alla conversione termica-elettrica del boiler e sistema di distribuzione (con rendimento pari al $95\% \cdot 85\% = 81\%$) e sia la quantità media di energia primaria necessaria per la produzione di energia elettrica nel parco delle centrali elettriche italiane, determinato secondo i dati riportati in Appendice

² I valori sono determinati mediante l'applicazione della seguente formula:

$$m_i = \frac{E_{S, ACS}}{\eta_{\text{impianto}} \cdot pci_i}, [\text{kWh/anno}]$$

η_{impianto} : indica il rendimento di conversione dell'impianto (valore tipico per una caldaia ad alta efficienza è 90%, mentre per il sistema di distribuzione considero 85%, quindi per l'intero impianto prendo un rendimento del 76.5%, come riportato ne "Appunti dalle lezioni di impianti termotecnica/tecnici" Prof. Onorio Saro. Oggigiorno sta prendendo piede la tecnologia delle caldaie a condensazione che hanno un rendimento riferito a pci del 106%);

pci_i : indica il potere calorifero inferiore della fonte primaria considerata, ricavato dalla circolare MICA del 2 Marzo 1992, n. 219/F

³ Vedi Appendice per dati su Fattori di Emissione (E.F); I valori riportati nella seguente tabella sono determinati moltiplicando E.F. per la quantità di energia impiegata. Per quanto riguarda l'emissioni dovute

ACS

Inquinante	CO ₂ [kg]		CO [g]		COVNM [g]		NO _x [g]		PM ₁₀ [g]		SO ₂ [g]	
	fam.	pers.	fam.	pers.	fam.	pers.	fam.	pers.	fam.	pers.	fam.	pers.
Fonte Energia												
Energia Elettrica	1122,0	374,0	274,8	91,6	40,0	13,3	1015,2	338,4	55,4	18,5	1569,4	523,1
Gas Naturale	478,6	159,5	215,8	71,9	43,2	14,4	431,5	143,8	2,2	0,7	0,5	0,2
GPL	538,5	179,5	86,3	28,8	17,3	5,8	431,5	143,8	17,3	5,8	0,0	0,0
Gasolio	632,4	210,8	172,6	57,5	25,9	8,6	431,5	143,8	1,1	0,4	811,3	270,4

Tabella 4-7 Emissioni di gas serra e inquinanti evitate(produzione ACS)

ACS + Riscaldamento

Inquinante	CO ₂ [kg]		CO [g]		COVNM [g]		NO _x [g]		PM ₁₀ [g]		SO ₂ [g]	
	fam.	pers.	fam.	pers.	fam.	pers.	fam.	pers.	fam.	pers.	fam.	pers.
Fonte Energia												
Energia Elettrica	2479,5	826,5	607,3	202,4	88,3	29,4	2243,6	747,9	122,5	40,8	3468,3	1156,1
Gas Naturale	1057,8	352,6	476,8	158,9	95,4	31,8	953,6	317,9	4,9	1,6	1,1	0,4
GPL	1190,0	396,7	190,7	63,6	38,1	12,7	953,6	317,9	38,1	12,7	0,0	0,0
Gasolio	1397,6	465,9	381,5	127,2	57,2	19,1	953,6	317,9	2,5	0,8	1792,9	597,6

Tabella 4-8 Emissioni di gas serra e inquinanti evitate(Comby)

Ipotizzando di poter applicare una soluzione di questo genere all'intero settore residenziale¹, si avrebbe un risparmio di fonti di energia e di emissioni di inquinanti pari a:

alla produzione di energia elettrica il dato riportato è un valore medio relativo all'intero parco di centrali, comprese quelle alimentate da fonti rinnovabili (dati riferiti al 2003). Tenendo presente le sole centrali termoelettriche si ha che la CO₂ prodotta per la produzione di un kWh sale a 614 g.

¹ Questa rappresenta un'ipotesi irrealizzabile, ma permette di dare un'idea sulla potenzialità della tecnologia ST. Per fare ciò considero la riduzione di fonti di energia e di inquinanti in base alla quantità consumata, riportata nel "Rapporto Energia e Ambiente 2005" dell' ENEA.

ACS

Fonte Energia	Consumi attuali		Consumi evitati		Emissioni evitate [T]					
	ktep	%	ktep	kWh	CO ₂	CO	COVNM	NO _x	PM ₁₀	SO ₂
Energia Elettrica	907	30,7	589,6	6,86 E+09	3,39 E+06	8,30 E+02	1,21 E+02	3,06 E+03	1,67 E+02	4,74 E+03
Gas Naturale	1690	57,3	1098,5	1,28 E+10	2,55 E+06	1,15 E+03	2,30 E+02	2,30 E+03	1,17 E+01	2,65 E+00
GPL	114	3,9	74,1	8,62 E+08	1,94 E+05	3,10 E+01	6,20 E+00	1,55 E+02	6,20 E+00	0,00 E+00
Gasolio	239	8,1	155,4	1,81 E+09	4,77 E+05	1,30 E+02	1,95 E+01	3,25 E+02	8,40 E-01	6,11 E+02
Totale	2950	100	1917,5	2,23 E+10	6,79 E+06	2,14 E+03	3,76 E+02	5,84 E+03	1,86 E+02	5,35 E+03

Tabella 4-9 Emissioni di gas serra e inquinanti evitate intero settore residenziale (produzione ACS)

ACS + Riscaldamento

Fonte Energia	Consumi Riscaldamento		Consumi Totali		Consumi evitati (20%)		Emissioni evitate [T]					
	Ktep	%	Ktep	%	Ktep	KWh	CO ₂	CO	COVNM	NO _x	PM ₁₀	SO ₂
Energia Elettrica	162	0,90	1069	5,1	610,0	7,09 E+09	3,50 E+06	8,58 E+02	1,25 E+02	3,17 E+03	1,73 E+02	4,90 E+03
Gas Naturale	13708	76,4	15398	73,7	2825,7	3,29 E+10	6,56 E+06	2,96 E+03	5,92 E+02	5,92 E+03	3,02 E+01	6,82 E+00
GPL	1026	5,72	1140	5,5	203,4	2,37 E+09	5,31 E+05	8,51 E+01	1,70 E+01	4,26 E+02	1,70 E+01	0,00 E+00
Gasolio	3040	16,9	3279	15,7	538,4	6,26 E+09	1,65 E+06	4,51 E+02	6,76 E+01	1,13 E+03	2,91 E+00	2,12 E+03
Totale	17936	100	20886	100	4177,4	4,86 E+10	1,22 E+07	4,35 E+03	8,01 E+02	1,06 E+04	2,23 E+02	7,03 E+03

Tabella 4-10 Emissioni di gas serra e inquinanti evitate intero settore residenziale (Comby)

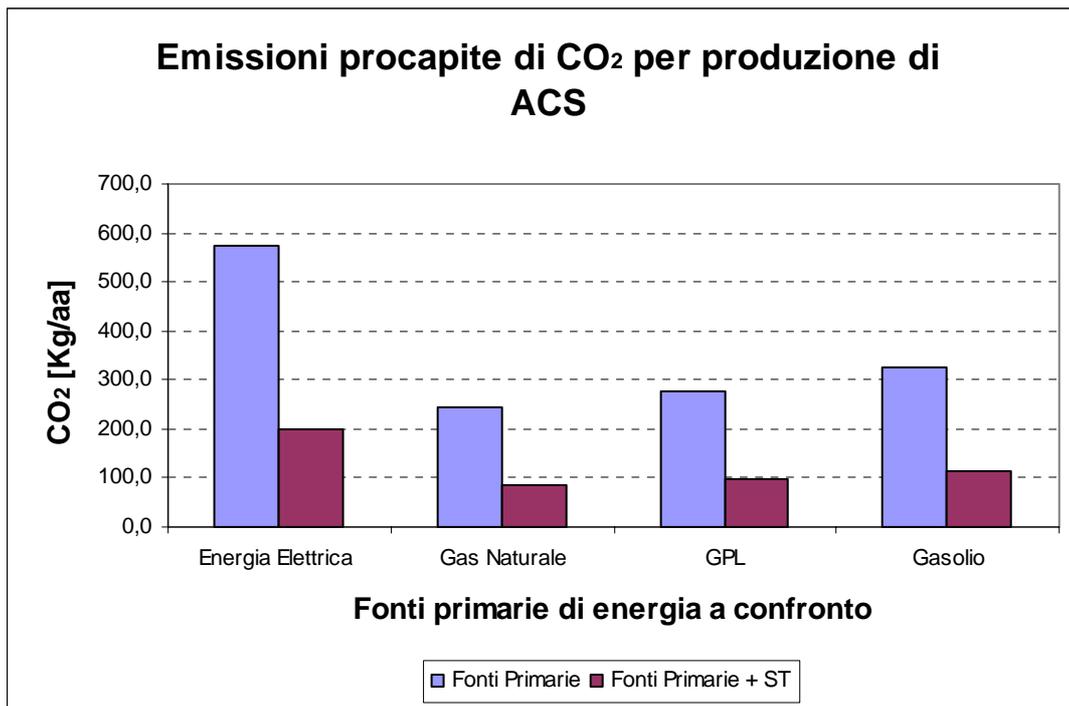


Figura 4-2 *Confronto emissioni (ACS)*

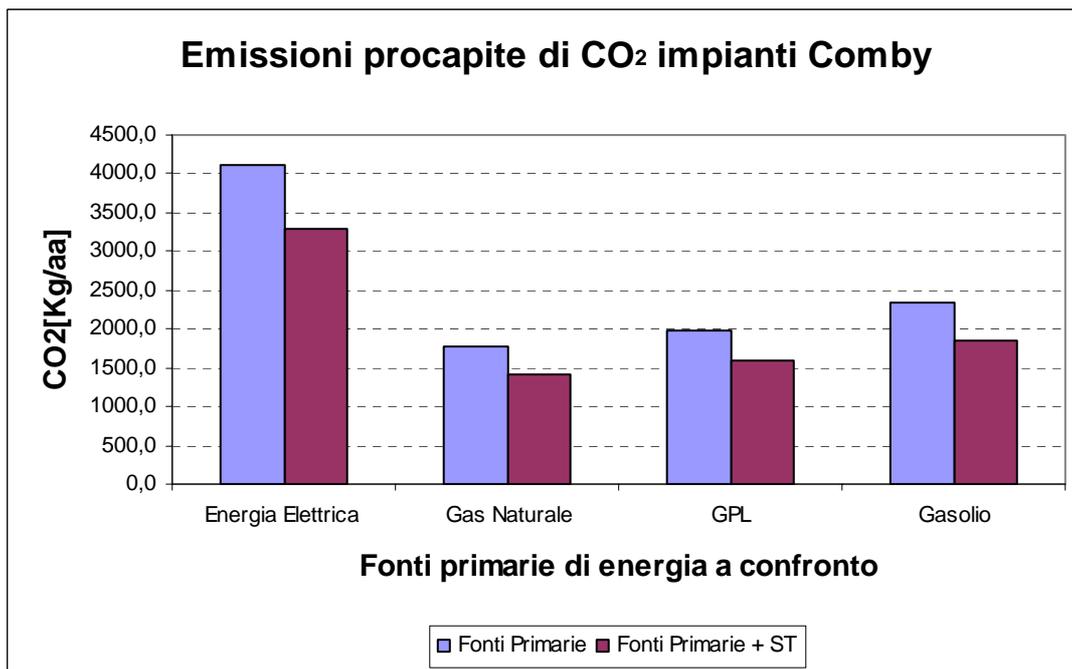


Figura 4-3 *Confronto emissioni (Comby)*

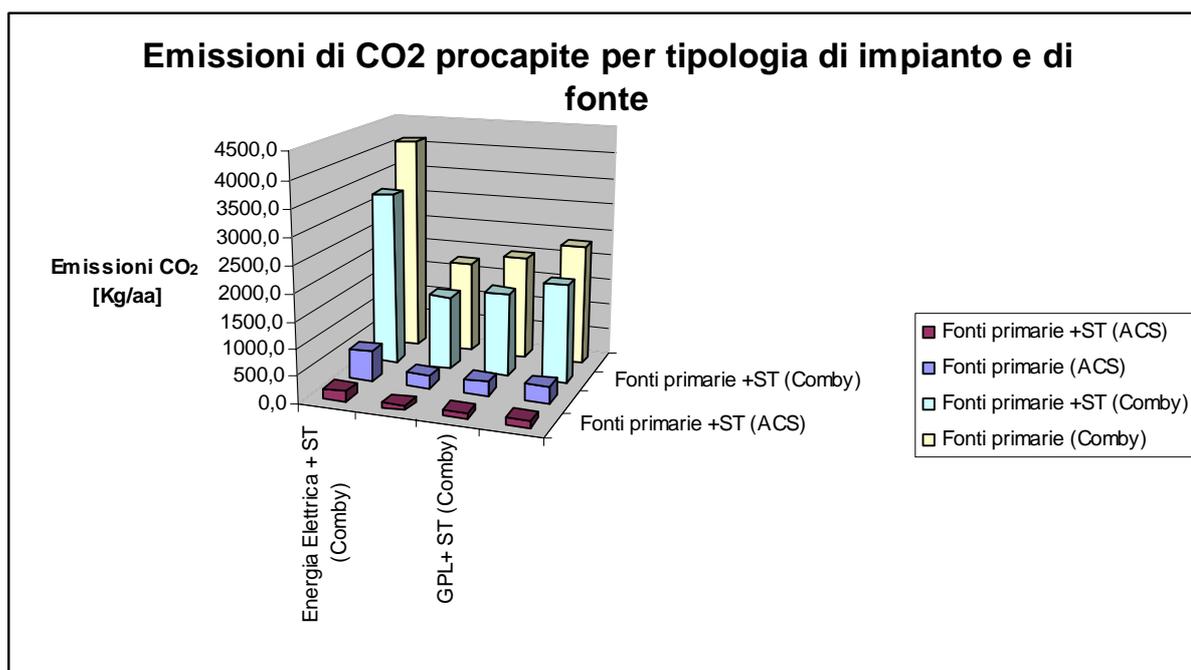


Figura 4-4 Confronto emissioni(ACS)

E in quest'ultimo caso la riduzione di emissioni di CO₂ potrebbe rappresentare:

Emissioni CO ₂	Sistema Energetico	Settore Civile	Comune di Roma	Protocollo di Kyoto	
				Sist. Energ.	Settore Civile
ACS	1,4 %	9 %	43 %	8,6 %	39,4 %
Comby	2,6 %	16 %	78 %	15,4 %	70,6 %

Tabella 4-11 Emissioni evitate di CO₂

4.1.2 Superficie di collettori necessaria

Per determinare la superficie di collettori necessaria al caso in esame, è possibile procedere attraverso diversi sistemi di dimensionamento. Esistono metodi grafici e analitici che hanno un diverso grado di precisione.

4.1.2.1 ACS

Un primo dimensionamento di massima può essere ottenuto però anche attraverso la seguente tabella¹:

¹ Ambiente Italia - "Impianti solari Termici. Manuale per la progettazione e la costruzione" 2003: come riporta lo stesso documento, questi sono valori indicativi

zone in Italia	valori di riferimento per il dimensionamento
Nord	1,2 m ² /(50 litri/giorno)
Centro	1,0 m ² /(50 litri/giorno)
Sud	0,8 m ² /(50 litri/giorno)

Tabella 4-12 Dimensionamento superficie collettore

dalla quale si ottiene un valore di circa 4 m².

Altri metodi più attendibili di questo sono quelli che si basano su grafici che tengono conto del fattore di copertura, del fabbisogno in litri e in MWh/anno e della latitudine in cui deve essere installato, come nell' esempio seguente¹:

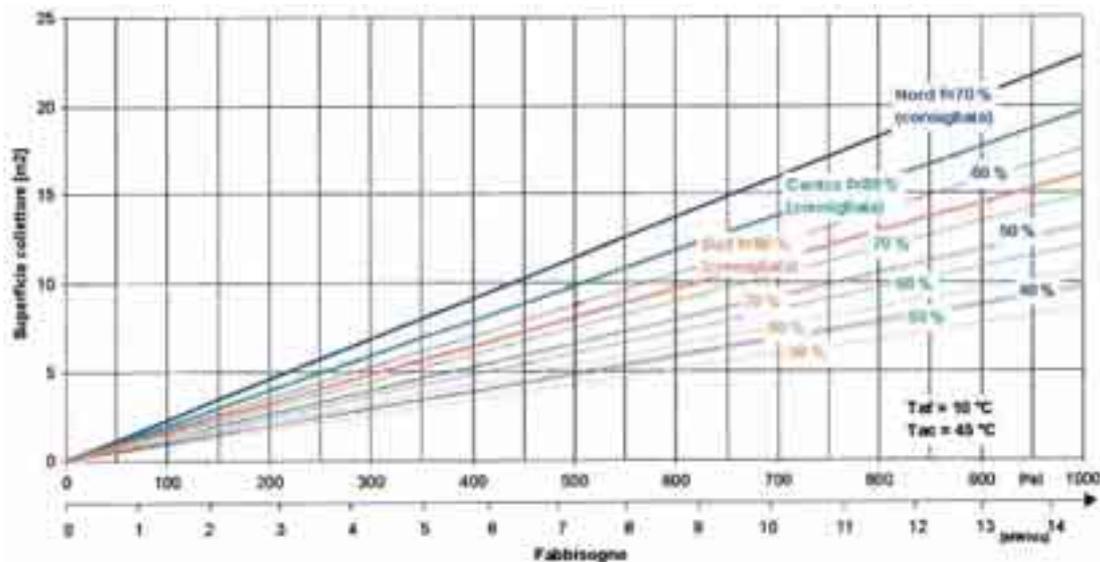


Tabella 4-13 Dimensionamento superficie collettore

Dato il fabbisogno di una famiglia media, si ottiene che il valore della superficie del collettore si riduce a circa 2.5 m². Un metodo sufficientemente preciso deve tenere conto però della radiazione solare² che interessa la zona in cui andare ad installare l'impianto e valuti secondo i criteri riportati nella normativa e nella letteratura specifica³.

Dai dati a disposizione si ha che l'energia radiante al suolo, disponibile sul territorio nazionale, varia da Nord a Sud tra 1200 ÷ 1750 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$ ⁴ (a seconda della latitudine e delle

¹ Diapositiva materiale Ambiente Italia (corso su "Impianti solari termici: dalla progettazione alla realizzazione", Roma 11÷14 Luglio 2006)

² In Appendice è riportata una breve trattazione dell'argomento

³ Norma UNI 8477 per ciò che riguarda la metodologia di misurazione; la norma UNI 10349 riporta invece i valori di radiazione globale al suolo. Questi valori sono riportati anche ne "Atlante Europeo della Radiazione Solare" e ne "La Radiazione Solare globale al suolo in Italia".

⁴ Occorre considerare che il valore di energia dipende da tre fattori:

- Latitudine (più il sito di installazione è vicino all'equatore maggiore l'entità di energia captata; in Italia ciò porta ad una differenza tra Nord e Sud di circa il 40%)

caratteristiche climatiche locali)¹. Le condizioni ottimali si ottengono, in genere, per inclinazione della superficie captante di 30° e un azimut di 0°. Ciò risulta evidente anche dalla seguente tabella²:

Radiazione giornaliera, media mensile, incidente su superfici variamente inclinate, kWh/m² giorno (sito di installazione: Roma)

	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	annuale
orizzontale	1,69	2,54	3,78	4,89	6,02	6,58	6,86	6,16	4,69	3,29	2,02	1,51	4,19
10° sud	2,05	2,9	4,13	5,24	6,15	6,64	6,99	6,44	5,11	3,76	2,43	1,87	4,48
30° sud	2,69	3,42	4,52	5,37	6	6,31	6,77	6,55	5,55	4,43	3,05	2,42	4,76
latitudine sud	2,8	3,57	4,56	5,22	5,66	5,87	6,36	6,33	5,56	4,62	3,28	2,66	4,71
60° sud	2,83	3,58	4,33	4,67	4,82	4,86	5,35	5,58	5,22	4,61	3,42	2,83	4,35
verticale sud	2,65	3,02	3,31	3,25	2,92	2,77	3,1	3,56	3,82	3,8	3,05	2,61	3,15
verticale SO/SE	2,12	2,52	3,05	3,28	3,35	3,38	3,65	3,85	3,64	3,19	2,45	2,06	3,05
verticale E/O	1,23	1,67	2,4	2,99	3,42	3,65	3,77	3,61	2,92	2,12	1,46	1,15	2,54

Tabella 4-14 *Radiazione solare su Roma*

Da questi valori si desume come circa 3/4 dell'energia radiante annua sia disponibile tra i mesi di Aprile e Settembre con inclinazione ottimale, mentre per poter avere un contributo rilevante durante il periodo invernale occorre un'angolazione superiore, compresa tra i 45° e 60°³. Inoltre nel caso di azimut diversi da 0° si rilevano valori comunque inferiori al caso ideale.

Per dimensionare l'impianto per la produzione di ACS situato ad esempio a Roma è possibile procedere come riportato nei punti d), e) e f) del ramo destro del diagramma di flusso suddetto:

d) dalla tabella precedente ricavo il valore dell'energia media annua incidente nel caso di posizionamento ideale delle superfici captanti (inclinazione = 30°; azimut = 0°):

$$E_{D, \text{anno}} = E_{D, \text{giorno}} \cdot 365 = 4.76 \cdot 365 \cong 1700 \text{ kWh/m}^2$$

- Orientamento (o Azimut) , verso Sud (orientamenti differenti coincidono con una quantità di energia ricevuta inferiore)
- Inclinazione (o Tilt) dei collettori rispetto al suolo.
- Presenza di eventuali ostacoli che creano ombreggiamento.

¹ E' necessario tenere presente come già ad una breve distanza, anche poche centinaia di metri, le condizioni microclimatiche possono variare notevolmente

² ISES Italia - "Solare Termico. Guida per progettisti e installatori". Tabella ripresa dall'Atlante Europeo della radiazione solare.

³ Questo aspetto risulta essere fondamentale per una comprensione dei dati tecnici e di conseguenza economici che seguiranno

e) E' possibile quindi determinare l'energia effettivamente convertita dai pannelli¹ inserendo il valore di efficienza del sistema solare ($\eta_{\text{impianto}} = \eta_{\text{pannello}} \cdot \eta_{\text{distribuzione}}$)²:

$$\left. \begin{array}{l} \eta_{\text{distribuzione}} = 0.85 \\ \eta_{\text{pannello}} = 0.60 \end{array} \right\} \Rightarrow E_C = E_D \cdot \eta_{\text{impianto}} = 1700 \cdot 0.50 = 850 \text{ kWh / m}^2$$

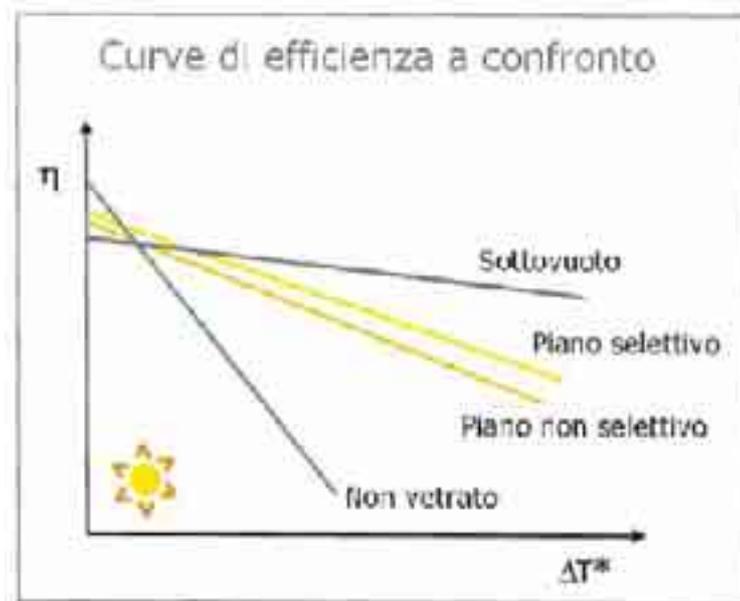


Figura 4-5 Andamento dell'efficienza dei vari tipi di collettori

- Il valore η_{pannello} dipende dal tipo di pannello e dalle soluzioni tecnologiche adoperate; nella presente analisi faccio riferimento a collettori piani vetrati con strato selettivo³, dato che rappresentano la tipologia maggiormente adoperata.

f) A questo punto è possibile risalire al valore della superficie captante necessaria al soddisfacimento del fabbisogno dell'utenza:

$$S = \frac{E_s}{E_{C-i}} = \frac{1834}{850} \cong 2.16 \text{ m}^2$$

Questo valore appena determinato è molto simile a quello ottenuto prima dal metodo grafico.

¹ Considerando il caso di nessuna presenza di ostacoli verso la superficie captante del pannello.

² Valori dei rendimenti sono stati ripresi da: ISES Italia- "Impianti solari termici. Acqua calda con l'energia solare"-2005 ; pag. 73. Il rendimento del sistema è da considerarsi come media tra il periodo estivo (60%) e il periodo invernale (40%)

³ Questi rappresentano la tipologia più diffusa. Il collettore piano è essenzialmente un parallelepipedo con una lastra captante, sulla quale è disposta una serpentina, in genere di rame, dove al suo interno scorre il fluido termovettore. L'involucro è coibentato sul fondo e sui lati mentre la superficie esposta al sole è dotata di una copertura trasparente. Lo strato selettivo è un trattamento al quale viene sottoposta la superficie captante che permette di limitare l'emissività della piastra con un aumento sensibile del rendimento.

Come già accennato in precedenza occorre tenere conto delle misure standard con cui i collettori vengono commercializzati. Normalmente infatti queste misure sono di 1 o 2.5 m², anche se alcune aziende permettono di avere misure “su misura” che però implicano costi superiori notevoli.

4.1.2.2 Sistema Comby

Anche in questo caso il dimensionamento di un impianto dipende da molteplici variabili (fattore di copertura, carico termico, zona climatica, inclinazione del tetto e disposizione dei collettori, ecc...). Una prima stima può essere quella riportata di seguito in cui però è necessario conoscere il carico termico dell’abitazione o almeno l’inclinazione di installazione dei collettori.

Impianto ACS:	0,8 – 1,2 m ² /persona
Impianto combinato:	
inclinazione collettore (< 40°):	superficie _{ACS} x 2
inclinazione collettore (> 40° < 70°):	superficie _{ACS} x 3
inclinazione collettore (> 70° < 90°) o con integrazione piscina:	1,5 – 3 m ² /kW
capacità serbatoio	70 l/m ² collettore

Tabella 4-15 Dimensionamento impianti Comby

Quindi nell’esempio trattato, considerando il fatto che in Italia la stragrande maggioranza delle abitazioni hanno tetti piani (orizzontali) o tetti a falda con inclinazione di circa 30° la superficie che dovrebbe essere installata per il sistema combinato è 7,5 m².

Volendo ottenere il risparmio energetico da fonte tradizionale determinato precedentemente (=4053 kWh) per l’intero sistema solare, la quota da attribuire al solo riscaldamento annuo è:

$$E_{S \text{ Risc.}} = E_{S \text{ combi}} - E_{S \text{ ACS}} = 4053 - 1834 = 2219 \text{ kWh}$$

Da ciò, considerando per esempio i valori relativi alla radiazione solare su Roma per il periodo¹ di utilizzazione dell’impianto di riscaldamento (da metà ottobre a metà aprile), con particolare influenza durante i mesi di mezza stagione, si ha che l’energia radiante a disposizione è circa 650 kWh/m².

¹ E’ da notare il fatto che l’impianto di riscaldamento solare non è sottoposto a vincoli normativi sulla data di accensione come invece lo è l’impianto da fonti tradizionali, come esplicitato nel DPR 412/93 e quindi in questo caso non è necessario considerare i giorni di accensione dell’impianto come riportato nel decreto ma solo il lasso di tempo in cui se ne potrebbe fare uso (Roma ricade nella zona climatica a cui corrispondono giorni di accensione dell’impianto di riscaldamento contro i 180 considerati).

La superficie necessaria per coprire l'intera quota con il solare termico dovrebbe essere, tenuto conto di un rendimento del sistema $\eta_{\text{impianto}} = 30\%$, di circa:

$$S = \frac{E_s}{E_{C-i}} = \frac{2219}{650 \cdot 0.3} \cong 11,5 \text{ m}^2 \Rightarrow 12,5 \text{ m}^2$$

Il che aggiunto ai $2,5 \text{ m}^2$ di superficie di collettori per l'ACS implicherebbe l'installazione di un impianto ST di 15 m^2 (tenuto conto delle misure standard con cui i collettori vengono installati). Risulta quindi evidente, e sarà chiarito nel paragrafo successivo, che tra le problematiche per l'applicazione delle tecnologie solari in ambito edilizio rilevante importanza ricopre la disponibilità dello spazio per l'installazione dei pannelli.

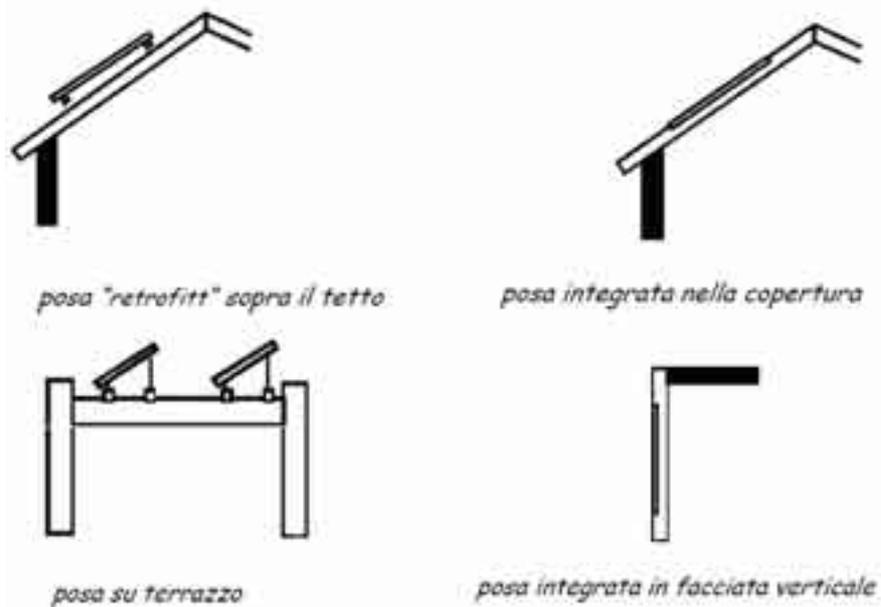


Figura 4-6 Soluzioni tecniche e architettoniche per l'installazione.

Nella presente relazione il caso preso in esame si riferisce ad una condizione di esposizione all'irraggiamento solare ottima, nonché riferita ad una singola abitazione¹, che non tiene quindi conto della necessità di sovradimensionare la superficie per via di un'esposizione alla radiazione solare penalizzata ad esempio dall'angolo di azimut.

Nel caso di abitazioni ad efficienza energetica superiore a quella in esame, in base allo stesso valore di consumo evitato il fattore di copertura risulta molto superiore come è evidenziato nella seguente tabella:

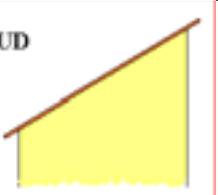
¹ Nei centri abitati con elevata densità di popolazione come ad esempio Roma gli edifici presenti sono in genere strutture di tipo condominiale, che implicherebbe quindi superfici ben più notevoli. Di seguito è riportata l'analisi sulla disponibilità di spazio su edifici caratterizzato da un numero medio di unità abitative, quindi

Classe di Consumo	Consumo Riscaldamento,[kWh]		Riscaldamento [kWh]	F _C , solo riscaldamento	E _{ACS+ Risc.} [kWh]	F _C , comby
	m ²	Abitazione				
A	30	3000	2219	75%	5282	80%
B	50	5000	2219	45%	7282	56%
C	70	7000	2219	32%	9282	45%

Tabella 4-16 Fattore di copertura per abitazioni ad elevata efficienza energetica

4.1.3 Realizzazione Pratica

Una fase che ricopre notevole importanza ai fini della realizzabilità impiantistica dei sistemi ST che FV è quella del sopralluogo. E' necessario cioè che l'immobile soddisfi ad alcuni requisiti, quali una disponibilità di superficie necessaria all'installazione dei pannelli e l'assenza di ostacoli che creano ombreggiamenti. Da dati ISTAT, la media degli edifici in Italia è costituito da 2 a 3 abitazioni corrispondenti ad analoghi piani. Quindi, per il caso preso in esame nel corso del testo si ottengono i seguenti risultati¹, tenuto conto dell'assenza di ombreggiamento.

Tipo di tetto	Abitazioni	Superficie disponibile ² $S = \frac{L^2}{\cos(30^\circ)}, [m^2]$	Superficie Necessaria, [m ²]	Realizzabilità
	2	115	30	SI'
	3		45	SI'
	2	115	≈ 35	SI'
	3		≈ 52	SI'

¹ L'analisi non tiene conto di eventuali soluzioni che possano accomunare impianti appartenenti agli stessi edifici.

² Nella presente analisi l'edificio è considerato di pianta quadrata e tenendo presente che è necessario evitare di porre più di 4 collettori su di uno stesso ramo per evitare perdite nel rendimento dei pannelli, la disposizione ritenuta più adatta è quella che vede la presenza di 2 file, ognuna di lunghezza 7,5 m (i moduli scelti di 2,5 m² con lati di 2,5 e 1 m).

³ Questo caso coincide anche con quello a singola falda con orientamento a OVEST o a EST.

	2	$\frac{115}{2} = 57.5^1$	30	SI'
	3		45	SI'

Tabella 4-17 Tipologia di edifici, tetti e realizzabilità dell'impianti

Con la tabella² seguente è possibile determinare il valore della superficie da installare effettivamente nel caso in cui inclinazione e azimuth non coincidano con la situazione ideale presa in considerazione, dividendo il valore della superficie trovato per uno dei coefficienti riportati:

orientamento Sud: 0° Est/Ovest: 90°	angolo di inclinazione						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0	0,89	0,97	1	0,99	0,93	0,83	0,69
15	0,89	0,96	1	0,98	0,93	0,83	0,69
30	0,89	0,96	0,99	0,97	0,92	0,82	0,70
45	0,89	0,94	0,97	0,95	0,9	0,81	0,70
60	0,89	0,93	0,94	0,92	0,87	0,79	0,69
75	0,89	0,91	0,91	0,88	0,83	0,76	0,66
90	0,89	0,88	0,87	0,83	0,78	0,71	0,62

Tabella 4-18 Coefficienti di correzione della superficie di collettori

Per quanto riguarda il caso di un tetto piano è necessario installare i collettori su opportune strutture di supporto, caratterizzate da un'inclinazione impostata durante il dimensionamento³. E' importante, al fine di non avere una perdita di energia sfruttabile e malfunzionamenti dell'impianto, evitare ombreggiamenti tra le file dei collettori stessi in nessuno periodo dell'anno.

Quindi riferendomi all'immagine riportata di seguito⁴, la distanza L tra le schiere di collettori si ottiene attraverso la seguente formula:

$$L = \max \left\{ \frac{l \sin(\xi + \alpha)}{\sin \alpha}; \frac{d}{2 \tan \gamma} + l \cos \xi \right\}$$

¹ La superficie è la metà in quanto la parte di falda rivolta a NORD non è presa in considerazione per il fatto che andrebbe contro al criterio di utilizzazione del solare termico nonché il fatto che sarebbe totalmente esclusa dalla radiazione diretta del sole.

² Ambiente Italia - "Impianti solari Termici. Manuale per la progettazione e la costruzione" 2003.

³ Nel caso considerato l'angolo è di 30°.

⁴ Ripresa dal sito internet della Facoltà di Ingegneria di Reggio Calabria

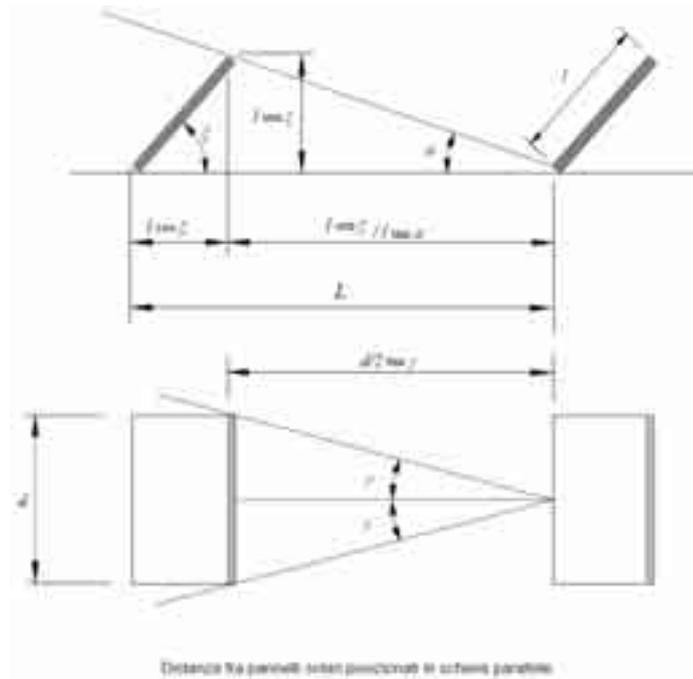


Figura 4-7 Distanza tra le schiere di collettori

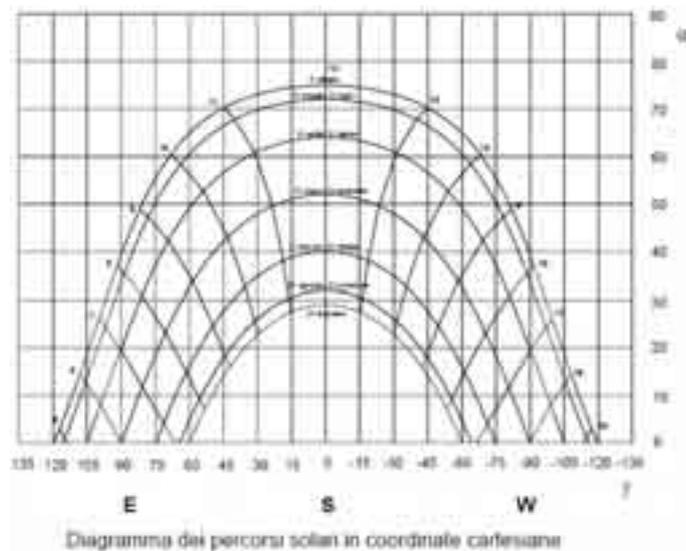


Figura 4-8 Carta solare in coordinate cartesiane

Per evitare in qualsiasi periodo dell'anno che una schiera di collettori faccia da ostacolo alla radiazione solare per quella retrostante, occorre che la sagoma della fila davanti rimanga compresa sotto la curva, riferita alla fila successiva, che indica il percorso solare durante il solstizio di inverno (21 Dicembre) alla latitudine considerata (tale percorso coincide con la curva più bassa nel diagramma in coordinate cartesiane).

All'atto pratico la distanza può essere stimata anche attraverso grafici in cui è riportato il rapporto tra la lunghezza della parte inclinata del collettore e la distanza tra le schiere in

funzione dell'inclinazione dei collettori e della latitudine¹. In questo caso la distanza tra le due schiere dovrà essere a 40° di latitudine Nord di 1,8 ÷ 2 volte la lunghezza inclinata del collettore.

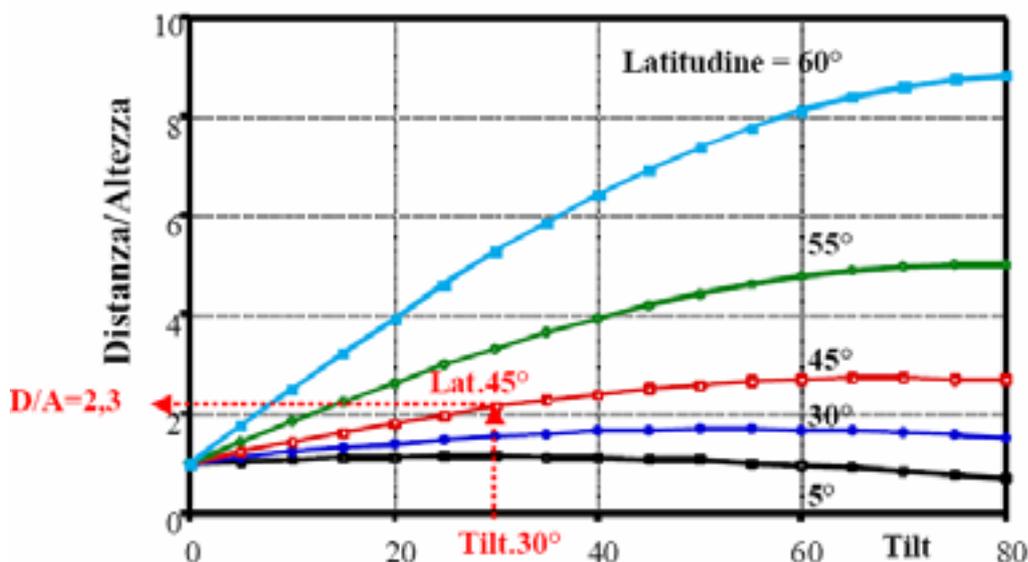


Figura 4-9 Distanza tra le file di collettori

Ciò permette di concludere che la superficie necessaria sarebbe superiore, nel caso di edifici a 3 piani, a quella a disposizione, mentre andrebbe bene per gli edifici a 2 piani. E' da osservare come anche le facciate rappresentino superfici utili per l'installazione anche se è necessario aumentare il valore della superficie con i coefficienti già precedentemente introdotti.

Considerando ad esempio un impianto con un fattore di copertura maggiore, la superficie di collettori necessaria è ben superiore al valore determinato (es: $F_{c,Comby} = 35\%$ richiede una superficie per ogni abitazione di 30 m^2 . In questo caso la superficie a disposizione per un intero edificio non sarebbe mai sufficiente rendendo il progetto irrealizzabile). Inoltre tenendo conto di eventuali ombreggiamenti, anche situazioni che in precedenza risultavano favorevoli possono diventare di difficile realizzazione.

Nella realtà il parco edilizio relativo alle aree urbane è caratterizzato da edifici aventi 6-8 piani, di età superiore ai 50 anni², e quindi anche l'applicazione di soluzioni tecniche estese all'intero edificio, con possibile aumento delle performance dell'impianto ST, potrebbe richiedere un valore di superficie comunque superiore a quello disponibile.

¹ Da "Impianti solari fotovoltaici a norme CEI" F. Groppi e C. Zuccaro.

² Da "Edifici e abitazioni. Censimento 2001. Dati definitivi"-ISTAT

4.1.4 Valutazione Economica

Sulla base dei valori ottenuti vado a determinare il tempo di ritorno dell'investimento, mediante l'applicazione del metodo di calcolo del valore attualizzato netto (VAN), a seconda che consideri sistemi a circolazione forzata o naturale¹ e il tipo di fonte primaria di energia adoperata.

Per eseguire l'analisi ho fatto le seguenti considerazioni:

- Tasso generale di inflazione² (g) del 2.4%
- Tasso di inflazione dell'energia³ (e) del 4.0%
- Tasso di sconto⁴ (d) del 3.5%
- Non ho preso a riferimento gli incentivi in quanto diversi da regione a regione
- Tempo di vita di 20 anni
- Costo di manutenzione del 2% del costo dell'impianto per ACS e del 1% per il Combi.
- Costo dell'impianto di 800 euro/m² per sistemi a circolazione forzata e 500 euro/m² per quelli a circolazione naturale (chiavi in mano).
- I prezzi delle fonti di energia⁵ sono di:

Energia Elettrica ⁶ [c€/kWh]	Gas Naturale [c€/kWh]	Gpl [c€/kWh]	Gasolio [c€/kWh]
18,5	4,75	12,18	9,49

Tabella 4-19 Costi medi delle varie fonti di energia

- La presenza di un eventuale finanziamento¹ erogato dalle amministrazioni pubbliche (a livello nazionale o di comunità locale) pari al 25% del costo di investimento.

¹ Per l'impianto Combi la sola soluzione praticabile è quella a circolazione forzata in quanto la superficie di pannelli è molto elevata e necessita sia di un grande accumulo che probabilmente non può essere posizionato nei pressi del tetto e di lungo tratto tubero che implica grandi perdite di carico.

² Banca d'Italia –“Indagine Sole 24 ore-Banca d'Italia sulle aspettative di inflazione e crescita”- Marzo 2006

³ Sito web Banca d'Italia (www.bancaditalia.it-andamenti_02_06.pdf)

⁴ Sito web Banca d'Italia (www.bancaditalia.it-anni 2004-2007), tendenza ultimi mesi a lordo delle imposte.

⁵ http://www.adiconsum.it/sala%20stampa/documenti/gas_rapporto%20finale%20gen06.pdf. I prezzi dell'energia elettrica e del gas naturale sono stati decurtati della componente fissa

⁶ Il valore riportato per l'energia elettrica rappresenta una media. In realtà il costo complessivo è dato dalla somma dei prodotti dei costi in funzione delle fasce di consumo mensili. Quindi la riduzione del consumo di energia per mezzo di un impianto ST, o anche ad esempio FV, consente di risparmiare l'energia elettrica a partire dal costo di fascia più alta (relativa ai consumi e non alla tariffa) pagata dall'utente sulla base dei propri consumi.

Da ciò, applicando la formula:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n R_t \cdot \left(\frac{1+e}{1+d}\right)^t - \sum_{t=1}^n C_t \left(\frac{1+g}{1+d}\right)^t$$

è emerso quanto segue:

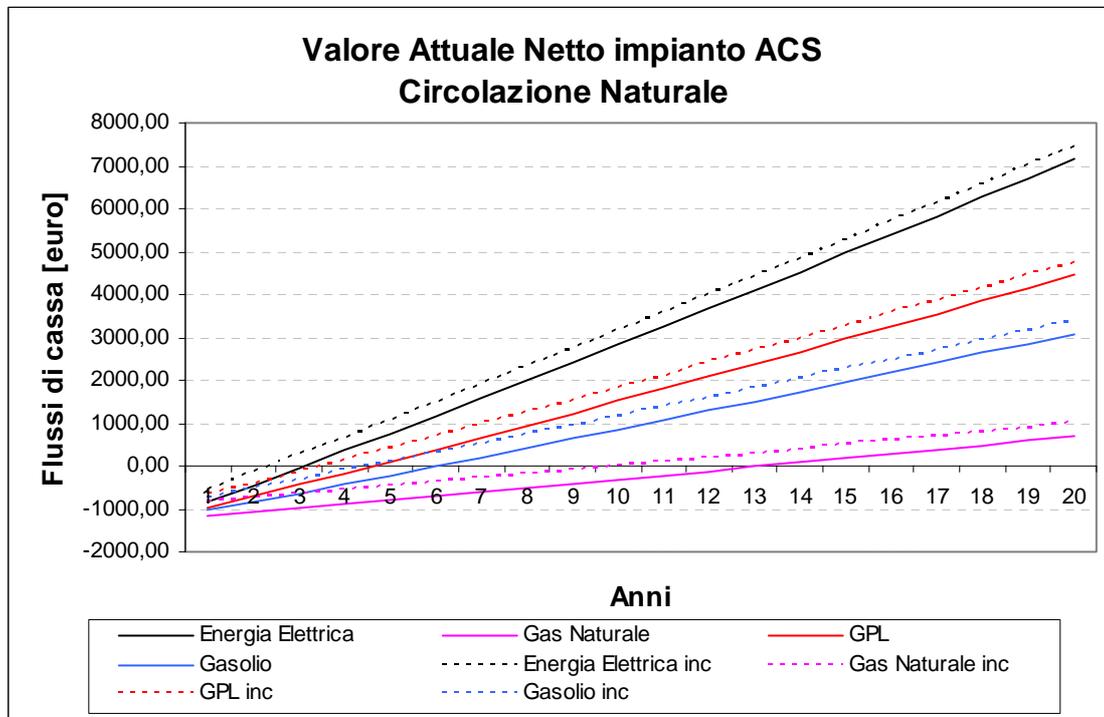


Figura 4-10 Flussi di cassa relativi ad un impianto ACS a circolazione naturale

¹ Per i finanziamenti a cui poter accedere vedere la pagina web di Legambiente <http://www.fonti-rinnovabili.it/index.php?c=incmap>

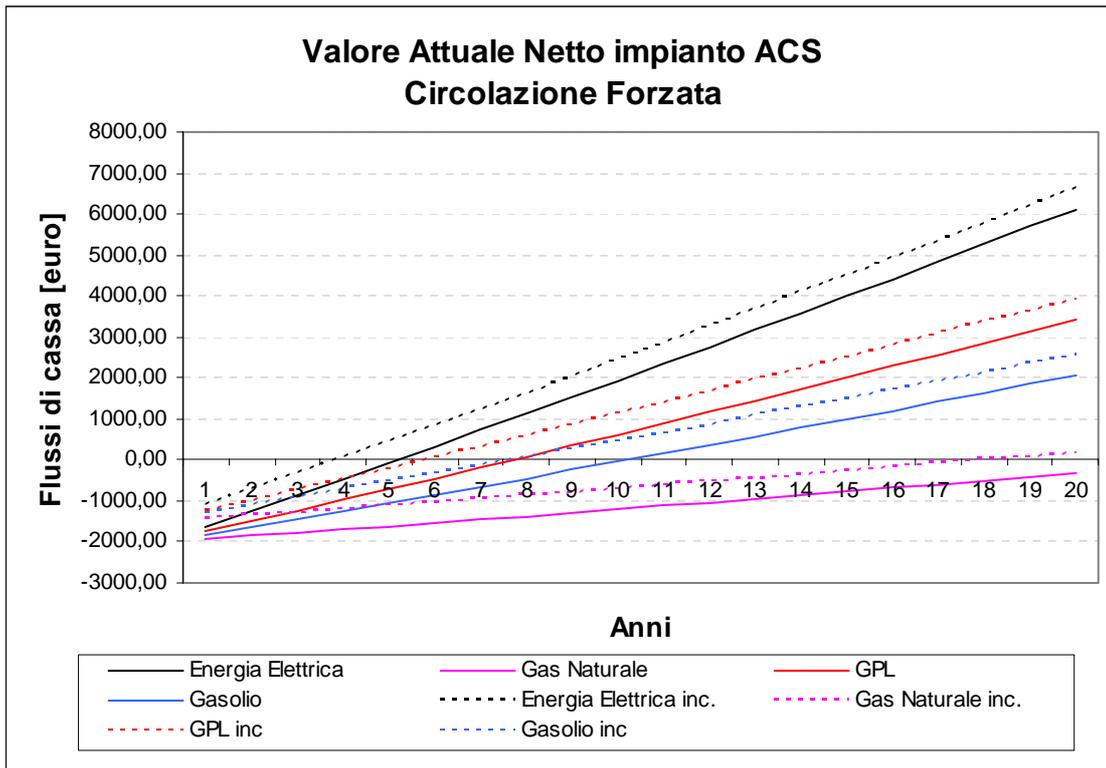


Figura 4-11 *Flussi di relativi ad un impianto ACS a circolazione forzata*

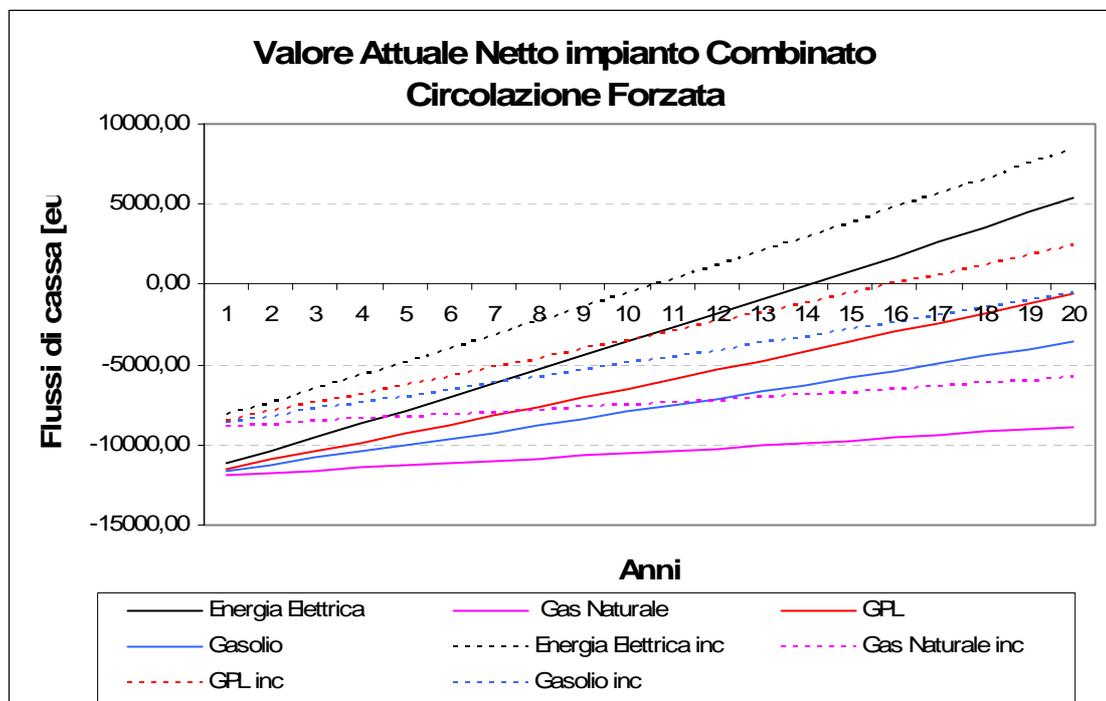


Figura 4-12 *Flussi di cassa relativi ad un impianto Comby a circolazione forzata*

4.1.5 Considerazioni aggiuntive

Lo sviluppo del mercato del solare termico è attualmente frenato dagli alti costi di investimento iniziale. Ciò rende questa soluzione economicamente ancora poco vantaggiosa a seconda della tipologia di impianto da integrare (caso di una famiglia media). Oltre agli incentivi in conto capitale, una possibile riduzione dei costi iniziali può derivare indirettamente dal meccanismo dei titoli di efficienza energetica (TEE). Il mercato di riferimento di questi certificati vede dal lato della domanda i distributori del gas e dell'energia elettrica con un portafoglio superiore a 100000 clienti, obbligati¹ a presentare un numero stabilito di certificati all' AEEG², e dal lato dell' offerta i distributori , non sottoposti all'obbligo, e le società dei servizi energetici (ESCO). Ogni soggetto quindi può effettuare interventi che permettano una riduzione dei consumi energetici sugli usi finali delle utenze (pubbliche o private) e per mezzo di schede di riferimento quantificare e avere diritto al numero corrispondente di TEE da poter così scambiare nel mercato o per mezzo di contratti con altri soggetti. Dato che tra i possibili interventi sono previsti anche le installazioni dei pannelli ST si possono realizzare le condizioni per una crescita della domanda dei sistemi ST³ e di conseguenza un considerevole abbassamento dei prezzi.

Per quanto riguarda il settore terziario esistono molte utenze in cui l'applicazione del ST può rappresentare una soluzione ideale dati gli elevati consumi dovuti ad ACS, riscaldamento e condizionamento degli ambienti. Tra queste sono da considerare gli edifici pubblici, gli ospedali, le piscine e le strutture destinate al settore turistico quale campeggi e alberghi. Una stima sul fabbisogno delle varie tipologie di utenze è riportato nella seguente tabella⁴:

¹ Il soggetto che non ottempera a tale disposizione è sottoposto al pagamento di penali superiori al corrispondente investimento relativo al mancato raggiungimento della quota stabilita.

² Autorità per l' Energia Elettrica e il Gas.

³ In linea con gli obiettivi previsti da alcuni studi, tra cui quelli eseguiti dall'ENEA e riportati nel documento "Libro Bianco".

⁴ Da "Specifica Tecnica di Fornitura" Ministero dell'Ambiente, allegato A., 10-02-2003, pag. 3. E' da notare come la temperatura dell'acqua di ingresso abbia un valore più elevato rispetto alla media (10°C).

	Litri/giorno procapite	kcal/giorno procapite	MJ/giorno procapite	kWhth/giorno procapite	NOTE Litri/giorno procapite
Ospedale	60	1980	8,29	2,30	Per posto letto
Case di riposo	40	1320	5,52	1,53	-
Scuole	5	165	0,69	0,192	-
Caserme	30	990	4,14	1,15	-
Industrie	20	660	2,76	0,767	-
Uffici	5	165	0,69	0,192	-
Campeggi	30	990	4,14	1,15	Per persona
Hotel alta cat	160	5280	22,1	6,14	Per stanza
Hotel bassa cat	100	3300	13,82	3,84	Per stanza
Palestre	35	1155	4,84	1,34	Per utilizzatore
Lavanderie	6	198	0,83	0,23	Per kg lavato
Ristoranti	10	330	1,38	0,38	Per pasto
Bar	2	66	0,27	0,076	Per consumazione

- * Si ipotizza una temperatura dell'acqua di ingresso pari a 12°C e una temperatura dell'acqua di fornitura pari a 45°C.

Tabella 4-20 Fabbisogno procapite di ACS per utenze del settore terziario

In alcuni casi, come le scuole, il mancato utilizzo dell'impianto durante il periodo in cui non si effettuano lezioni comporta un maggior tempo per il ritorno degli investimenti in quanto non si realizza un completo sfruttamento dell'impianto, senza sottovalutare che nei periodi di inattività si verificano guasti e malfunzionamenti del circuito legati alla stagnazione dell'acqua calda nei collettori.

E' da tenere presente inoltre che per le strutture pubbliche o ad uso pubblico, è prevista già con la legge 10/1991 l'applicazione di soluzioni che prevedono l'uso di fonti di energia rinnovabili che devono essere applicate nei casi in cui il tempo di ritorno degli investimenti, sia minore o uguale agli 8 anni¹.

Nell'ambito del settore terziario, allo scopo di diffondere le fonti rinnovabili, sono necessari progetti pilota, che permettono di sensibilizzare l'opinione pubblica verso queste tecnologie. Un esempio positivo di impianti di grandi dimensioni è quello della struttura penitenziaria di Rebibbia, nella città di Roma, realizzato nell'ambito del programma di solarizzazione delle carceri.

In ultimo, la possibilità di sfruttare l'energia solare prodotta dai collettori per il raffreddamento e la climatizzazione² estiva degli ambienti rappresenta un' applicazione molto interessante dato che gli impianti destinati al riscaldamento durante il periodo invernale, producono molta energia in eccesso durante il periodo estivo. Ciò permette di migliorare le prestazioni dei sistemi solari, in quanto la richiesta di energia per il

¹ Gli anni salgono a 10 nel caso di comuni con popolazione superiore ai 50000 abitanti (Da "Impianti solari termici. Acqua calda con l'energia solare-ISES Italia)

² La climatizzazione degli ambienti oltre a prevedere il raffreddamento implica il controllo del grado di umidità.

condizionamento è contemporanea alla disponibilità di energia sottoforma di radiazione solare. Esistono più tipologie di sistemi che comportano complessità impiantistiche e studi a livello progettuale molto al fine di poter rappresentare una soluzione conveniente rispetto ai più moderni impianti di condizionamento che hanno efficienze molto elevate. Le applicazioni più interessanti sono sicuramente quelle relative agli edifici di grandi dimensioni, anche se al momento sono in fase pre-commerciale.

4.2 Solare Fotovoltaico

La tecnologia del FV consente di trasformare direttamente l'energia proveniente dalla fonte solare in energia elettrica.

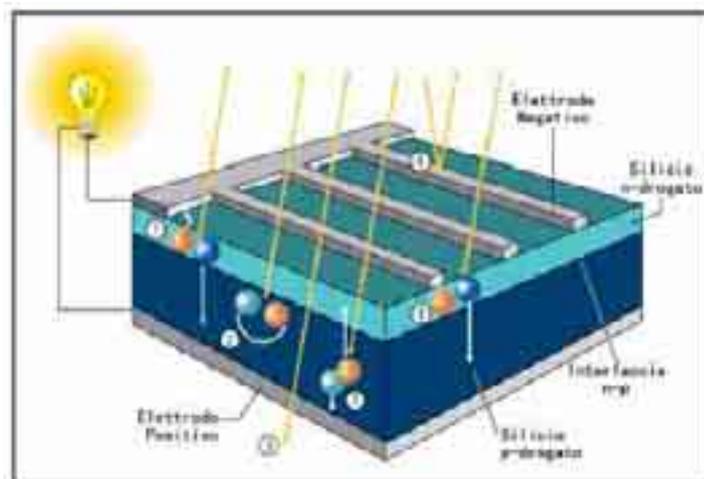


Figura 4-13 Esempificazione di una cella FV. ISES Italia.

Gli impianti sono classificabili in due grandi macrosettori:

- Isolati (stand-alone o off-grid): che comprendono tutte quelle applicazioni di potenza limitata (0,1÷100 kW) quali: pompaggio acqua, illuminazione zone isolate, dissalazione acqua, elettrificazione rurale, alimentazioni antenne telefoniche ecc
- Collegati alla rete (grid-connect). Questa tipologia di impianti può a sua volta essere suddivisa in sistemi di potenza, in grado di erogare potenze nominali superiori al MW¹ e destinati alla produzione di energia elettrica da immettere in rete come vere e proprie centrali di produzione, e impianti integrativi per la generazione distribuita applicati su tetti e facciate di edifici.

La classificazione appena introdotta, oltre a distinguere la tipologia di impianti in base alle caratteristiche del carico e alla destinazione d'uso, implica anche una distinzione tra i componenti che li costituiscono. Infatti per i sistemi in isola, l'energia elettrica prodotta necessita di essere immagazzinata per mezzo di accumulatori che permettano di superare i periodi di tempo che trascorrono fra l'utilizzo e la disponibilità della fonte solare, garantendo la fornitura di energia anche di notte o in condizioni meteo sfavorevoli.

Per le utenze collegate alla rete, tale dispositivo non è necessario in quanto è la rete stessa ad assicurare la continuità di esercizio e ad accumulare l'energia prodotta dal sistema FV e non utilizzata contemporaneamente dal carico.

¹ La centrale di Serre, in provincia di Salerno, ha una potenza nominale di 3,3 MW.

I componenti fondamentali degli impianti FV sono:

- i pannelli costituiti da un insieme di celle di materiale semiconduttore¹
- i dispositivi di regolazione e conversione dell'energia elettrica prodotta in valori di tensione coincidenti con quella degli utilizzatori e della rete.
- i dispositivi di sicurezza, collegamento all'impianto utilizzatore e misura.
- I sistemi di accumulo (come già detto per impianti in isola).

Le celle fotovoltaiche si differenziano in base alla composizione molecolare del materiale semiconduttore² di cui sono costituite e alla tecnologia adoperata nella fase di produzione, in:

- Silicio monocristallino
- Silicio policristallino
- Film sottile.

Tale distinzione deriva, per le prime due dalla purezza del silicio adoperato e per le forme e l'orientamento dei cristalli che lo costituiscono. La terza tipologia è caratterizzata dal fatto che nella fase di produzione il materiale adoperato si presenta sottoforma di gas e non di solido, il che permette di ottenere spessori assai più ridotti con conseguente riduzione dei costi di materia prima. I materiali semiconduttori adoperati per questa tipologia di celle sono il silicio (in tal caso viene detto amorfo dato che non sono riconoscibili i cristalli), il Tellurio di Cadmio (CdTe) e il Deseleniuro di Indio e Rame (CIS) o il Deseleniuro di Indio, Gallio e Rame (CIGS). Le caratteristiche tecnico-economiche che contraddistinguono le varie tipologie di celle sono riportate nella seguente tabella:

¹ Il materiale semiconduttore di cui è fatta la cella è di per sé caratterizzato dal fatto che gli atomi che lo costituiscono appartengono al IV gruppo della tavola periodica. Ciò equivale ad avere sulle orbite esterne 4 elettroni di valenza che permettono di legarsi ad altrettanti atomi del reticolo cristallino allo scopo di completare l'ottetto e rendere più stabile la configurazione. Questi elettroni sono caratterizzati da uno stesso livello energetico individuato dalla banda di valenza e possono passare ad un livello energetico superiore (banda di conduzione) solo se sottoposti ad un aumento di energia pari a ΔE (compreso tra 50 e 175 kJ/mol). Il trasferimento da una banda ad un'altra permette all'elettrone di muoversi liberamente nel reticolo, fino a che non si ricombina, ed inoltre crea una lacuna, assimilabile ad una carica positiva, che invece può muoversi nella banda di valenza. Questo fenomeno può essere amplificato se il semiconduttore viene sottoposto ad un "drogaggio", vale a dire se vengono inseriti nel reticolo cristallino atomi di sostanze differenti aventi un numero differente di elettroni di valenza (atomi aventi 3 o 5 elettroni di valenza). Nel primo caso equivale ad immettere delle lacune e quindi delle cariche positive (*drogaggio p*), mentre nel secondo degli elettroni, cioè cariche negative (*drogaggio n*). Avvicinando due superfici drogate diversamente (giunzione *p-n*) si crea una migrazione di cariche negative (da *n* a *p*) e positive (da *p* a *n*) fino a che il potenziale elettrico generato dallo spostamento non fa arrestare il moto. Sottoponendo però una giunzione *p-n* alla radiazione solare, l'energia contenuta nei fotoni, se superiore a quella di legame, può liberare coppie lacune-elettroni che permettono di creare una corrente elettrica che scorre sul circuito esterno

² Proveniente dall'industria elettronica

Tipologie di celle		η^1 %	Stato della tecnologia	Mercato	Costi di produzione	Costo dei materiali ²	Problemi per smaltimento
Cristallino	Mono-	15 (24)	Matura	80%	elevati	Medi	Medi
	Poli-	13 (19,8)	Matura				Medi
Film sottile ³	Silicio Amorfo	5÷8 (13)	In sviluppo	20%	medi	Elevati	Elevati
	CdTe	>10 (16)	Laboratorio	Ottime prospettive	Medio-alti	Medi	Molto-Elevati
	CIS/CIGS	>11 (18,8)	Laboratorio	Buone Prospettive	Bassi	Bassi	Elevati

Tabella 4-21 *Caratteristiche delle celle FV*

Ogni cella fotovoltaica di tipo cristallino fornisce, mediante i collegamenti elettrici predisposti durante la fase di produzione, valori⁴ di tensione e corrente limitati rispetto a quelli richiesti nelle normali applicazioni e dai dispositivi facenti parte del sistema solare, posti a valle. Per ovviare a ciò vengono generalmente assemblate in strutture di 36, 64 o 72 unità che costituiscono moduli di dimensioni pari rispettivamente a 0,5 , 0.64 e 1,0⁵ m². I moduli possono essere utilizzati singolarmente o collegati tra loro in serie e i parallelo così da formare stringhe e campi fotovoltaici, ottenendo così il valore di potenza desiderato.

Nell'ambito delle aree urbane le applicazioni più comuni sono quelle relative ai sistemi che prevedono l'integrazione nei tetti o nelle facciate degli edifici. Esistono però anche casi di sistemi in isola, utilizzati in particolare per alimentare le infrastrutture stradali quali ad esempio gli impianti di illuminazione pubblica e di segnaletica stradale.

Analizzando il caso più comune, cioè quello di integrazione nelle strutture esterne degli edifici, per il dimensionamento l'iter da seguire è analogo a quello già visto per gli impianti ST. Quindi nota l'energia a disposizione nel punto dove installare l'impianto e le

¹ Da "Impianti solari fotovoltaici a norme CEI"- F.Groppi-C.Zuccaro

² Per quanto riguarda il silicio amorfo il problema legato ad i costi dei materiali elevati è dovuto al fatto che sono al momento ancora poco commercializzati e adottati per applicazioni ad elevata integrazione architettonica.

³ I valori riportati sono riferiti a celle utilizzate in pannelli fotovoltaici piani. E' da tenere presente che le celle al silicio amorfo hanno una perdita di rendimento nei primi periodi di vita .Con la tecnologia a concentrazione e l'utilizzo di celle Fresnel, caratterizzate dall'utilizzo di materiali a film sottili, è possibile raggiungere valori di rendimenti fino al 40%. Queste celle sono al momento applicate in progetti sperimentali (es: Solarmundo) per la produzione di energia elettrica da immettere in rete o per la produzione di idrogeno.

⁴ I valori delle grandezze elettriche caratteristiche vengono rilevati in condizioni standard di funzionamento vale a dire con una temperatura di 25°C e un irraggiamento di 1kW/m² .

⁵ Esistono moduli di dimensioni superiori (1,5m²)

caratteristiche dei componenti e del carico è possibile risalire alla superficie necessaria. Le soluzioni progettuali che vengono generalmente seguite però dipendono fortemente oltre che dal fabbisogno dell'utenza anche dagli aspetti economici relativi agli incentivi erogati per la produzione di energia dalle fonti rinnovabili in generale e da quelli specifici per il FV. E' preferibile allora determinare l'energia e la superficie necessaria per porzioni di impianti in grado di generare una potenza di 1 kWp¹.

Le ore equivalenti in cui si registrano le condizioni standard di irraggiamento nel corso di un anno sono mediamente 1200²:

$$E_{S,1\text{ kW}} = 1 \text{ kW} \cdot 1200 \text{ h} = 1200 \text{ kWh}$$

Noto dai dati del ST, che in una località del centro Italia come Roma l'energia media incidente è circa 1700 kWh/m²/anno è possibile determinare l'energia effettivamente convertita dai pannelli³ inserendo il valore di efficienza del sistema solare ($\eta_{\text{impianto}} = \eta_{\text{modulo}} \cdot \eta_{\text{convertitore}}$)⁴. Per quanto riguarda il η_{pannello} i dati a cui fare riferimento sono generalmente i seguenti:

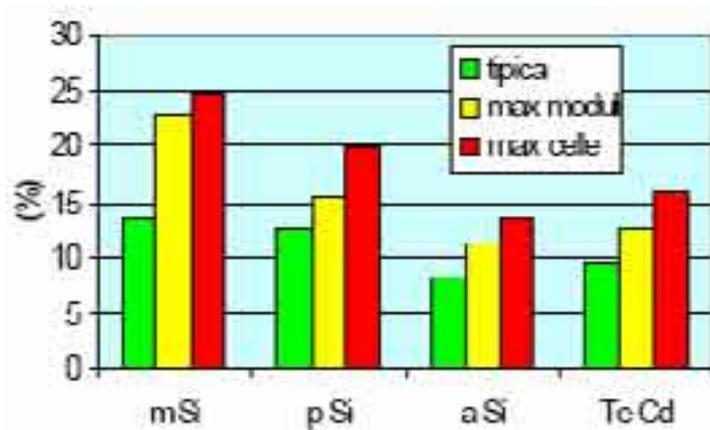


Figura 4-14 Rendimenti celle e moduli. Fonte ENEA

Tipologia moduli	η_{pannello}
Moduli silicio mono-cristallino	13 %
Moduli silicio poli-cristallino	11 %
Moduli film sottile (silicio)	7 %

Tabella 4-22 Rendimenti celle e moduli.

¹ Nelle condizioni già viste precedentemente.

² Da "Impianti solari fotovoltaici a norme CEI"- F.Groppi-C.Zuccaro

³ Considerando il caso di nessuna presenza di ostacoli verso la superficie captante del pannello.

⁴ Valori dei rendimenti sono stati ripresi da "Impianti solari fotovoltaici a norme CEI"- F.Groppi-C.Zuccaro. e tengono conto di tutte perdite relative alla conversione FV.

Come già citato in precedenza un impianto FV è costituito oltre che dai moduli, anche da un sistema di conversione (inverter) e da un insieme di componenti circuitali che intervengono sul valore del rendimento complessivo del sistema ($\eta_{\text{convertitore}} = 0,80$). Quindi l'energia convertita da un sistema FV è:

$$\left. \begin{array}{l} \eta_{\text{convertitore}} \\ \eta_{\text{pannello}} \end{array} \right\} \Rightarrow E_C = E_D \cdot \eta_{\text{impianto}}$$

Tipologia moduli	$\eta_{\text{impianto}} (\eta_{\text{modulo}} \cdot \eta_{\text{convertitore}})$	$E_C, [\text{kWh/m}^2]$
Moduli silicio mono-cristallino	0,10	170
Moduli silicio poli-cristallino	0,085	145
Moduli film sottile (silicio)	0,055	95

Tabella 4-23 Energia convertita sistemi FV

Quindi la superficie necessaria per ogni kWp dell'impianto è di:

$$S_{\text{kWp}} = \frac{E_s}{E_{C-i}}, [\text{m}^2]$$

Tipologia moduli	Superficie, $[\text{m}^2]$
Moduli silicio mono-cristallino	7
Moduli silicio poli-cristallino	8,30
Moduli film sottile (silicio)	12,6

Tabella 4-24 Superficie del sistema FV (1 kWp)

Da queste grandezze è possibile risalire ai valori di superficie necessari per le varie applicazioni, sia nel settore residenziale che terziario.

Come per il ST, i moduli in commercio hanno dimensioni standard del quale tenere conto nella fase di progettazione e in quella di installazione.

Il beneficio a livello ambientale di un'applicazione del FV relativo alla potenza di 1 kWp corrisponde quindi al consumo di energia evitato e tenendo presente il valore medio delle emissioni di gas serra e inquinanti del parco di centrali elettriche a livello nazionale, ciò corrisponde a:

Inquinante	CO ₂	CO	COVNM	NO _x	PM ₁₀	SO ₂
Fonte Energia	Kg	g	g	g	g	g
Energia Elettrica	592,80	145,20	21,12	536,40	29,28	829,20

Tabella 4-25 Emissioni di gas serra e inquinanti evitate per kWp

Per quanto riguarda l'applicazione nel settore residenziale, considerando che una famiglia media consuma circa 3000 kWh/anno, la potenza e la relativa superficie di pannelli solari necessaria al completo soddisfacimento del fabbisogno corrispondono a:

$$P_{\text{Tot}} = \frac{3000}{1200} \cong 2,5\text{kWp}$$

Tipologia moduli	Superficie,[m²]
Moduli silicio mono-cristallino	17,5
Moduli silicio poli-cristallino	21
Moduli film sottile (silicio)	31,5

Tabella 4-26 Superficie necessaria al completo soddisfacimento di un'utenza residenziale media

In genere il fattore di copertura del fabbisogno di un'utenza non supera il 50-70% dell'intero valore.

E' evidente come anche in questo caso si ripropone il problema legato alla superficie disponibile per edifici "medi" di 2 o 3 piani¹, già visto per il ST e come . Inoltre i valori trovati si riferiscono alla situazione ideale di installazione su un piano inclinato di 30° in direzione Sud e quindi una qualsiasi variazione di questi parametri comporta un' aumento di tale superficie in base ai coefficienti riportati nella tabella 3.18. In genere già a livello di progettazione è necessario tenere presente questi aspetti e dimensionare l'impianto di conseguenza.

Inoltre la possibilità di applicare questa tecnologia ad una percentuale non trascurabile di edifici del settore civile, residenziale e terziario, permetterebbe di ridurre sensibilmente le emissioni di gas effetto serra e inquinanti sia per i motivi legati al consumo diretto di

¹ Il problema tende ad amplificarsi se considerato che nella realtà gli edifici sono costituiti da 6-8 piani e che il numero di abitazione e quindi di utenze è superiore, mentre lo spazio a disposizione è comunque limitato.

energia sugli usi finali e sia quelle dovute alle perdite di trasporto e distribuzione dell'energia dagli elettrodotti fino alle prese dei contatori delle utenze.

Per quanto riguarda la valutazione economica, i prezzi dei sistemi FV si aggirano intorno ai 5500÷7500 euro/kWp. E' opportuno tenere presente che esistono al momento degli incentivi secondo un meccanismo definito "conto energia" che prevede una remunerazione, che differisce in base alla potenza installata, per ogni kWh prodotto dall'impianto e per una durata di 20 anni¹.

Impianti di potenza da 1 a 20 kW	0,445 €/kWh
Impianti di potenza da 20 kW a 50 kW	0,460 €/kWh
Impianti di potenza da 50 kW a 1.000 kW	0,490 €/kWh (valore massimo della tariffa soggetto a gara)

Tabella 4-27 Tariffe relative al meccanismo del conto energia. Fonte ISES Italia

Inoltre per gli impianti di produzione da fonti rinnovabili, con potenza inferiore a 20 kW, è presente un meccanismo definito "scambio sul posto" con cui gli utenti che ne beneficiano possono cumulare crediti corrispondenti all'energia prodotta e non autoconsumata da poter sfruttare per un periodo di 3 anni². L'energia prodotta dall'impianto FV viene misurata per mezzo di un contatore che può coincidere con quello che misura l'energia prelevata, come è chiarito nella seguente figura:

¹ E' da notare come questi incentivi non possano essere erogati nel caso in cui siano già altri tipi di incentivi quali certificati verdi o bianchi, e al più può essere cumulato se è presente un incentivo in conto capitale non superiore al 20% del costo dell'impianto. Inoltre tali valori vengono rivalutati in base al tasso di inflazione (su dati ISTAT). Se per la realizzazione dell'impianto il committente beneficia della riduzione dell'IRPEF, gli incentivi sono ridotti del 30%. E' da notare che l'IVA per gli impianti che sfruttano l'energia solare è ridotta al 10%.

² E' quindi ideale evitare di sovradimensionare l'impianto dato che se il saldo tra energia prodotta e non consumata non si annulla dopo i tre anni, il credito relativo viene perso.

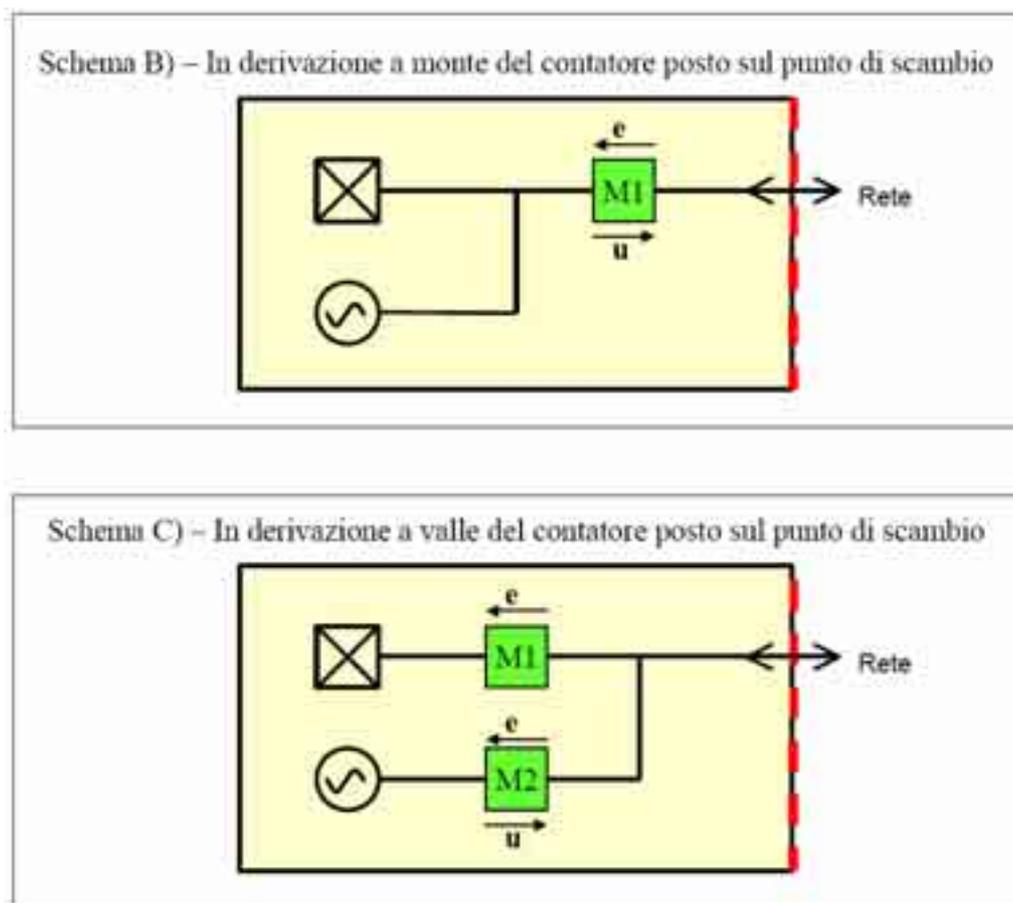


Figura 4-15 Schemi relativi alle possibili connessioni previste dal meccanismo di scambio sul posto

Questo meccanismo, che è possibile cumularlo a quello del conto energia, rappresenta la soluzione al momento più seguita per tutte le utenze, in particolare quelle residenziali. Riferendosi ad un pannello FV in grado di generare una potenza di 1 kWp, pari 1200 kWh di energia prodotta, viene di seguito calcolato il valore attualizzato netto dell'investimento.

Per eseguire l'analisi sono state fatte le seguenti considerazioni:

- Tasso generale di inflazione¹ (g) del 2.4%
- Tasso di inflazione dell'energia² (e) del 4.0%
- Tasso di sconto³ (d) del 3.5%
- Tempo di vita di 20 anni
- Costo di manutenzione del 1% + 30 € per esercizio
- Costo dell'impianto di 6000 €/kWp + 10% di IVA (chiavi in mano).
- Costo dell'energia elettrica 18,5 c€/kWh¹ (per la durata della vita dell'impianto uguale a 25 anni)

¹ Banca d'Italia –“Indagine Sole 24 ore-Banca d'Italia sulle aspettative di inflazione e crescita”- Marzo 2006

² Sito web Banca d'Italia (www.bancaditalia.it-andamenti_02_06.pdf)

³ Sito web Banca d'Italia (www.bancaditalia.it-anni 2004-2007), tendenza ultimi mesi a lordo delle imposte.

- Riduzione delle prestazioni per degradazione dei moduli (derating) pari a 1%
- Incentivo in conto energia di 44,5 c€/kWh per 20 anni

Da ciò, applicando la formula:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n R_t \cdot \left(\frac{1}{1+d}\right)_{C.E.}^t + \sum_{t=1}^n R_t \cdot \left(\frac{(1+e) \cdot (1+g)}{1+d}\right)_{Risparmio}^t - \sum_{t=1}^n C_t \left(\frac{1+g}{1+d}\right)_{manutenzione}^t$$

In cui però i flussi di cassa per risparmio sul costo della bolletta dell'energia elettrica ha una durata superiore rispetto a quello degli incentivi, tenendo presente inoltre che questi ultimi vengono aggiornati in base ai dati ISTAT dell'inflazione nel corso dei 20 anni.

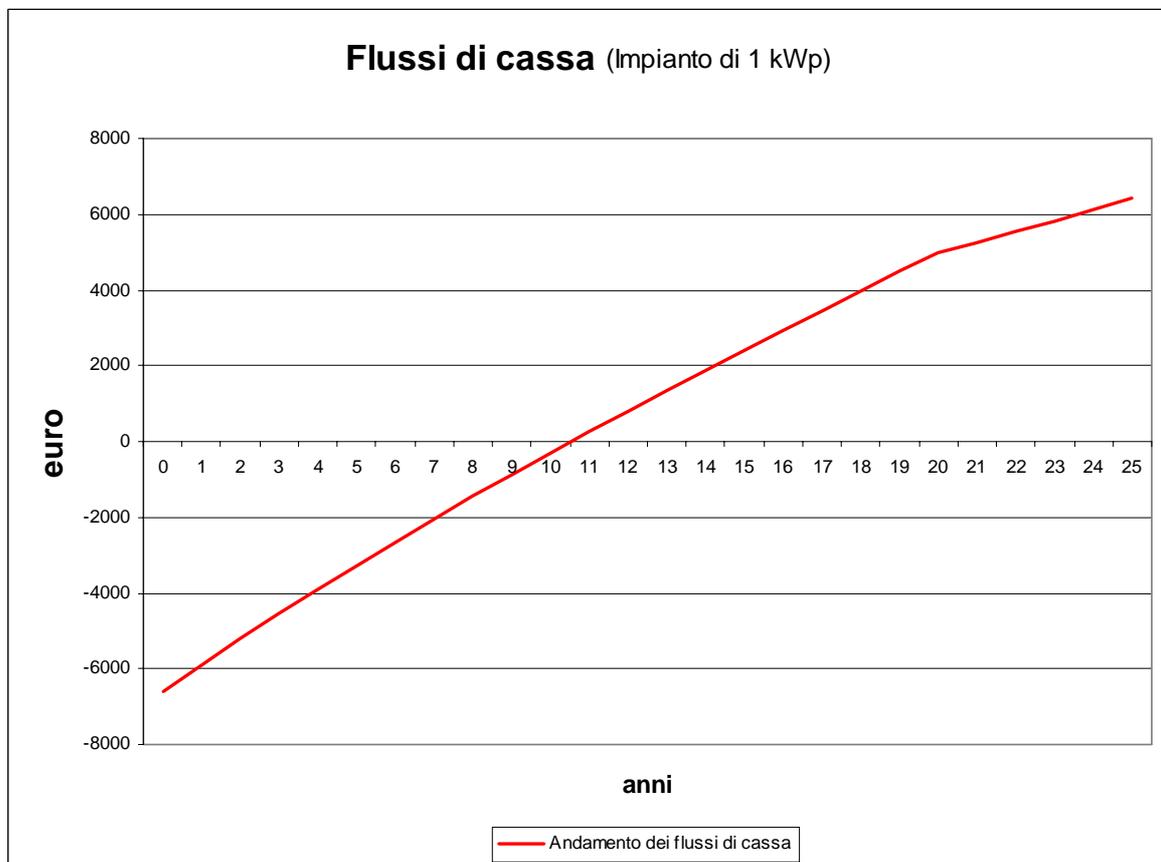


Figura 4-16 Andamento dei flussi di cassa per kWp

VAN = 6415 euro; Tempo di ritorno = ~10 anni; TIR = 12,9 %

Nell'ambito del progetto di una abitazione media con consumo annuo di 3000 kWh si ha quindi che il flusso di cassa relativo è pari a:

¹ Considerazione già introdotta nel capitolo relativo al ST.

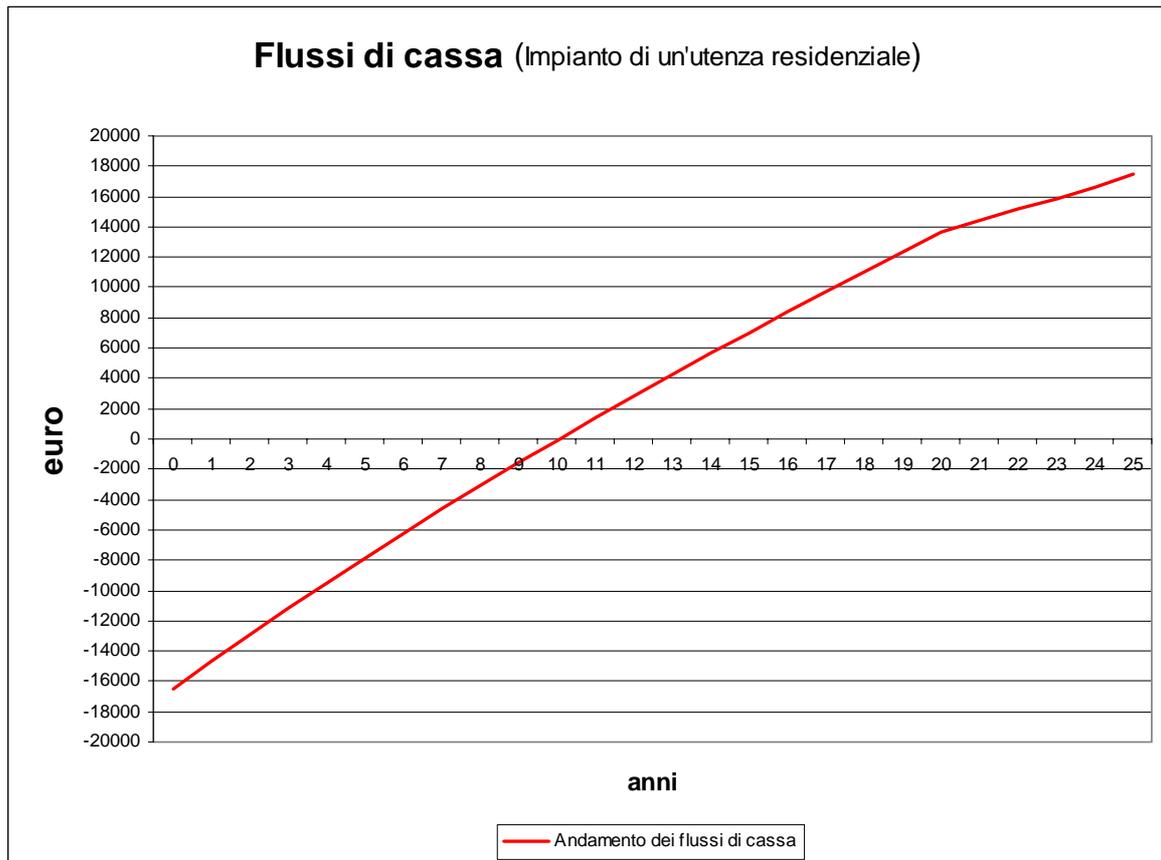


Figura 4-17 *Andamento dei flussi di cassa per utenza residenziale media*

VAN = 17445 euro; Tempo di ritorno = ~10 anni; TIR = 12,9 %

4.2.1 Considerazioni aggiuntive

Oltre alla affermata tecnologia dei pannelli piani, sta suscitando particolare interesse quella relativa ai sistemi FV a concentrazione, dati gli elevati rendimenti raggiungibili per via del maggiore flusso energetico ricevuto dalla cella e quindi l'amplificazione del fenomeno FV. I valori globali dell'intero impianto infatti si aggirano attorno al 20%. Allo scopo di massimizzare l'energia captata, questi sistemi necessitano di organi di movimentazione che consentono di seguire il moto del Sole. Inoltre è presente un dispositivo di raffreddamento del ricevitore fotovoltaico che permette di ridurre le perdite legate alle elevate temperature. Al momento questi sistemi sono applicati a livello sperimentale come nel caso del progetto "Solarmundo".

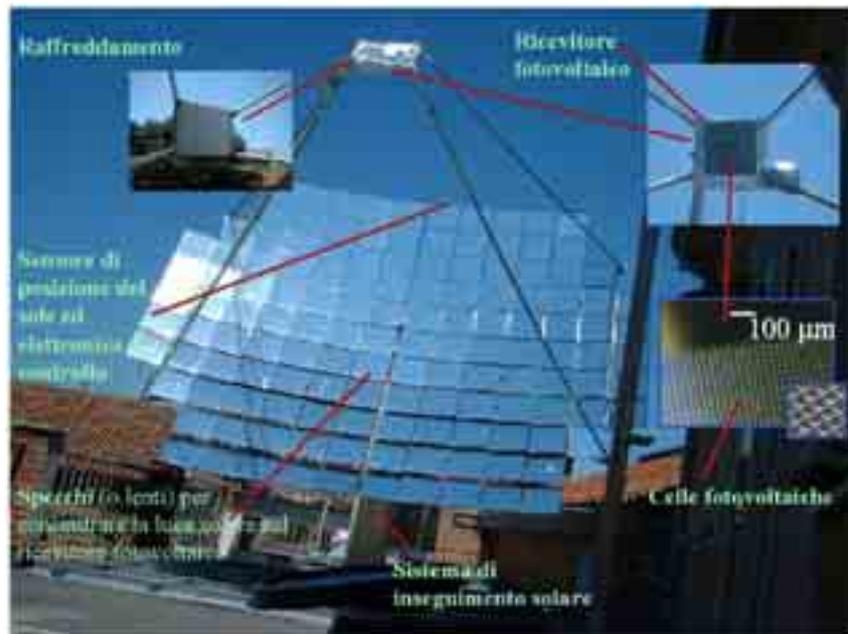


Figura 4-18 Dispositivo FV a concentrazione. Fonte Università di Ferrara

5 Solare Termodinamico (cenni)

Con questa terminologia si identificano quegli impianti che utilizzano la fonte solare per la produzione di calore a media e alta temperatura (di seguito MT e AT), cioè superiore ai 250 °C. Questi sistemi concentrano l'energia proveniente dai raggi solari su dispositivi ricevitori trasmettendola istantaneamente al fluido termovettore che scorre al loro interno (sistemi solari a concentrazione o CSP). A differenza però delle altre tecnologie solari (ST e FV) quella termodinamica sfrutta la sola componente solare diretta e quindi i dispositivi di captazione necessitano di apparecchi di movimentazione che permettono di orientare nella direzione più corretta la superficie captante.

Il calore così ottenuto viene adoperato direttamente in processi industriali quali:

- Produzione di energia meccanica e energia elettrica da immettere nella rete o per alimentare zone isolate, che rappresenta al momento l'impiego più importante.
- Produzione di sostanze chimiche (es. solventi).
- Produzione di idrogeno e anche combustibili eco-compatibili attraverso processi termochimici.
- Dissalazione delle acque salmastre e marine
- Utilizzo per l'essiccazione di prodotti alimentari.

La tecnologia del solare termodinamico si basa sui seguenti punti forza:

- il limitatissimo impatto ambientale¹, paragonabile alle altre fonti di energia alternativa, a differenza delle normali centrali termoelettriche alimentate da combustibili fossili.
- costi di produzione che al momento seppur elevati rispetto agli altri impianti convenzionali tenderanno a diminuire, tenuto conto dell'aspetto di mercato dovuto all'applicazione su scala mondiale², degli incentivi che intervengono a livello nazionale (come i certificati verdi, CV) ed internazionale (con l'applicazione dei meccanismi stabiliti dal Protocollo di Kyoto, CDM e JI) e del fatto che a differenza dei combustibili fossili, l'energia solare è praticamente inesauribile.

Queste motivazioni permetteranno una maggiore affermazione della fonte solare, in particolare termica e termodinamica, ma in genere delle fonti alternative, nel panorama energetico mondiale.

¹ Dovuto esclusivamente alla costruzione dell'impianto mentre la fase di esercizio è totalmente esclusa.

² Ad oggi la situazione di ricerca, sviluppo e applicazione della tecnologia solare termodinamica è paragonabile a quella dell'eolico di circa venti anni fa.

La ricerca scientifica ha raggiunto nel corso degli ultimi anni ottimi risultati che assieme a quelli ottenuti nel campo dei nuovi materiali adoperati nella costruzione dei sistemi ricevitori rendono la tecnologia solare termodinamica più efficiente e quindi senza dubbio perseguibile anche economicamente nell'arco del medio e lungo periodo. Ad oggi è stimato che possa conseguire gli stessi risultati che è riuscita a fare la tecnologia eolica nel corso degli ultimi due decenni e ciò è di buon auspicio per lo sviluppo dei CSP, anche se è evidente la differenza dovuta alla mancanza della fonte solare in molti Paesi in cui si concentrano i maggiori investimenti.

Dal punto di vista dell'integrazione di questa tecnologia nell'ambito di una pianificazione urbana fondate speranze offre la possibilità di sfruttare le alte temperature dei sistemi solari a concentrazione nel processo di scissione termica delle molecole di acqua e altre sostanze allo scopo di poter ottenere combustibili eco-compatibili, così da ridurre le emissioni di gas ad effetto serra e soprattutto di inquinanti, dovute in gran parte al settore dei trasporti.

5.1 Tipologie di impianti solari a concentrazione (CSP)

Esistono tre tipi di tecnologie che si distinguono tra loro per la geometria e la disposizione del concentratore rispetto al ricevitore:

- impianti a torre centrale (Solar Tower)
- impianti con collettori a disco parabolico (Parabolic Dish)
- impianti con collettori parabolici lineari (Parabolic Trough)



Figura 5-1 Esempi delle tre tecnologie

A seconda della tecnologia adoperata è possibile rilevare un fattore di concentrazione (rapporto tra la superficie degli specchi e quella del ricevitore) decrescente analogamente alle temperature, come riportato nella seguente tabella:

Tipo di collettore	Fattore di concentrazione	Range di temperature in fase di esercizio (°C)
Impianti a torre centrale	200-10000	400-1000
Impianti con collettori a disco parabolico	200-10000	250-700
Impianti con collettori parabolici lineari	10-50	150-350

Tabella 5-1 *Fattore di concentrazione e temperature di esercizio*

5.1.1 Impianti a torre solare con ricevitore centrale (Solar Tower)

Sono impianti costituiti da un sistema di specchi piani detti eliostati che riflettono e concentrano la radiazione solare in direzione del ricevitore posto alla sommità di una torre. Questi sistemi permettono di raggiungere fattori di concentrazione e temperature molto elevate, tanto più quanto maggiore è l'intensità della radiazione puntuale trasferita dal campo solare al ricevitore. La necessità quindi di avere un'area specchi il più estesa possibile, proporzionale alla potenza dell'impianto, va però commisurata allo sviluppo in altezza della torre che è funzione del diametro del campo solare e ad un uso razionale del terreno sede dell'impianto.

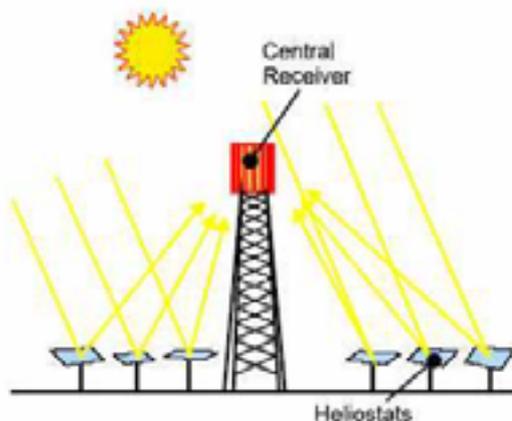


Figura 5-2 *Schema sistemi solar tower*

Infatti man mano che aumenta la distanza dal centro del campo diminuisce l'altezza con cui gli eliostati intravedono il ricevitore e quindi allo scopo di evitare un ombreggiamento relativo è necessario aumentare la distanza tra i vari elementi. Di fatto per ottenere quindi impianti con potenze di qualche decina di MW sarebbe necessario altezze attorno ai 200 m che implicherebbero delle difficoltà nel puntamento degli specchi e nella precisione con la quale questi dovrebbero essere realizzati.



Figura 5-3 *Impianto Solar Two (California)*

Allo scopo di ottenere ogni istante la maggior concentrazione possibile di raggi solari ogni eliostato è provvisto di un sistema di inseguimento su doppio asse in modo da poter trasmettere la maggior quantità di radiazione possibile al ricevitore sfruttando l'effetto girasole. Il calore viene trasmesso al fluido termovettore composto da sali fusi o oli diatermici o una loro combinazione, che permette di produrre vapore ad elevate temperature e pressioni, analogamente a quanto accade negli impianti di produzione di ultima generazione alimentati da fonti fossili.

5.1.2 Impianti con collettori a disco parabolico (Parabolic Dish)

Questi tipi di impianti sono costituiti da un paraboloide che riflette la radiazione solare nel punto focale in cui è posizionato il ricevitore. Come riportato nella tabella precedente i valori di temperatura che si raggiungono sono compresi tra i 250 e i 700 °C. Questi sistemi possono essere sfruttati per produrre energia elettrica attraverso un motore a combustione esterna (a ciclo Stirling o Brayton) che viene posizionato sul ricevitore. Le dimensioni del

paraboloide nei progetti fino ad adesso realizzati sono particolarmente ridotte (superficie del concentratore di circa 100 m^2) e anche le potenze sono piuttosto limitate (poche decine di kW), ciò è dovuto essenzialmente a motivi economici. Se da un lato questa tecnologia solare a concentrazione comporta maggiori costi è anche vero che tale soluzione permette una facile modularità ed è quindi indicato per le utenze isolate.

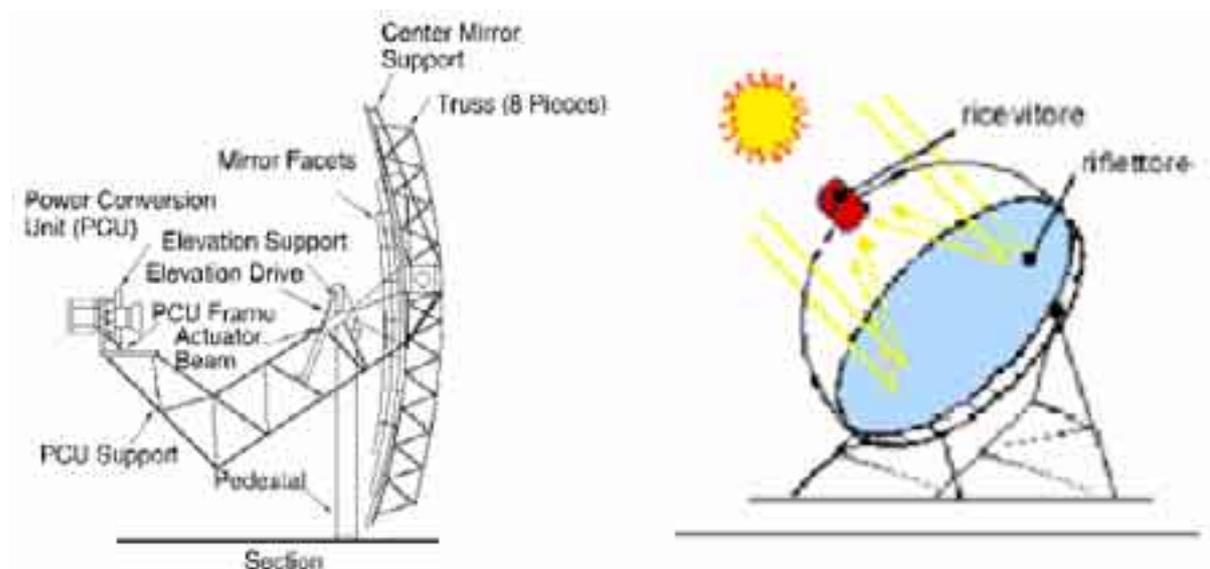


Figura 5-4 Schema sistemi parabolic dish



Figura 5-5 Impianto Eurodish (CESI)

5.1.3 Impianti con collettori parabolici lineari (Parabolic Trough)

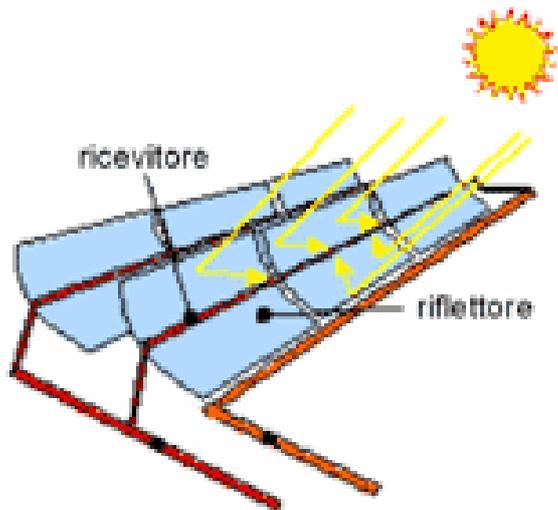


Figura 5-6 Schema parabolic troughs

Questa tipologia di impianto, chiamata anche SEGS (Solar Electric Generation System) è caratterizzata dalla disposizione di lunghe file di specchi di forma parabolica che ruotano su un unico asse parallelo alla linea focale e in cui è posizionato il ricevitore.

Il fluido termovettore, nella prima versione di questi sistemi, è composto da oli minerali molto costosi e altamente tossici ed infiammabili alle alte temperature, il che limita la temperatura di esercizio e quindi l'efficienza dell'impianto. Come

conseguenza di ciò tali sistemi, non prevedendo la possibilità di accumulare il calore prodotto, necessitano di una integrazione mediante combustibili fossili per assolvere al problema della variabilità della fonte solare.



Figura 5-7 Impianto di Kramer Junction (California)

Grazie alla ricerca nel settore, svolta in particolar modo dall'ENEA¹ in collaborazione con ENEL, è stato messo a punto un sistema che abbina alcune soluzioni caratteristiche dei sistemi a concentratori parabolici (in particolare la geometria del collettore e del tubo ricevitore) con altre appartenenti ai sistemi a torre (composizione del fluido termovettore, presenza degli accumuli per il calore).

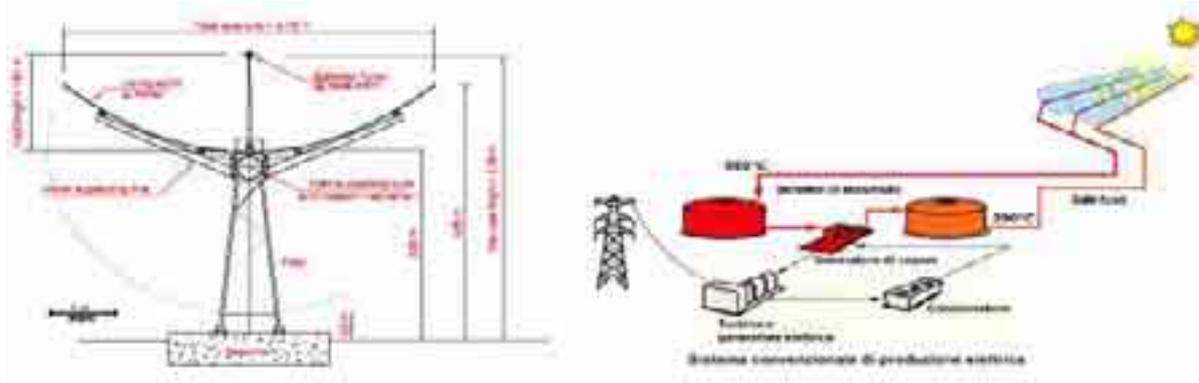


Figura 5-8 Collettore adoperato e schema impianto solare termodinamico con tecnologia ENEA

Il progetto sperimentale, che applica questa soluzione innovativa, prevede la sostituzione degli oli minerali con i sali fusi (60% di NaNO_3 , nitrato di sodio, e 40% di KNO_3 , nitrato di potassio) associato ad un nuovo tubo ricevitore che permette di operare alle temperature massime previste di 590 °C. Inoltre prevede l'introduzione di un sistema di accumulo costituito da due serbatoi² (già adoperati nei sistemi a torre) che permettono di assecondare lo sfasamento esistente tra le ore di picco dell'irradiazione solare con quelle in cui si presenta la maggiore richiesta di energia da parte dell'utenza e di eliminare il problema della variabilità meteorologica del sole nei vari momenti della giornata, il tutto associato ad un sistema molto più economico e facilmente controllabile.

Le varie tecnologie hanno rendimenti differenti come illustrato nella seguente tabella:

Tipologia di impianti	Solar Tower	Parabolic Trough	Parabolic Dish
Efficienza %	14÷19 (23)	10÷12 (21)	18÷23 (29)

Tabella 5-2 Rendimento solare annuo (rendimento di picco)

¹ Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente

² Uno relativo ai sali riscaldati (sorgente calda) e l'altro ai sali "freddi" (sorgente fredda).

Per quanto riguarda i costi (di investimento e di produzione¹) per impianti destinati alla generazione di energia elettrica, di seguito è riportata una panoramica sulla situazione aggiornata al 2004, nei confronti delle altre tecnologie, sia con fonti di energia alternativa che fossili ed inoltre una previsione fatta da ENEA in caso di applicazione commerciale delle varie soluzioni tecnologiche esistenti (solare termico si riferisce ovviamente ai sistemi ad alta temperatura considerando la soluzione dei collettori parabolici lineari con l'applicazione delle soluzioni ENEA).

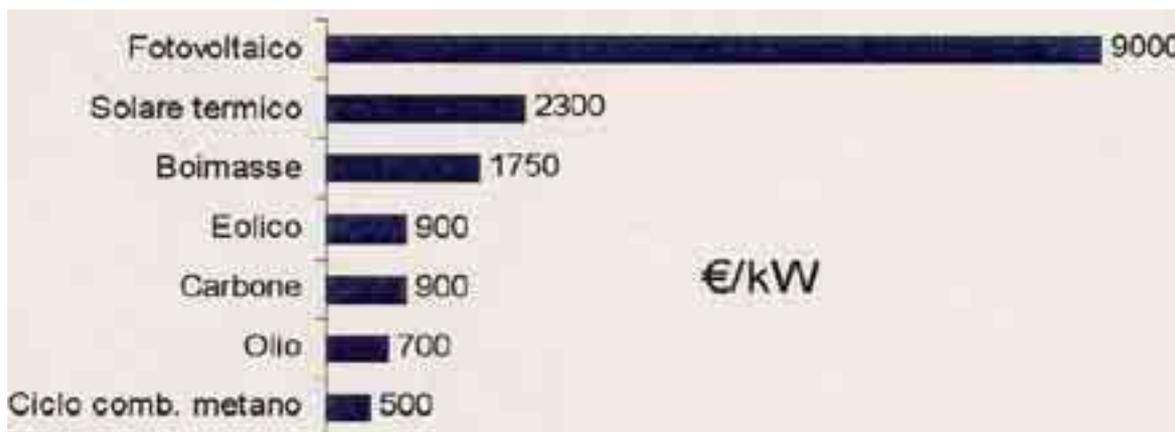


Figura 5-9 Costi di investimenti (da: "Il Mondo" 2004)



Figura 5-10 Costi di produzione (da: "Il Mondo" 2004)

Le previsioni di costo per l'applicazioni dei sistemi solari termodinamici sono molto ottimistiche, considerando una loro forte applicazione futura, ed è previsto soprattutto per i

¹ Costi di investimento rappresentano i costi sostenuti per realizzare l'impianto di produzione e sono espressi in €/kW, mentre i costi di produzione, espressi in €/kWh, tengono conto dei costi di investimento, di esercizio e manutenzione, del combustibile e oneri generali, tutti attualizzati per una vita media degli impianti di 25 anni

sistemi a torre e quelli parabolici lineari che nel giro di pochi anni potrebbero essere raggiunti valori dell'ordine rispettivamente di 7 e 6 c\$/kWh¹.

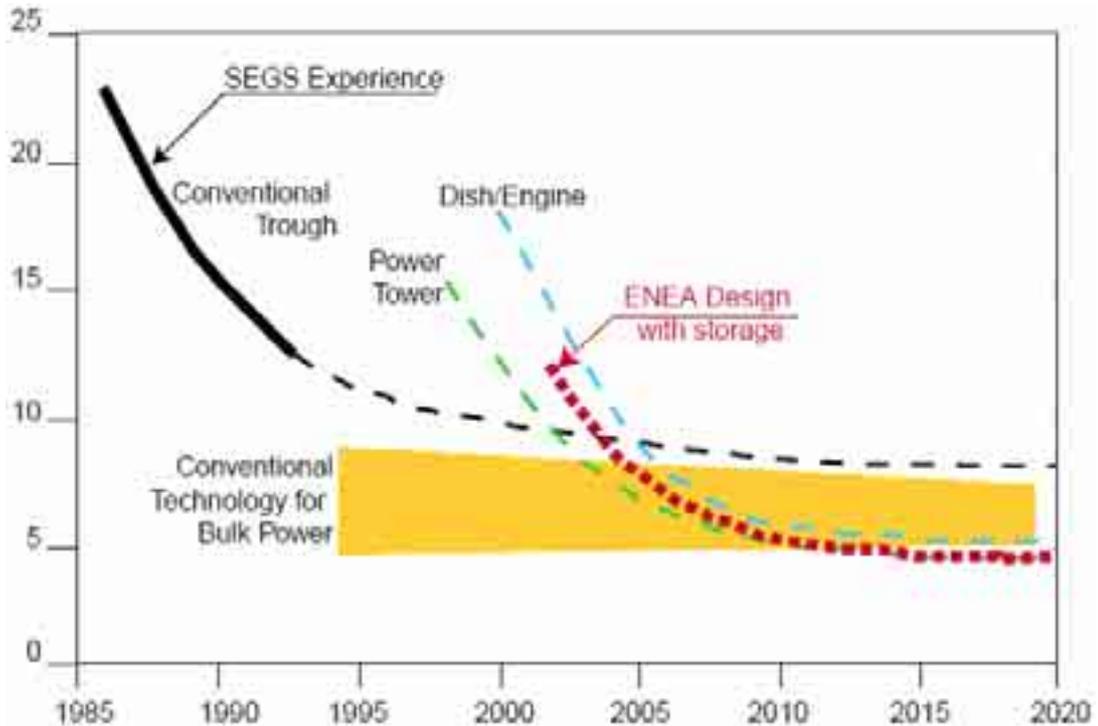


Figura 5-11 Previsioni di costi di produzione per quanto riguarda le varie tecnologie

5.1.4 Ricerca e sviluppo futuro

Gli studi sono concentrati oltre che su uno sviluppo delle tecnologie già esistenti, in particolare modo nei confronti dei materiali resistenti ad altissime temperature, anche su altre applicazioni della fonte solare nelle diverse tipologie in cui si manifesta.

E' questo l'esempio delle Air Solar Towers, cioè torri solari che sfruttano la variazione di densità dell'aria associata dovuta ad un suo riscaldamento in un'area rivestita di vetri così da creare una serra. L'area calda attraverso l'effetto camino viene convogliata sulla torre, situata al centro della serra, nella quale sono posti degli aerogeneratori che permettono di trasformare l'energia cinetica della corrente ascensionale in energia meccanica e poi in elettrica. Questa applicazione ha visto il suo primo prototipo realizzato in Spagna ed è prevista una realizzazione su grande scala in Australia con una potenza nominale di 200 MWe.

¹ Inoltre per ciò che riguarda eventuali applicazioni del modello a collettori lineari in siti ad alta insolazione (2900 kWh/a), come possono essere le zone del deserto del Sahara, i valori obiettivo previsti dall'ENEA con moduli da 400 MWe sono di 2,6 c\$/kWh. I benefici ambientali ottenuti si mostrerebbero notevoli dato che le emissioni di gas serra evitate rispetto ad impianti, di nuova tecnologia, alimentati con fonti fossili sarebbero comprese tra 0,25÷0,69 milioni di tonnellate/anno.

5.2 Solare Termodinamico per la produzione di combustibili eco-compatibili

La fonte solare rappresenta una forma di energia che oltre agli svantaggi di variabilità e intermittenza, associa anche la difficoltà di immagazzinamento (proprietà comune ad altre tipi di fonti di energia rinnovabile¹). Allo scopo di ovviare a ciò, per quanto riguarda la tecnologia solare termodinamica, oltre al sistema di accumulo di calore per mezzo di serbatoi, esiste la possibilità di trasformare l'energia termica della fonte solare in energia chimica per mezzo della produzione di idrogeno, quale vettore energetico in grado di trattenerla. Uno dei punti chiave dell'idrogeno è rappresentato dal fatto che a livello di impatto ambientale, durante la fase di utilizzo, il contributo fornito è praticamente nullo, in quanto la ricombinazione con l'ossigeno produce energia (elettrica/meccanica e termica) ed acqua e al più tracce di NO_x, se le temperature raggiunte sono molto elevate.

Alla già citata compatibilità ambientale, l'idrogeno racchiude in sé altre proprietà, sia positive che negative, quali²:

- elevato contenuto energetico per unità di massa, ma bassa densità, quindi basso contenuto energetico per unità di volume.
- temperature di liquefazione molto vicine allo zero assoluto e quindi difficoltà tecniche ed economiche per mantenerlo allo stato liquido.
- range elevato di infiammabilità (molto maggiore di altri combustibili quali metano, diesel, propano, benzina, ecc.) il che rende particolarmente pericolosa la miscela di H₂-O₂, che in caso di esplosione, per via dell'elevato contenuto energetico, implica una violenta onda d'urto. Però a differenza degli altri combustibili fossili seppur il range di infiammabilità risulti più esteso necessita di una concentrazione superiore per potersi incendiare (a meno del metano) ed inoltre ha una temperatura di autoignizione superiore agli stessi fossili.
- Problemi di infragilimento dei materiali con i quali è a contatto

Esistono molti processi che permettono di ottenere idrogeno, ma quelli più sviluppati, economici ed attualmente applicati nell'industria prevedono l'utilizzo di fonti fossili.

Ciò implica che se l'utilizzo dell'idrogeno fosse esteso a tutti i settori energivori, in particolare a quello dei trasporti, la tecnologia attualmente utilizzata nella fase di produzione permetterebbe sì una diminuzione dell'inquinamento nei luoghi in cui verrebbe impiegato, in particolare all'interno dei centri urbani, ma non risolverebbe il problema a

¹ A meno che indirettamente non vengano considerate le biomasse.

² In "Appendice" sono riportate tutte le proprietà dell'idrogeno

livello globale, dato che in questo modo verrebbe solo traslato a monte della filiera, cioè dove l'idrogeno verrebbe prodotto.

Al momento comunque questa potrebbe essere una fase inevitabile e necessaria per la transizione verso uno sviluppo e un consolidamento delle tecnologie che permettono di ottenere l'idrogeno da fonti di energia alternativa, in contemporanea a quello dei sistemi di stoccaggio, distribuzione ed utilizzazione.

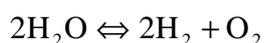
L'impiego del solare termodinamico rappresenta una delle tecniche a disposizione grazie al fatto che molti dei processi di produzione richiedono elevate temperature che possono essere raggiunte per mezzo della fonte solare; quali ad esempio:

- Termolisi dell'acqua.
- Produzione termochimica mediante scissione della molecola d'acqua a temperature inferiori a quelle previste dalla termolisi.
- Trasformazione di energia solare in elettrica e poi applicazione dell'elettrolisi.
- Riscaldamento soluzione acquosa nella elettrolisi attraverso il calore fornito alla quantità d'acqua di processo in modo da ottenere rendimenti superiori.

Di particolare rilievo risultano i primi due, dato che sfruttano esclusivamente la fonte solare, mentre l'elettrolisi, oltre a prevedere molteplici trasformazioni intermedie con inevitabile diminuzione del rendimento del processo, utilizza energia elettrica che può provenire o meno da fonti rinnovabili.

5.2.1 Termolisi della molecola d'acqua

La reazione che viene a realizzarsi è la seguente:



Questo sistema consiste nello scindere i legami della molecola di acqua per mezzo delle alte temperature che possono essere registrate nei dispositivi ricevitori degli impianti solari.

La reazione non può avvenire spontaneamente alle condizioni standard¹ dato che energia libera e entalpia hanno valori fortemente positivi ($\Delta G_{\text{reaz}}^{\circ} = 474,6 \text{ kJ/mol}$, $\Delta H_{\text{reaz}}^{\circ} = 571,6 \text{ kJ/mol}$ considerando i coefficienti stechiometrici riportati nella precedente espressione)

Da dati di letteratura si ha che il processo di dissociazione termica della molecola d'acqua ha l'andamento riportato nella seguente figura¹, in cui i valori sono stati determinati facendo variare la temperatura e la pressione:

¹ cioè alla pressione di 1 atm e considerando la temperatura di riferimento di 298.15 K

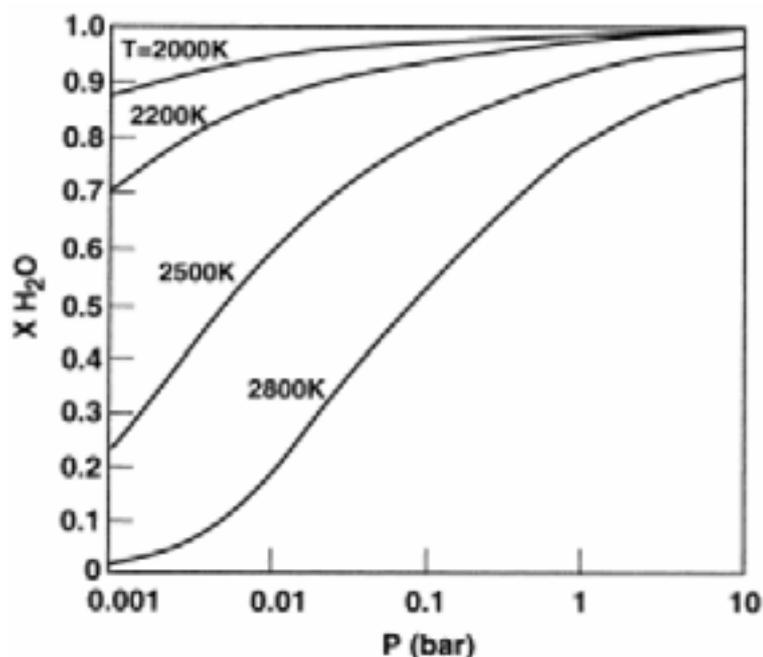


Figura 5-12 *Frazione molare residua dell'acqua a seguito della termolisi al variare di temperatura e pressione*

Ciò che emerge dalla figura è che allo scopo di avere un buon grado di dissociazione, il processo necessita di altissime temperature e inoltre deve avvenire a pressioni al di sotto di quella atmosferica. Da dati sperimentali², il valore del grado di dissociazione dell'acqua è compreso tra il 2 e il 5 %³ per temperature che oscillano tra i 2300 e i 3000K e alla pressione di 1 bar.

Di seguito sono riportati il procedimento adoperato e i calcoli relativi alla determinazione, dapprima delle grandezze termodinamiche che descrivono un processo di termolisi che si realizza alla temperatura di 2300 K e alla pressione di 1 bar, successivamente al calcolo del grado di dissociazione ad esso associato e da questo alla determinazione dell'energia necessaria alla realizzazione del processo, proveniente dalla fonte solare.

Per lo studio del caso in esame considero il circuito termodinamico costituito da un concentratore parabolico con il ricevitore, "fulcro" del processo, collegato ad un sistema di adduzione dell'acqua. I prodotti della reazione successivamente vengono raffreddati, allo scopo di evitare la loro ricombinazione, fino alla temperatura ambiente (298K), per mezzo di un dispositivo denominato "quencher" e poi possono essere riutilizzati ad esempio per la

¹ Da "Produzione di idrogeno con cicli termochimica alimentati da energia solare concentrata", Pietro Tarquini -ENEA

² Fonte APAT.

³ Questo valore tiene conto della presenza di altri prodotti per mezzo di un'analisi estesa a un numero maggiore di reazioni.

produzione di energia elettrica per mezzo di una cella a combustibile o per mezzo di una turbina a gas.

Dati di ingresso:

- temperatura massima $T_{MAX} = 2300 \text{ K}$ (2027°C)
- temperatura minima $T_{MIN} = 298 \text{ K}$ (25°C)
- pressione di esercizio $P = 1 \text{ bar}$



Le grandezze termodinamiche (entalpia, entropia ed energia libera) che partecipano al processo subiscono delle variazioni nel passaggio tra la temperatura ambiente T_{MIN} e la temperatura massima T_{MAX} . Per quanto riguarda la T_{MIN} i valori delle grandezze standard di formazione² sono i seguenti:

Sostanze	H ₂ O	H ₂	O ₂
ΔH_f^0 [kJ/mol]	-241,8	0	0
S_f^0 [J/(mol·K)]	188,83	130,68	205,14

Tabella 5-3 Coefficienti per il calcolo del calore specifico

- Calcolo di $\Delta H_{\text{reaz}}^0(T_{MIN})$ e $\Delta S_{\text{reaz}}^0(T_{MIN})$ per mezzo della legge di Hess:

$$\Delta H_{\text{reaz}}^0 = \sum_i i \cdot \Delta H_{f\text{-prodotti}}^0 - \sum_i i \cdot \Delta H_{f\text{-reagenti}}^0 = 241,82 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta S_{\text{reaz}}^0 = \sum_i i \cdot S_{f\text{-prodotti}}^0 - \sum_i i \cdot S_{f\text{-reagenti}}^0 = 44,42 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$$

- Calcolo di $\Delta H_{\text{reaz}}(T_{MAX})$: la variazione di entalpia ad alta temperatura viene ottenuta applicando la legge di Kirchhoff:

¹ Questa espressione è analoga a quella precedente, ma

² Sono le grandezze entalpia, entropia ed energia libera di Gibbs, valutati per ogni sostanza alla temperatura ambiente di 298K e alla pressione atmosferica. Questi valori sono ripresi dal libro "Fondamenti di chimica generale"- P.Silvestroni e riportati nelle tabelle in Appendice.

$$\Delta H_{\text{reaz}}^0(T_{\text{MAX}}) = \Delta H_{\text{reaz}}^0(T_{\text{MIN}}) + \int_{T_{\text{min}}}^{T_{\text{MAX}}} \Delta c_{p,\text{reaz}} dT,^1$$

$\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}$ (298÷ 2300K) adopero la seguente espressione:

$$c_p(T) = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3,^2$$

Quindi i calori specifici ed il calore specifico medio³ (\bar{c}_p) delle sostanze sono:

Sostanze	a	b	c	d
H ₂ O	32,24	0,1923 · 10 ⁻²	1,055 · 10 ⁻⁵	-3,595 · 10 ⁻⁹
H ₂	29,11	-0,1916 · 10 ⁻²	0,4003 · 10 ⁻⁵	-0,8704 · 10 ⁻⁹
O ₂	25,48	1,520 · 10 ⁻²	-0,7155 · 10 ⁻⁵	1,312 · 10 ⁻⁹

Tabella 5-4 Coefficienti per il calcolo del calore specifico

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{reaz}}^0(T_{\text{MAX}}) &= \Delta H_{\text{reaz}}^0(T_{\text{MIN}}) + \int_{298\text{K}}^{2300\text{K}} \sum_x v_x \cdot c_{p,\text{ix}}(T) dT = \\ &= 241,2 + \int_{298\text{K}}^{2300\text{K}} 1 \cdot c_{p,\text{H}_2}(T) + \frac{1}{2} \cdot c_{p,\text{O}_2}(T) - 1 \cdot c_{p,\text{H}_2\text{O}}(T) dT = 235 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

Per poter determinare l'energia libera è necessario conoscere l'entropia alla temperatura T_{MAX} per mezzo della seguente formula:

$$\begin{aligned} \Delta S_{\text{reaz}}^0(T_{\text{MAX}}) &= \Delta S_{\text{reaz}}^0(T_{\text{MIN}}) + \int_{298\text{K}}^{2300\text{K}} \sum_x v_x \cdot \frac{c_{p,\text{ix}}(T)}{T} dT = \\ &= 44,42 + \int_{298\text{K}}^{2300\text{K}} 1 \cdot \frac{c_{p,\text{H}_2}(T)}{T} + \frac{1}{2} \cdot \frac{c_{p,\text{O}_2}(T)}{T} - 1 \cdot \frac{c_{p,\text{H}_2\text{O}}(T)}{T} dT = 44,43 \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

Quindi :

$$\Delta G_{\text{reaz}}^0(T_{\text{MAX}}) = \Delta H_{\text{reaz}}^0(T_{\text{MAX}}) - T \cdot \Delta S_{\text{reaz}}^0(T_{\text{MAX}}) = 133,7 \text{ kJ/mol}$$

¹ Che rappresenta il valore della capacità termica di reazione, [kJ/(kmol·K)]

² I coefficienti della formula sono stati ripresi da "Termodinamica e trasmissione del calore"-pag.647- Yunus A. Çengel.

³ Dato dalla media aritmetica dei valori alle due temperature.

- Per calcolare il valore del grado di dissociazione α è necessario dapprima determinare la costante di equilibrio K della reazione per mezzo della seguente espressione:

$$K_p = e^{-\frac{\Delta G_{\text{reaz}}}{R \cdot T}} = e^{-\frac{133,7}{(8,314 \cdot 10^{-3} \cdot 2300)}} = 9,19 \cdot 10^{-4}$$

$$K_p = \frac{\prod p_{\text{prodotti}}}{\prod p_{\text{reagenti}}} = \frac{p_{\text{H}_2} \cdot p_{\text{O}_2}^{1/2}}{p_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Considerando che all'equilibrio sono presenti:

$$\begin{array}{ll} 1-\alpha & \text{moli di H}_2\text{O} \\ \alpha & \text{moli di H}_2 \\ \frac{1}{2}\alpha & \text{moli di O}_2 \end{array}$$

pari a $(1 + \frac{1}{2}\alpha)$ moli di sostanze e dall'espressione relativa alle varie pressioni parziali:

$$p_{\text{H}_2} = P \cdot \frac{\alpha}{1 + \frac{1}{2}\alpha}; \quad p_{\text{O}_2} = \left(P \cdot \frac{\frac{1}{2}\alpha}{1 + \frac{1}{2}\alpha} \right)^{1/2}; \quad p_{\text{H}_2\text{O}} = P \cdot \frac{(1-\alpha)}{1 + \frac{1}{2}\alpha}$$

si otterrà:

$$K_p = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot P^{1/2} \cdot \alpha^{3/2}}{\left(1 + \frac{1}{2}\alpha\right)^{1/2} \cdot (1-\alpha)} \Rightarrow \alpha = 1,2 \% ^1$$

- Adesso con tale valore è possibile risalire sia all'energia dispersa dai prodotti nel quencher, sia all'energia solare trasferita al ricevitore per mezzo del concentratore. Le ipotesi per il calcolo sono quelle di considerare un impianto avente un fattore di concentrazione $C^2 = 5000$ con un irraggiamento di $I = 1000 \text{ W/m}^2$ e le perdite dovute esclusivamente ad irraggiamento da parte del ricevitore, date le elevate temperature raggiunte.

$$\alpha = 1,2\%: 100 \text{ moli H}_2\text{O} \Rightarrow 1,2 \text{ mole di H}_2 \text{ e } 0,6 \text{ di O}_2$$

Dai prodotti della scissione si ha che il massimo lavoro estraibile (W_{MAX}) alla temperatura ambiente è uguale al potere calorifico inferiore dell'idrogeno:

¹ In Appendice sono riportati i valori del grado di dissociazione ottenuti al variare di temperatura e pressione.

² Rapporto tra le superfici degli specchi del concentratore e del ricevitore.

$$W_{MAX} = 118500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 118500 \cdot \frac{2}{1000} = 237 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} (\equiv \Delta G_{\text{reaz}}^{\circ}) \Rightarrow 284,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Il calore estratto dai prodotti invece è di:

$$Q_{\text{quenc}} = -1,2 \cdot \int_{298\text{K}}^{2300\text{K}} 1 \cdot c_{p,\text{H}_2}(T) + \frac{1}{2} \cdot c_{p,\text{O}_2}(T) dT = -117,2 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Nel ricevitore l'energia trasmessa all' H₂O per passare da 298 a 2300 K è pari a¹:

$$Q_{\text{ricevitore}} = \Delta H_{\text{evap}}^{\circ}(T_{\text{MIN}}) + \int_{298\text{K}}^{2300\text{K}} c_{p,\text{H}_2\text{O}}(T) dT = 131,1 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \Rightarrow \text{per 100 moli} = 13110 \text{ kJ}$$

Tenendo conto delle perdite per irraggiamento per mezzo del rendimento di trasmissione

$$\eta = \frac{Q_{\text{Solare}} - Q_{\text{irr}}}{Q_{\text{Solare}}} = 1 - \frac{Q_{\text{irr}}}{Q_{\text{Solare}}} = 1 - \frac{\sigma \cdot T^4}{C \cdot I} = 1 - \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 2300^4}{5000 \cdot 1000} = 68 \%$$

L'energia trasmessa dal concentratore è

$$Q_{\text{Solare}} = \frac{Q_{\text{ricevitore}}}{\eta} = \frac{13110}{0,68} = 19279 \text{ kJ} = 5,35 \text{ kWh}$$

Questa tipologia di impianti presenta un layout impiantistico molto semplice in quanto necessita di un sistema di adduzione dell'acqua collegato al dispositivo ricevitore in cui vengono raggiunte le elevate temperature richieste (i valori al di sopra dei 2000 °C sono raggiungibili dai sistemi di tipo solar tower² e parabolic dish). Ma proprio le elevate temperature, con le quali è possibile ottenere un maggiore grado di dissociazione, influiscono pesantemente sul rendimento del processo per via delle perdite per irraggiamento (proporzionale a T, espressa in K, elevata alla quarta potenza) al quale è sottoposto il dispositivo ricevitore-reattore.³

5.2.2 Processi Termochimici

Allo scopo di limitare le temperature di esercizio possono essere applicati processi di produzione che prevedono l'impiego di opportune sostanze che permettono attraverso trasformazioni intermedie di giungere comunque alla scissione della molecola d'acqua.

I criteri che vengono seguiti per la scelta dei vari metodi di produzione sono:

¹ Da Perry's Chemical Engineer Handbook entalpia di evaporazione dell'acqua a 298 K = 2442,5 kJ/kg = 43,97 kJ/mol.

² Nell'impianto solar tower in Israele sono stati raggiunti 3000K (da : energylan.saudia.gov e ucdavis.edu/solar2)

³ In "Appendice" sono riportati i valori delle grandezze termodinamiche riferite ad un possibile impianto di termolisi dell'acqua per mezzo di un impianto solare termodinamico.

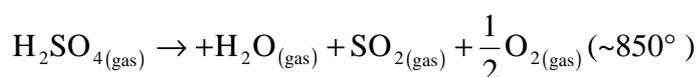
- Ricerca della maggiore efficienza possibile nella trasformazione del calore solare e la quantità di idrogeno prodotto, associato al numero di reazioni intermedie necessarie e alla semplicità del processo e al basso costo delle sostanze adoperate.
- Temperature alle quali hanno luogo le reazioni, legato alla resistenza dei materiali sia per le temperature raggiunte che per le sostanze con caratteristiche corrosive si possono presentare.

Al momento i processi che sono particolarmente seguiti sono:

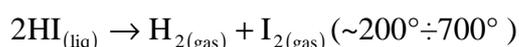
- Ciclo Iodio-Zolfo in cui le reazioni che avvengono sono le seguenti:



In cui si formano gli acidi solforico e iodidrico con produzione di calore e che avviene a bassa temperatura. Successivamente viene inviato l'acido solforico al ricevitore del sistema solare nel quale avviene la reazione endotermica per ottenere vapore acqueo, ossigeno e anidride solforosa che viene riciclata nella fase precedente :

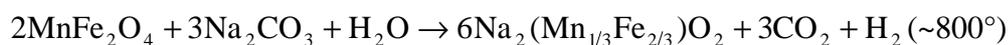


L'acido iodidrico proveniente dalla prima reazione viene separato per mezzo di una reazione¹ endotermica in iodio, che viene successivamente raffreddato e riutilizzato per la produzione degli acidi, e idrogeno:



Questo ciclo rappresenta al momento quello che pare essere più promettente dati i risultati registrati nelle fasi sperimentali con rendimenti del 50%² permette di produrre idrogeno in quantità considerevoli e con continuità.

- Ciclo ferriti miste: questo ciclo si basa essenzialmente su due reazioni, dove la prima prevede la produzione di idrogeno, ferromanganite e anidride carbonica a seguito della reazione di ferrite di manganese, carbonato di sodio e acqua ad una temperatura non molto elevata per un sistema solare:



¹ in cui prendono parte catalizzatori, cioè sostanze che permettono di aumentare la velocità della reazione senza però alterarne le caratteristiche chimiche.

² Dato ripreso da "Produzione di idrogeno con cicli termochimici alimentati da energia solare concentrata"

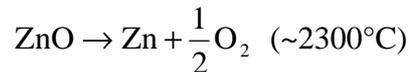
L'anidride carbonica assieme alla ferromanganite raffreddandosi e sottoposti ad una differente pressione permettono di ottenere oltre agli elementi reagenti adoperati nella prima reazione, anche ossigeno.



Il vantaggio maggiore di questo sistema sta nel fatto che la scissione della molecola d'acqua avvenendo su due reazioni distinte permette di evitare la separazione dei due elementi come risultati di una stessa reazione, il che permette oltre ad agevolare tale operazione, anche di evitare la situazione pericolosa data dalla contemporanea presenza della miscela $\text{H}_2\text{-O}_2$. In alternativa alla ferrite di manganese e al carbonato di sodio può essere adoperato il nickel ferrite

- Ciclo ZnO-Zn: Questa reazione si basa sulla separazione della molecola di ossido zinco in zinco e ossigeno mediante l'apporto di energia dalla fonte solare. La reazione è altamente endotermica e la temperatura alla quale si svolge si aggira sui 2000°C .

Lo zinco così ottenuto, a contatto con acqua, si comporta da acido ed avendo una elettronegatività superiore e comporta la formazione di ossido di zinco con lo sviluppo di idrogeno:



Come per la reazione di termolisi, il principale problema è rappresentato dalle alte temperature alle quali si verifica la prima reazione e quindi ai materiali con il quale realizzare il dispositivo ricevitore.

5.2.3 Sistema SOLAREC

Una soluzione che potrebbe portare benefici alla situazione attuale delle emissioni di gas serra riguarda l'applicazione della fonte solare ad alta temperatura per lo shift della molecola di CO_2 . Questa tecnica è stata brevettata, a seguito della costruzione del primo impianto funzionante, negli studi di ricerca di Los Alamos (New Mexico) ed è indicata per essere applicata a termine delle attività industriali, ed in particolare quelle relative al

settore energetico, come le centrali termoelettriche alimentate da fonti tradizionali¹. La tecnologia, chiamata SOLAREC², consiste nell'inviare un flusso di anidride carbonica ad un particolare ricevitore (riportato nella seguente figura) in cui il gas viene sottoposto ad una separazione per effetto termico.

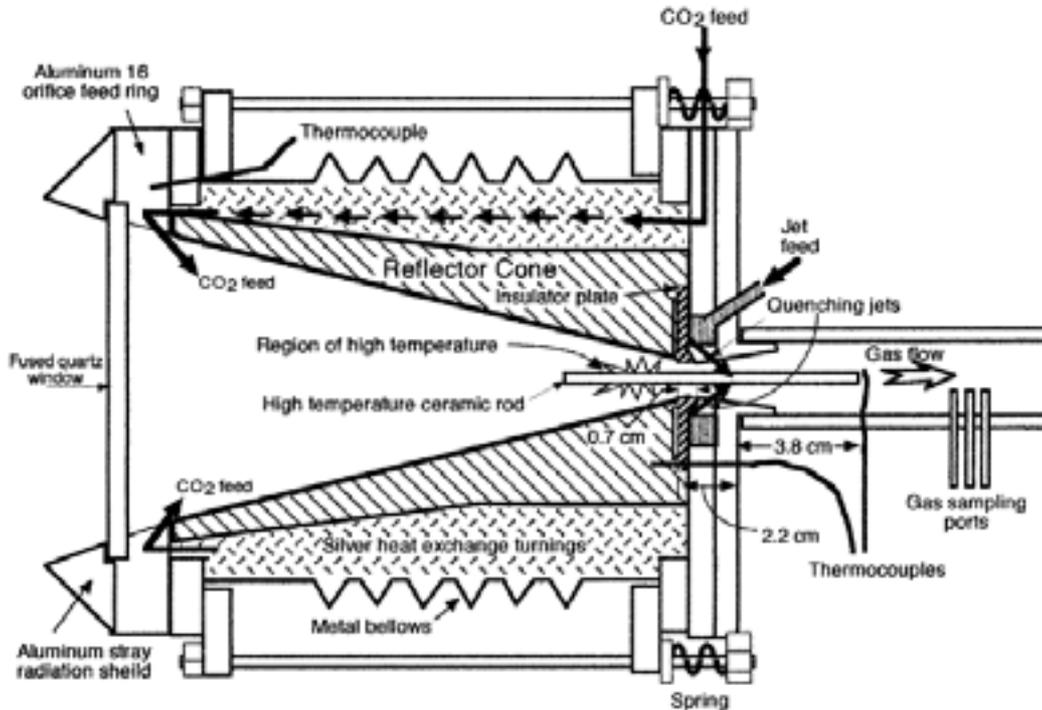
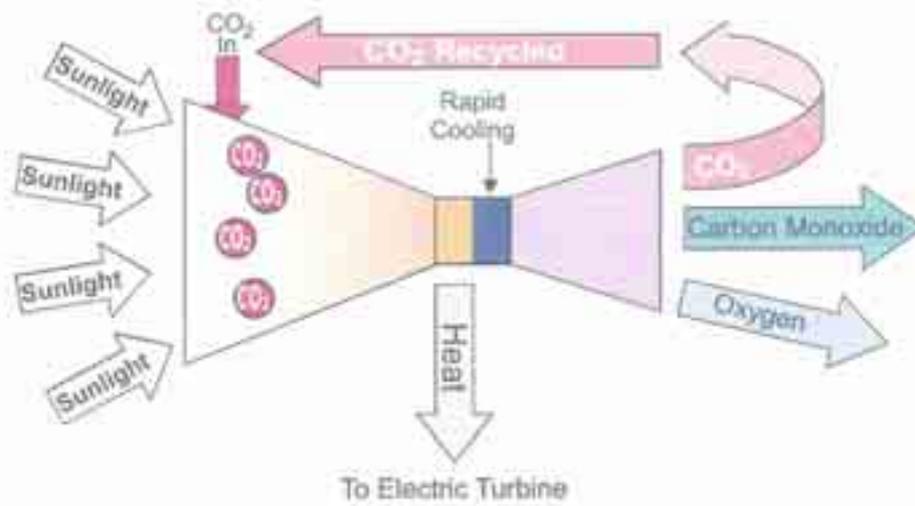


Figura 5-13 Sezione del ricevitore del sistema SOLAREC



¹Sempre che la centrale in questione sia posizionata in un'area in cui esistono le condizioni di irraggiamento necessario al funzionamento dell'impianto solare.

² Acronimo di Solar Reduction of Carbon

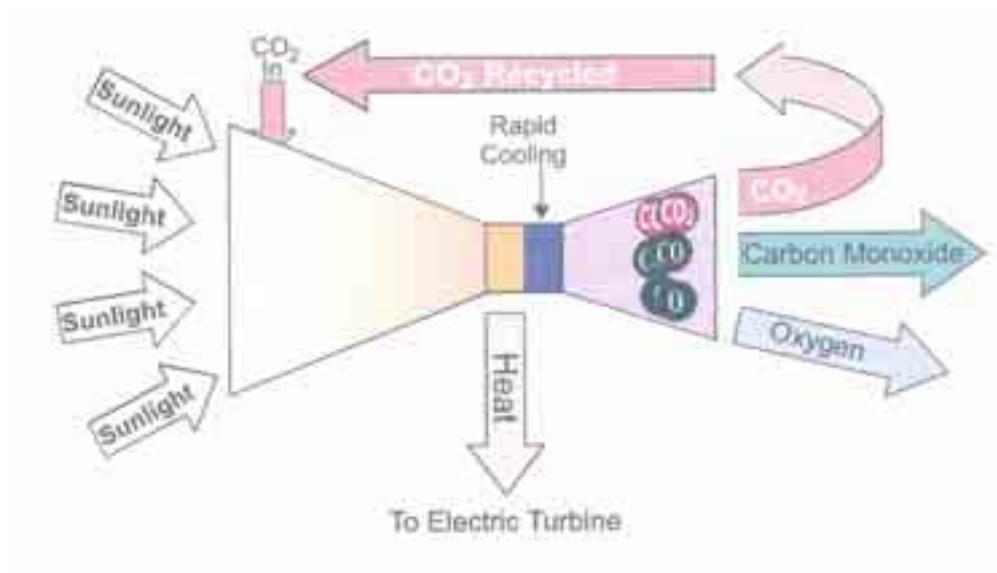
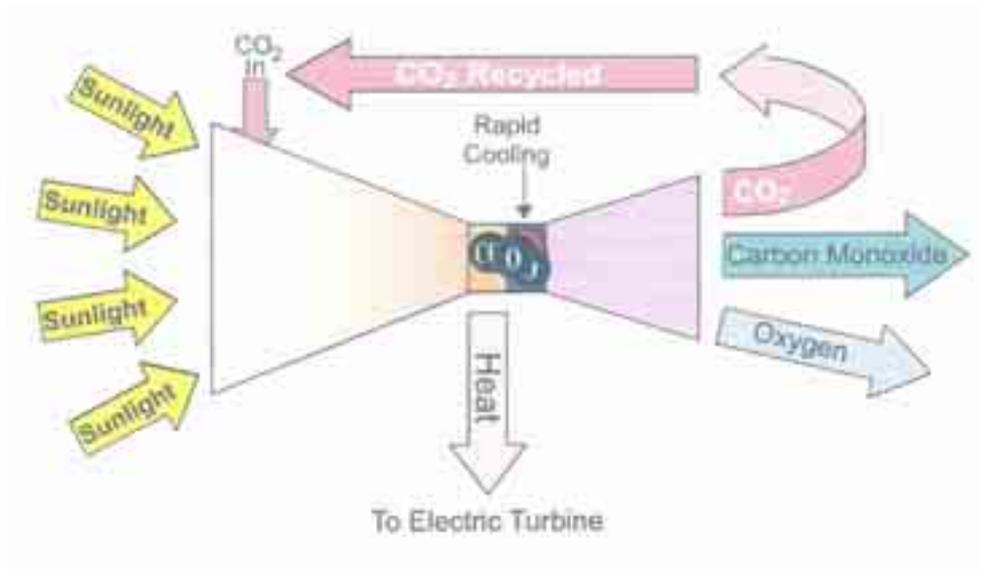


Figura 5-14 Fasi di funzionamento del ciclo di termolisi della CO₂

Procedendo in maniera analoga a quanto già fatto per l'analisi della termolisi dell' H₂O, è possibile mettere a confronto i due processi (senza però tenere conto della dinamica con cui evolvono).



Per quanto riguarda la T_{MIN} i valori delle grandezze standard di formazione sono i seguenti:

Sostanze	CO ₂	CO	O ₂
ΔH_f^0 [kJ/(mol)]	-393,5	-110,5	0

S_f^0	213,8	197,7	205,2
[J/(mol·K)]			

Tabella 5-5 Entalpia ed entropia molare standard di formazione

Applicando la legge di Hess:

$$\Delta H_{\text{reaz}}^0 = \sum_i i \cdot \Delta H_{f-\text{prodotti}}^0 - \sum_i i \cdot \Delta H_{f-\text{reagenti}}^0 = 283 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta S_{\text{reaz}}^0 = \sum_i i \cdot S_{f-\text{prodotti}}^0 - \sum_i i \cdot S_{f-\text{reagenti}}^0 = 86,5 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$$

Da cui posso ricavarmi i valori di ΔG_f^0 attraverso l'espressione dell'energia libera di Gibbs¹(alla temperatura di 298,15 K):

$$\Delta G_{\text{reaz}}^0 = \Delta H_{\text{reaz}}^0 - T \cdot \Delta S_{\text{reaz}}^0 = 257,2 \text{ kJ/mol}$$

- Calcolo di $\Delta H_{\text{reaz}}(T_{\text{MAX}})$: applicando la legge di Kirchhoff:

$$\Delta H_{\text{reaz}}(T_{\text{MAX}}) = \Delta H_{\text{reaz}}^0(T_{\text{MIN}}) + \int_{T_{\text{MIN}}}^{T_{\text{MAX}}} \Delta c_{p,\text{reaz}} dT, ^2$$

$$c_p(T) = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3, ^3$$

Sostanze	a	b	c	d
CO ₂	22,26	$5,981 \cdot 10^{-2}$	$-3,501 \cdot 10^{-5}$	$7,469 \cdot 10^{-9}$
CO	28,16	$0,1675 \cdot 10^{-2}$	$0,5372 \cdot 10^{-5}$	$-2,222 \cdot 10^{-9}$
O ₂	25,48	$1,520 \cdot 10^{-2}$	$-0,7155 \cdot 10^{-5}$	$1,312 \cdot 10^{-9}$

Tabella 5-6 Coefficienti per il calcolo dei calori specifici

Quindi i calori specifici ed il calore specifico medio⁴ (\bar{c}_p) delle sostanze sono:

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{reaz}}^0(T_{\text{MAX}}) &= \Delta H_{\text{reaz}}^0(T_{\text{MIN}}) + \int_{298\text{K}}^{2300\text{K}} \sum_x v_x \cdot c_{p,ix}(T) dT = \\ &= 283 + \int_{298\text{K}}^{2300\text{K}} 1 \cdot c_{p,\text{CO}}(T) + \frac{1}{2} \cdot c_{p,\text{O}_2}(T) - 1 \cdot c_{p,\text{CO}_2}(T) dT = 274,7 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

¹ E' possibile giungere agli stessi risultati applicando la legge di Hess ai valori dell'energia libera di formazione presenti nella tabella in Appendice.

² Che rappresenta il valore della capacità termica di reazione, [kJ/(kmol·K)]

³ I coefficienti della formula sono stati ripresi da "Termodinamica e trasmissione del calore"-pag.647- Yunus A. Çengel.

⁴ Dato dalla media aritmetica dei valori alle due temperature.

Per poter determinare l'energia libera è necessario conoscere l'entropia alla temperatura T_{MAX} per mezzo della seguente formula:

$$\begin{aligned} \Delta S_{\text{reaz}}^0(T_{MAX}) &= \Delta S_{\text{reaz}}^0(T_{MIN}) + \int_{298K}^{2300K} \sum_x v_x \cdot \frac{c_{p,ix}(T)}{T} dT = \\ &= 86,5 + \int_{298K}^{2300K} 1 \cdot \frac{c_{p,CO}(T)}{T} + \frac{1}{2} \cdot \frac{c_{p,O_2}(T)}{T} - 1 \cdot \frac{c_{p,CO_2}(T)}{T} dT = 82,6 \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

Quindi :

$$\Delta G_{\text{reaz}}^0(T_{MAX}) = \Delta H_{\text{reaz}}^0(T_{MAX}) - T \cdot \Delta S_{\text{reaz}}^0(T_{MAX}) = 84,7 \text{ kJ/mol}$$

- Determinazione della costante di equilibrio K_p della reazione attraverso la relazione:

$$K_p = e^{-\Delta G_{\text{reaz}}^0 / R \cdot T} = 1,19 \cdot 10^{-2}$$

Quindi come già visto precedentemente:

$$K_p = \frac{\prod p_{\text{prodotti}}}{\prod p_{\text{reagenti}}} = \frac{p_{CO}^2 \cdot p_{O_2}}{p_{CO_2}^2}$$

Considerando che all'equilibrio sono presenti:

$1-\alpha$	moli di CO_2
α	moli di CO
$\frac{1}{2} \alpha$	moli di O_2

pari a $(1 + \frac{1}{2} \alpha)$ moli di sostanze e che dall'espressione relativa alle varie pressioni

parziali:

$$p_{H_2} = P \cdot \frac{\alpha}{1 + \frac{1}{2} \alpha}; \quad p_{O_2} = \left(P \cdot \frac{\frac{1}{2} \alpha}{1 + \frac{1}{2} \alpha} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad p_{H_2O} = P \cdot \frac{(1-\alpha)}{1 + \frac{1}{2} \alpha}$$

si otterrà:

$$K_p = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot P^{\frac{1}{2}} \cdot \alpha^{\frac{3}{2}}}{\left(1 + \frac{1}{2} \alpha\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (1-\alpha)} \Rightarrow \alpha = 6,36\% \text{ (molto superiore a quello dell'acqua)}$$

Mediante la relazione:

$$\ln\left(\frac{K_p^T}{K_p}\right) = \frac{\Delta H_{\text{reaz.}}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T^T}\right)$$

Sono stati determinati i valori della costante di equilibrio a varie temperature sia per la CO₂ che per H₂O, nell'ipotesi di considerare costanti le relative entalpie di reazione.

CO₂:

K _p ^T		1,38·10 ⁻³	6,19·10 ⁻³	3,76·10 ⁻²	1,55·10 ⁻¹	3,40·10 ⁻¹
T ^T	°C	1727	1927	2227	2527	3000
	K	2000	2200	2500	2800	3273

Tabella 5-7 *Variazione della costante di equilibrio in funzione della temperatura*

H₂O:

K_p^T		$1,45 \cdot 10^{-4}$	$5,26 \cdot 10^{-4}$	$2,46 \cdot 10^{-3}$	$8,25 \cdot 10^{-3}$	$1,62 \cdot 10^{-2}$
T^T	°C	1727	1927	2227	2527	3000
	K	2000	2200	2500	2800	3273

Tabella 5-8 *Variazione della costante di equilibrio in funzione della temperatura*

- Da ciò è possibile risalire al grado di dissociazione α , sia al variare della temperatura che della pressione, attraverso l'espressione della costante di equilibrio in cui compaiono le pressioni parziali delle varie sostanze che partecipano alla reazione, ottenendo i seguenti risultati:

CO₂:

T		P [atm]				
K	°C	0,001	0,01	0,1	1	10
2000	1727	18,30%	8,99%	4,28%	2,01%	0,94%
2200	1927	41,56%	22,64%	11,31%	5,43%	2,56%
2500	2227	77,45%	55,24%	32,64%	17,01%	8,32%
2800	2527	93,06%	81,62%	60,99%	37,55%	20,03%
3273	3000	96,70%	90,45%	76,11%	53,52%	31,27%

Tabella 5-9 *Grado di dissociazione della molecola di CO₂ in funzione della temperatura e della pressione*

H₂O:

T		P [atm]				
K	°C	0,001	0,01	0,1	1	10
2000	1727	3,42%	1,60%	0,75%	0,35%	0,16%
2200	1927	7,87%	3,74%	1,75%	0,82%	0,38%
2500	2227	20,37%	10,09%	4,82%	2,27%	1,06%
2800	2527	39,19%	21,08%	10,47%	5,01%	2,36%
3273	3000	52,84%	30,74%	15,89%	7,74%	3,67%

Tabella 5-10 *Grado di dissociazione della molecola di H₂O in funzione della temperatura e della pressione*

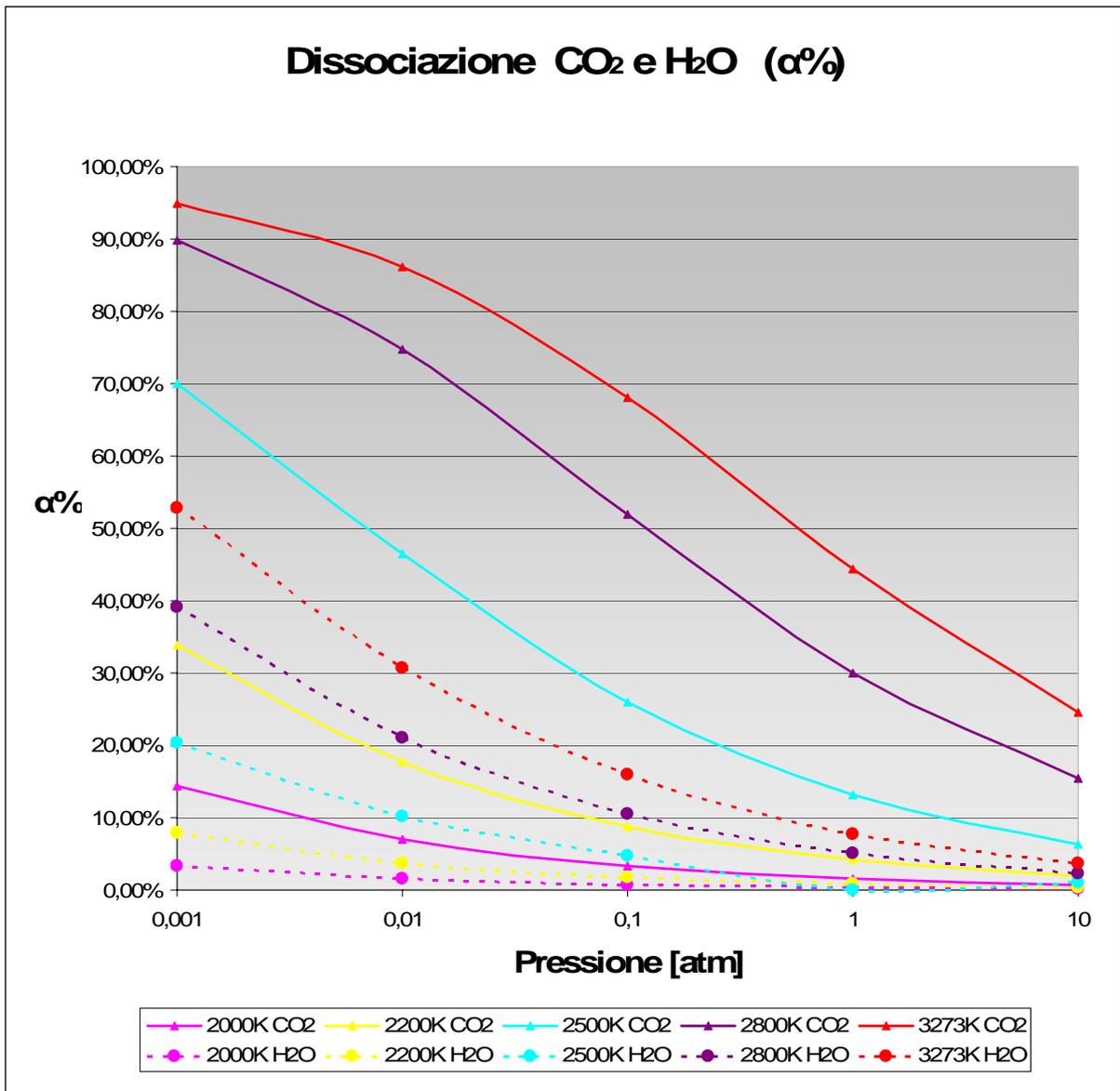
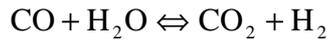


Figura 5-15 Grado di dissociazione della molecola di CO₂ in funzione della temperatura e della pressione

Come per gli altri cicli, anche in questo caso, a seguito della separazione, i prodotti vengono sottoposti ad un rapido raffreddamento¹. A questo punto i prodotti possono essere adoperati per più applicazioni. Il monossido di carbonio può essere utilizzato per la produzione di idrogeno o altro combustibile eco-compatibile attraverso ad esempio il processo di water-shift-gas-reaction (WSGR).

Questo processo consiste nel far reagire in un ambiente catalitico il monossido di carbonio con acqua in fase di vapore allo scopo si ottenere idrogeno e anidride carbonica, che successivamente verrebbe riciclata per essere riutilizzata nella fase iniziale, come riassunto nella seguente espressione:

¹ Nel caso di grandi quantità di prodotti (elevate temperatura e bassa pressione) il fluido con cui avviene lo scambio potrebbe essere usato per produrre energia a seguito di una espansione in turbina.



La reazione è caratterizzata da un valore di entalpia favorevole dato che risulta esotermica¹:

Sostanze	CO	H ₂ O	O ₂	CO ₂
ΔH_f^0 [kJ/(mol)]	-110,5	-242,0	0	-393,6

Tabella 5-11 Entalpia molare standard di formazione della reazione di Water Shift Gas

Con:

$$\Delta H_{\text{reaz}}^0 = \sum_i i \cdot \Delta H_{f-\text{prodotti}}^0 - \sum_i i \cdot \Delta H_{f-\text{reagenti}}^0 = -41,1 \text{ kJ/mol}$$

5.2.4 Solare termodinamico e elettrolisi dell'acqua

Il processo di elettrolisi consiste nel far scorrere una corrente elettrica continua in un recipiente che contiene una soluzione elettrolitica acquosa.

Nell'elettrolita sono immersi due elettrodi (anodo, relativo al polo positivo, e catodo, al polo negativo) collegati ad un generatore. Al passaggio della corrente elettrica, gli ioni presenti nell'elettrolita creano due flussi: quelli di carica negativa si dirigono verso l'anodo, mentre quelli di carica positiva verso il catodo. Giunti a contatto con i rispettivi elettrodi gli ioni cedono (se negativi) o acquistano (se positivi) l'elettrone e formano specie neutre

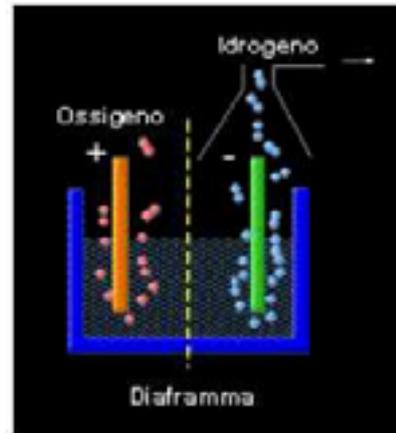


Figura 5-16 Schema elettrolisi

sottoforma di gas. L'applicazione del solare termodinamico consente di produrre energia elettrica necessaria alla realizzazione del processo, inoltre permette di riscaldare l'elettrolita incrementando l'efficienza della trasformazione (termoelettrolisi)². E' possibile

¹La presenza dei catalizzatori necessita però che la reazione avvenga a temperature intorno ai 400 °C e non a temperatura ambiente in quanto altrimenti non si attiverebbero e la produzione di idrogeno risulterebbe molto lenta. Quindi alla temperatura suddetta la reazione è leggermente endotermica. Inoltre anche in questo caso occorre tenere presente che la reazione non si realizza al 100%, e quindi al termine è possibile ottenere solo poche unità percentuali di idrogeno.

²A 1000°C per ottenere un m³ di idrogeno sono necessari 2,4 kWh contro i 3,7 kWh ottenuti a temperatura ambiente.

fare un confronto tra i costi della produzione di idrogeno sostenuti a seconda della metodologia applicata¹:

Fonte	Tecnologia di produzione	T (K)	P (MPa)	η (%)	Costi (\$/GJ)	Eventuali sviluppi tecnologici	Note
<i>Metano</i>	Steam Methane Reforming (SMR)	1050	2.5	65	6.5 ⁽¹⁾	SER, Sorbtion Enhanced Reforming	Purezza H ₂ =99.95%
<i>Carbone/Combustibili fossili</i>	Gassificazione	750-1500	0.1	40	13 ⁽²⁾		
<i>Energia elettrica/Solare</i>	Elettrolisi	300	0.1	50	22.53 ⁽³⁾	Elettrolisi con vapore ad alta temperatura (900-1000°C). Centrali fotovoltaiche ad idrogeno	Purezza H ₂ =99.99%
	Termolisi	300	0.1	-	-		
	Cicli termochimici	300	0.1	-	-		
	Fotolisi	300	0.1	-	-		
	Fotoelettrolisi	300	0.1	-	-		
<i>Masse biologiche (alghe, batteri)</i>	Tecnologie fotobiologiche	300	0.1	5	-		
<i>Biomasse (legno,grassi,rifiuti agricoli)</i>	Gassificazione				10.85 ⁽⁴⁾	Pirelisi + Steam Reforming dell'olio	
<i>Idrocarburi</i>	Ossidazione parziale non catalitica	1500-1700	0.1	-	9 ⁽⁵⁾		
<i>Benzine/Metanolo</i>	Reforming autotermico (ATR)	550-1200	0.1	-	-		
<i>Boroidruro di sodio</i>	Idratazione catalitica	300	0.1	-	-		Tecnologia innovativa

- (1) Taglia impianto: 1-25 Mm³/d (SAPIO S.p.A.)
 (2) Taglia impianto: 2.5-6.5 Mm³/d (SAPIO S.p.A.)
 (3) Taglia impianto: 2.8-6.7 Mm³/d (SAPIO S.p.A.)
 (4) Taglia impianto: 0.7-2.26 Mm³/d (SAPIO S.p.A.)
 (5) Taglia impianto: 1.34-2.8 Mm³/d (SAPIO S.p.A.)

Tabella 5-12 Dati di esercizio delle più comuni tecniche di produzione di idrogeno

5.3 Immagazzinamento e Trasporto dell'idrogeno.

A seguito della fase di produzione dell'idrogeno esistono altri aspetti molto importanti che influenzano notevolmente la filiera dell'idrogeno, quali:

- Immagazzinamento e trasporto
- Utilizzo

Per ciò che riguarda l'immagazzinamento e il trasporto esistono varie soluzioni tecniche che devono tenere conto delle problematiche legate alle caratteristiche e proprietà dell'idrogeno, già precedentemente illustrate.

¹ "Produzione di idrogeno da fonti rinnovabili"-CNR

Le soluzioni per quanto riguarda l'immagazzinamento sono:

- Liquefazione a bassa temperatura e a bassa pressione. La temperatura alla quale l'idrogeno viene mantenuto liquido è di -253°C e rappresenta il problema fondamentale che caratterizza questa soluzione dato che occorre che l'isolamento termico del serbatoio deve evitare passaggi di calore pena l'evaporazione e la fuga. Inoltre l'operazione implica costi enormi dato che richiede una spesa energetica stimabile al 40% del contenuto energetico.
- Compressione in bombole. Questa soluzione comporta svantaggi dovuti al fatto che le quantità di idrogeno stipato a pressioni elevate (centinaia di bar) implica l'utilizzo di bombole ad alta resistenza con un peso che è circa 100 volte superiore alla quantità di fluido immagazzinata, con i conseguenti problemi logistici connessi.

Soluzioni di questo genere permettono la possibilità di sfruttare i sistemi di distribuzione classici e già adoperati per i combustibili fossili; esistono inoltre altre possibilità, quali:

- Adsorbimento in materiali porosi a bassa temperatura. Consiste nel far depositare le molecole di idrogeno su di una superficie di grafite a bassa temperatura.
- Mediante legami con metalli allo stato solido. La molecola di idrogeno a seguito di un aumento della pressione dapprima si scinde e successivamente si diffonde sul reticolo cristallino del metallo fornendo calore (idrogenizzazione). Per la successiva fase di deidrogenizzazione è richiesta una diminuzione della pressione.

Per ciò che riguarda l'operazione di trasporto, le soluzioni che attualmente vengono applicate presso le reti esistenti sono simili a quelle già adoperate per il gas naturale (trasporto in fase gassosa) ed anche per la fase liquida è possibile immaginare sistemi analoghi a quelli già applicati a bordo delle metaniere o dei camion.

5.4 Utilizzo

L'uso finale a cui destinare l'idrogeno, nell'ambito di una pianificazione urbana, è

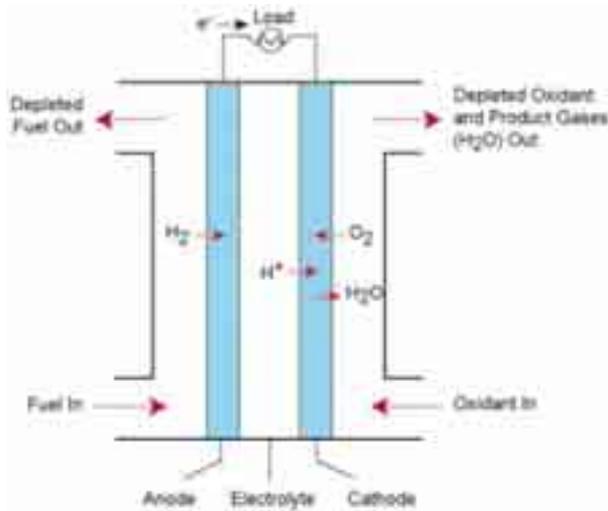


Figura 5-17 Schema cella a combustibile

è rappresentato dalla possibile estrazione dell'energia chimica in esso contenuta o per mezzo della combustione in motori a combustione esterna o interna o per mezzo di dispositivi che permettono di ottenere direttamente energia elettrica detti celle a combustibile. Quest'ultima rappresenta la soluzione più promettente in quanto offre maggiori rendimenti. Come esemplificato nella figura a fianco, la reazione che avviene è l'inverso di quanto già visto con l'elettrolisi: combustibile e' un generatore

elettrochimico in cui, in linea di principio, entrano un combustibile (tipicamente idrogeno) e un ossidante (ossigeno o aria) e da cui si ricavano corrente elettrica continua, acqua e calore. Il combustibile (idrogeno) e i gas ossidanti (ossigeno proveniente o da processi di separazione visti in precedenza o dato semplicemente dall'aria) vanno in contatto rispettivamente con l'anodo e il catodo (sulle facce opposte a quelle in contatto con l'elettrolita) realizzandone l'ossidazione e la riduzione. Come combustibile possono essere usati, oltre all'idrogeno, anche il metano e il metanolo; da questi naturalmente l'idrogeno deve essere estratto con un particolare procedimento di reforming e pulizia del gas di sintesi ottenuto. L'efficienza delle celle a combustibile è elevata dato che possono essere raggiunti valori compresi tra il 40 e 80% senza che ciò sia influenzato dal carico ed inoltre permettono di effettuare co-generazione sfruttando il calore sottoforma di acqua calda o vapore a diverse temperature¹. Altro vantaggio è rappresentato da un ridottissimo impatto ambientale come di mostra il seguente grafico²:

¹ In base alla cella adoperata

² Da "Celle a combustibile. Stato di sviluppo e prospettive della tecnologia"-ENEA,2002

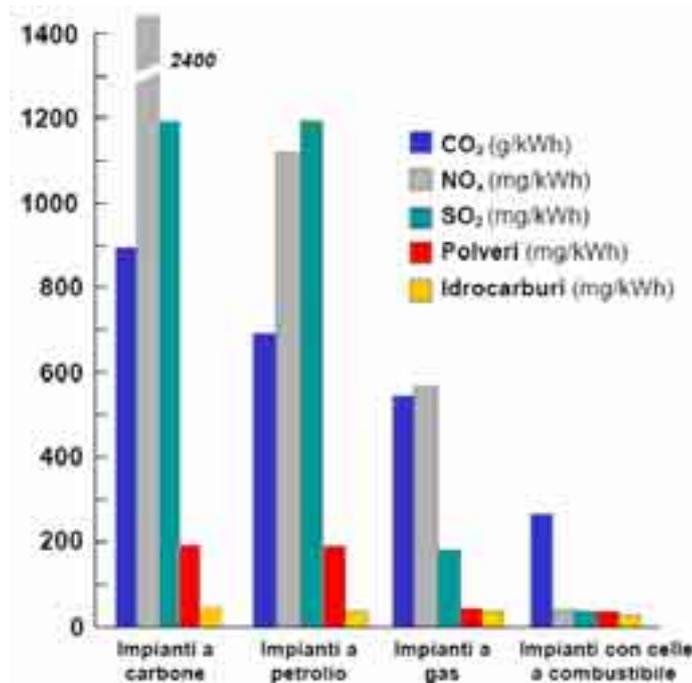


Figura 5-18 Confronto tra le emissioni di impianti tradizionali e impianti a celle combustibili (2002). Fonte ENEA.

Le tipologie di celle a combustibile attualmente esistenti sono¹:

- PEM (Proton Membrane Exchange). Sono di due tipi: SPCM (Solar Polymer Solid Membrane) e PEFC (Proton Exchange Fuel Cell). Queste tipo di celle sono caratterizzate da una bassa temperatura di funzionamento e permettono di variare il loro rendimento in base alle esigenze. I problemi però connessi a questa tipologia sono dovuti sia alla necessità di fornire come combustibile idrogeno puro per non avvelenare il catalizzatore e quindi compromettere il buon funzionamento, sia al fatto che sono di difficile gestione per via della velocità di evaporazione dell'acqua. Le celle in questione sono adatte per la produzione di energia elettrica dalle piccole utenze fino alle grandi ed inoltre per essere impiegate nei sistemi di trasporto.
- AFC (Alkaline Fuel Cell): sono caratterizzate da un elettrolita composto da idrossido di potassio. Hanno un elevato rendimento e una temperatura di funzionamento molto bassa (100°-60°). Come il modello precedente, devono essere alimentate da combustibile e comburente puro (H e O).
- PAFC (Phosphoric Acid FC): Hanno come elettrolita l'acido fosforico. Queste celle pur avendo problemi dovuti alla corrosione degli elettrodi, hanno una temperatura di esercizio compresa tra i 180 e i 200°C che permette quindi oltre alla produzione di energia elettrica anche quella di calore per la bi o tri-generazione (esistono già

¹ Da "L'idrogeno come vettore energetico: la ricerca in Australia"-Ambasciata d'Italia.

molte applicazioni al mondo nel settore civile per grandi utenze quali, ospedali, scuole ecc..)

- SOFC (Solid Oxide Fuel Cell): sono tra la tipologia più semplice ed efficiente dato che ammettono impurità del combustibile consentendo di adoperare idrocarburi (anche idrogeno e monossido di carbonio oltre al metano). I problemi connessi a questo tipo di celle sono dovuti alle dimensioni notevoli e al fatto che hanno un tempo di start-up considerevole.
- MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell): sono caratterizzate dalla possibilità di adoperare un qualsiasi combustibile (anche carbone). Lavorano ad elevata temperatura ed hanno un rendimento del 60%.
- DMFC (Directive Methanol Fuel Cell): Sono le celle a combustibili di ultima generazione e quindi in via di sviluppo. Hanno rendimenti che variano con la temperatura (che di solito è compresa tra i 60 e i 90°). Impiegano come combustibile metanolo che può essere adoperato direttamente senza che sia necessario il reforming e vengono applicate essenzialmente per alimentare strumentazioni portatili.

Le taglie e le destinazioni d'uso delle varie tipologie di celle sono riportate nella seguente tabella¹:

	POTENZA	TIPO DI CELLA
Applicazioni isolate	0,5-10 kW	PEFC, SOFC
Potenza residenziale	1-10 kW	PEFC, SOFC
Cogenerazione commerciale e residenziale	50-250 kW	PEFC, PAFC
Cogenerazione industriale	200 kW-2 MW	MCFC, SOFC
Potenza distribuita	2-20 MW	PAFC, MCFC, SOFC
Generazione centralizzata	< 50 MW	MCFC, SOFC
Trasporto	5-200 kW	PEFC, SOFC

Tabella 5-13 Destinazione d'uso e potenza nominale delle varie tipologie di celle.

¹ Da "Celle a combustibile. Stato di sviluppo e prospettive della tecnologia"-ENEA,2002

Particolare interesse nei confronti delle celle a combustibile è rivolto dalle case costruttrici del settore automobilistico e dei mezzi pesanti.



Figura 5-19 Esempi di mezzo pubblico, con distributore, e autovettura alimentati ad idrogeno

Ciò per via dell'evidente necessità di introdurre nuove tecnologie a bordo dei mezzi che permettano di risolvere il problema dell'inquinamento. Per tale motivo esistono già molte soluzioni sperimentali che potranno entrare effettivamente nel mercato non prima di 15-20 anni, sia per i costi ancora notevoli della produzione di idrogeno e delle tecnologie che lo utilizzano e sia per il fatto che è necessario introdurre anche quelle infrastrutture relative alle fasi di immagazzinamento, trasporto e distribuzione del combustibile. Promotrici per un impegno maggiore in questa direzione devono essere le amministrazioni pubbliche dei grandi centri urbani dato che il fenomeno dell'inquinamento è senza dubbio tra i problemi più marcati in tali contesti, come illustrato nelle seguenti tabelle¹.

	1990	1995	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Anidride carbonica	100.5	110.3	114.2	117.3	118.6	119.5	121.8	125.3
Metano	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
Protoss. di azoto	2.0	2.6	3.0	3.3	3.5	3.7	4.0	4.1
TOTALE	103.4	113.9	118.1	121.5	123.0	124.0	126.6	130.2

Tabella 5-14 Emissioni gas serra, in Mt CO₂ equivalenti, nel settore dei trasporti a livello nazionale

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Emissioni di CO ₂	4296.2	4436.9	4573.7	4556.5	4567.4	4614.6	4699.7	4747.6	4953.2	5026.0	5037.5	5150.6	5355.7
Numeri indice	100.0	103.3	106.5	106.1	106.3	107.4	109.4	110.5	115.3	117.0	117.3	119.9	124.7

Tabella 5-15 Emissioni gas serra, in Mt CO₂ equivalenti, nel settore dei trasporti nel Comune di Roma

Come risulta dalla seguente tabella² i valori di emissioni registrati a bordo di un prototipo realizzato dalla Daimler-Chrysler mettono in evidenza l'indubbio vantaggio ambientale

¹ Vedere anche i valori già introdotti nel capitolo del ST.

² Da "Celle a combustibile. Stato di sviluppo e prospettive della tecnologia"-ENEA,2002

apportato da autovetture mosse da celle a combustibile piuttosto che da motori a combustione interna alimentati dai prodotti petroliferi:

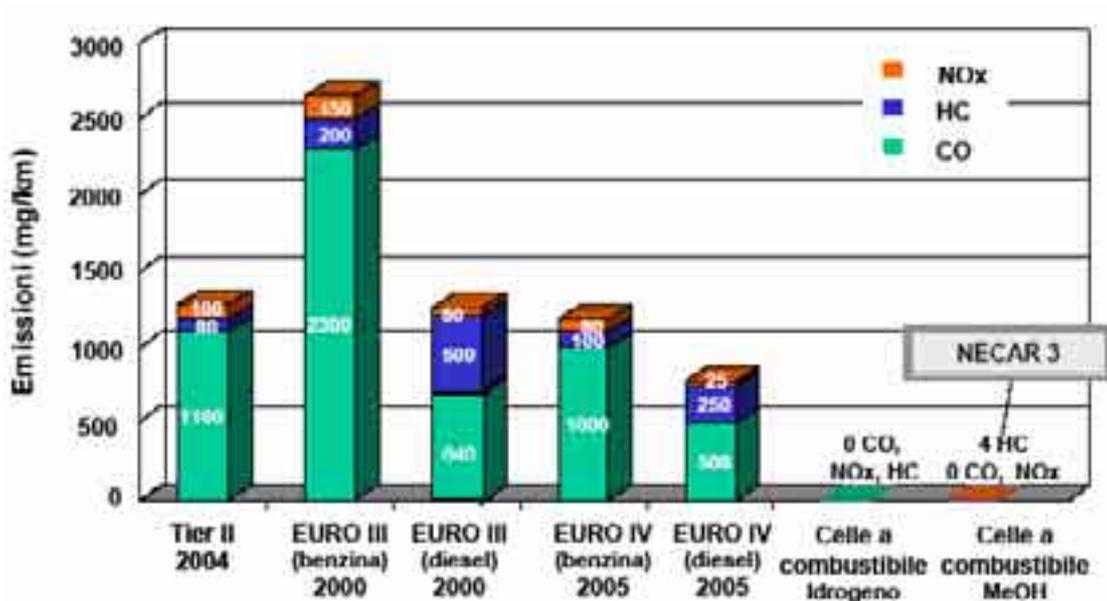


Figura 5-20 Confronto tra motori a combustione interna alimentati da derivati del petrolio e celle a combustibile

Per quanto riguarda i motori a combustione interna, l'uso dell'idrogeno implica soluzioni dedicate, dato che i sistemi attuali, alimentati con prodotti derivanti dal petrolio, hanno caratteristiche che implicherebbe un uso meno efficiente del mezzo, ciò per via delle proprietà già menzionate dell'idrogeno. Per le turbine a gas al momento le applicazioni sono rivolte nel settore aerospaziale, senza particolari soluzioni inerenti alla produzione di energia elettrica dato che i materiali devono avere spiccate proprietà resistenti ed inoltre le elevate temperature raggiunte in fase di combustione generano sensibili quantità di ossidi di azoto.

6 Conclusioni

Il presente lavoro, ha evidenziato alcuni aspetti legati all'utilizzo della fonte solare nelle tre applicazioni analizzate. Per entrambe è emerso un positivo impatto a livello ambientale, sia a livello globale, per le applicazioni che prevedono una riduzione dei consumi di energia elettrica e di conseguenza di inquinanti e di gas serra da parte delle centrali alimentate da fonti tradizionali, che locale, con particolare riferimento al ST utilizzato per integrare direttamente gli impianti di riscaldamento e di produzione di ACS direttamente nelle aree maggiormente popolate e quindi con un livello di inquinamento atmosferico molto elevato. Dal lato tecnico-economico, per i sistemi ST e FV, sono emersi problemi dovuti alla carenza di superfici a disposizione per l'installazione degli impianti e costi di investimento molto elevati ai quali non sempre corrisponde un beneficio futuro. Inoltre quanto esposto non tiene necessariamente conto, data la natura dei dati sulle utenze, della fase relativa al sopralluogo nella quale è possibile differenziare le varie tipologie di utenze e quindi effettuare le valutazioni relative alla fattibilità dei progetti (tra cui anche le verifiche strutturali delle superfici sulle quali installare gli impianti). Per quanto riguarda invece la tecnologia solare termodinamica i rendimenti di processo molto ridotti, soprattutto per i processi di termolisi diretta della molecola d'acqua, e le difficoltà tecnologiche a livello di materiali, ne limitano la possibilità di utilizzo per la produzione di idrogeno, mentre rappresentano una soluzione di sicuro successo per la generazione di energia elettrica.

7 Bibliografia

7.1.1 Siti internet

- http://www2.minambiente.it/Sito/settori_azione/iar/FontiRinnovabili/tecnologie/tecnici/solare_termico.asp
- <http://www.inventaria.sinanet.apat.it/ricerca.php?macrosettore=02&setto=0202&attivit=020202¯odescrizione=Combustione%20Non-Industriale&settdescrizione=Impianti%20residenziali&attdescrizione=Caldaie%20con%20potenza%20termica%20%3C%2050%20MW>
- http://www.romaperkyoto.org/?story=roma_inquinamento,
- <http://www.fonti-rinnovabili.it/index.php?c=incmap> Legambiente
- www.bancaditalia.it-anni 2004-2007
- http://www.adiconsum.it/sala%20stampa/documenti/gas_rapporto%20finale%20gen06.pdf
- w3.uniroma3.it/didattica/facolta/archit/corsi/lab_progettazione_3b/materdid/mat_did.htm
- <http://www.inventaria.sinanet.apat.it/index.php>
- <http://www.arpalombardia.it/>

7.1.2 Testi e manuali

- ENEA-“Rapporto Energia e Ambiente 2005”
- ENEA-“Produzione di idrogeno da fonti rinnovabili”
- ISTAT-“Edifici e abitazioni. Censimento 2001. Dati definitivi”
- Ambiente Italia -“Impianti solari Termici. Manuale per la progettazione e la costruzione”-2003
- “ Impianti solari fotovoltaici a norme CEI”. C.Zuccaro, F. Groppi
- ISES Italia- “Impianti solari termici. Acqua calda con l’energia solare”-2005
- ISES Italia - “Solare Termico. Guida per progettisti e installatori”-2004
- Diapositive materiale Ambiente Italia (corso su “Impianti solari termici: dalla progettazione alla realizzazione”, Roma 11÷14 Luglio 2006)
- Legambiente Italia – “Certificazione energetica degli Edifici”
- Ministero dell’Ambiente – Specifica Tecnica di Fornitura, allegato A., 10-02-2003

8 Appendice

8.1 Dati sul fabbisogno nazionale di energia primaria

	2002	2003	2004	2004/2003(%)
Combustibili solidi	14,2	15,3	17,1	11,5
Gas naturale	58,1	64,1	66,5	3,8
Prodotti petroliferi	92,0	90,8	88,0	-3,1
Fonti rinnovabili	12,6	13,0	15,2	17,5
Importazioni nette energia elettrica	11,1	11,2	10,0	-10,5
Totale	188,1	194,4	196,8	1,2
Prodotto Interno Lordo (M€₁₉₉₅)	1.036.945	1.039.581	1.052.308	1,2
Intensità energetica (tep/ M€ ₁₉₉₅)	181,4	187,0	187,0	0,0

Tabella 8-1 Fabbisogno nazionale di energia primaria

2

	Solidi	Gas naturale	Petrolio	Rinnovabili	Energia elettrica	Totale
Produzione	0,4	10,7	5,4	13,5	-	30,0
Importazioni	17,1	55,5	107,6	0,6	10,2	191,0
Esportazioni	0,1	0,1	24,7	-	0,2	25,1
Variazione scorte	0,3	-0,1	0,3	-	0,0	0,5
Disponibilità per il consumo interno	17,1	66,2	88,0	14,1	10,0	195,4
Consumi e perdite del settore energetico	-1,0	-0,8	-6,2	0,0	-44,1	-52,1
Trasformazione in energia elettrica	-11,9	-23,1	-11,8	-12,4	59,3	-
Impieghi finali	4,2	42,3	70,0	1,7	25,2	143,3
Industria	4,0	17,6	7,6	0,2	12,0	41,4
Trasporti	-	0,4	43,0	0,2	0,8	44,4
Usi civili	0,0	23,3	6,8	1,2	11,9	43,3
Agricoltura	-	0,1	2,6	0,1	0,4	3,3
Usi non energetici	0,1	0,9	6,6	-	-	7,6
Bunkeraggi	-	-	3,4	-	-	3,4

Tabella 8-2 Bilancio energetico nazionale 2004.

¹ Fonte MAP (Ministero Attività Produttive). Bilancio Energetico Nazionale 2004. Da "Il Compendio del rapporto Energia e Ambiente 2005" dell'Enea.

² Fonte MAP (Ministero Attività Produttive). Bilancio Energetico Nazionale 2004. Da "Rapporto Energia e Ambiente 2005" dell'ENEA. Da notare che il dato sul consumo totale è provvisorio mentre quello definitivo è 196,8 Mtep.

8.2 Dati sul fabbisogno energia primaria nel settore civile (residenziale e terziario)

- Consumi di energia nel settore civile per fonte. Anni 1990-2004 (ktep)

	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004 ^(*)
Energia elettrica	7.976	9.170	10.589	10.870	11.331	11.925	11.937
Gas	15.750	18.807	20.697	21.548	20.920	23.519	23.300
Prodotti petroliferi	10.107	7.293	6.833	6.983	6.578	6.513	6.800
GPL		1.743	1.837	2.103	2.158	2.103	2.212
Gasolio		7.703	4.366	4.481	4.143	3.982	-
Olio combustibile		671	323	343	328	321	-
Carbone	103	124	65	75	17	17	17
Totale fossili	25.960	26.224	27.595	28.606	27.515	30.051	30.117
Legna ^(**)	658	932	1.154	1.234	1.067	1.132	1.200
Totale usi finali^(***)	34.593	36.325	39.338	40.709	39.913	43.108	43.600

^(*) In aggiunta, si stima un consumo di legna non commerciale di circa 3,7 Mtep.
^(**) Energia elettrica valutata a 860 kcal/kWh.
^(***) Dati provvisori.

Tabella 8-3 Consumi di energia nel settore civile per fonte

8.2.1 Residenziale

Consumi di energia nel settore residenziale per fonte (ktep)

	1990	1995	2000	2001	2002	2003
Energia elettrica	4.535	4.922	5.256	5.294	5.411	5.586
Gas naturale	11.428	13.694	14.841	15.391	14.801	16.309
Prodotti petroliferi	8.418	6.024	5.192	5.311	4.997	4.931
GPL	1.344	1.601	1.804	1.867	1.540	1.601
Gasolio	6.547	4.344	3.351	3.602	3.415	3.279
Olio combustibile	527	79	57	57	52	50
Carbone	83	107	58	67	15	15
Totale fossili	19.929	19.824	20.090	20.769	19.813	21.255
Legna	652	925	1.146	1.225	1.059	1.125
Totale usi finali^(*)	25.117	25.671	26.491	27.287	26.283	27.966

^(*) Energia elettrica valutata a 860 kcal/kWh
Fonte: elaborazione ENEA su dati MAP

Tabella 8-4 Consumi di energia nel settore residenziale per fonte

- Famiglie che dichiarano di possedere beni durevoli. Anni 1997-2002 (per 100 famiglie)

	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Lavastoviglie	28,7	28,6	28,9	30,9	33,3	33,4	35,0
Lavatrice	96,1	96,3	96,1	96,0	96,6	96,1	nd
Videoregistratore	60,7	62,0	63,7	64,6	66,2	66,8	67,3
Impianto Hi-fi	47,5	47,7	50,1	52,2	55,2	54,9	55,7
Condizionatori, climatizzatori	(*)	(*)	(*)	(*)	10,7	13,1	16,4
Console, videogiochi, ecc.	(*)	(*)	(*)	(*)	16,8	17,0	17,0
Personal computer	16,7	18,8	20,9	25,6	34,9	38,9	42,7
Modem	3,9	5,3	9,4	16,6	25,1	30,4	32,3
Fax	3,8	4,5	6,0	6,7	7,3	7,2	7,2
Televisore a colori	95,4	96,1	96,4	95,7	95,5	94,9	96,4
Più di un televisore	43,2	41,6	41,7	42,3	44,5	47,8	47,2

(*) Negli anni 1997-2000 tale voce non è stata rilevata

Fonte: elaborazione ENEA su dati MAP

Tabella 8-5 Beni durevoli posseduti dalle famiglie

- Consumi finali di energia per tipologia di impianto di riscaldamento. Anni 1990-2003

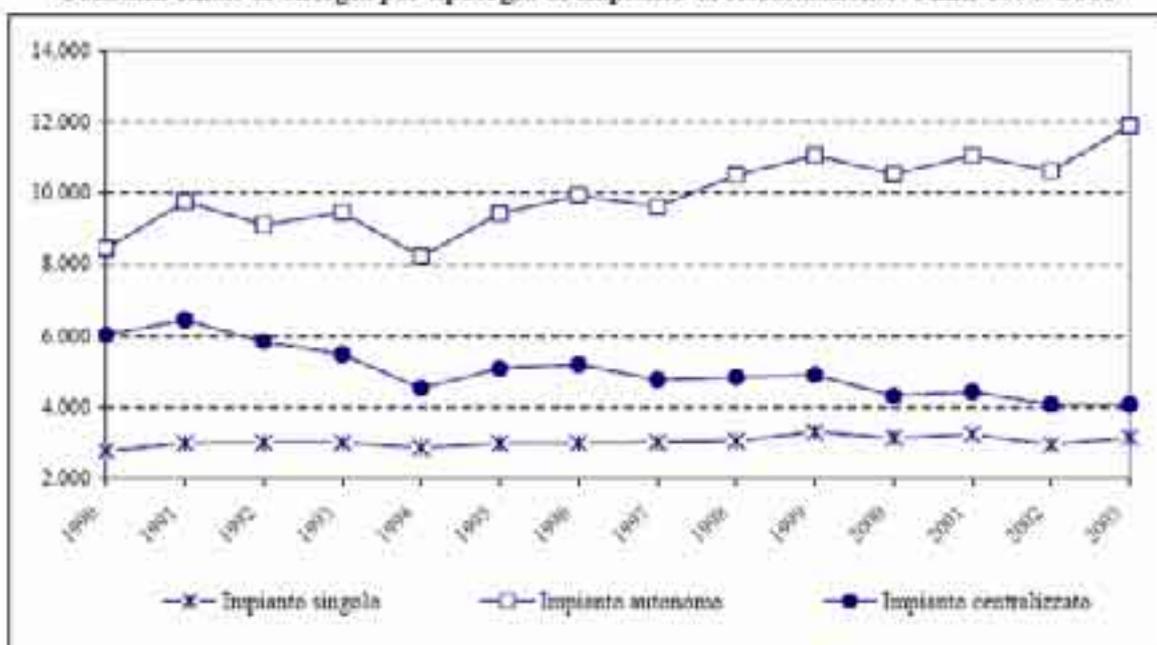


Tabella 8-6 Consumi finali di energia per tipologia di impianto di riscaldamento

- Consumi finali di energia per fonte e per tipologia di impianto di riscaldamento.
Anno 2003 (%)

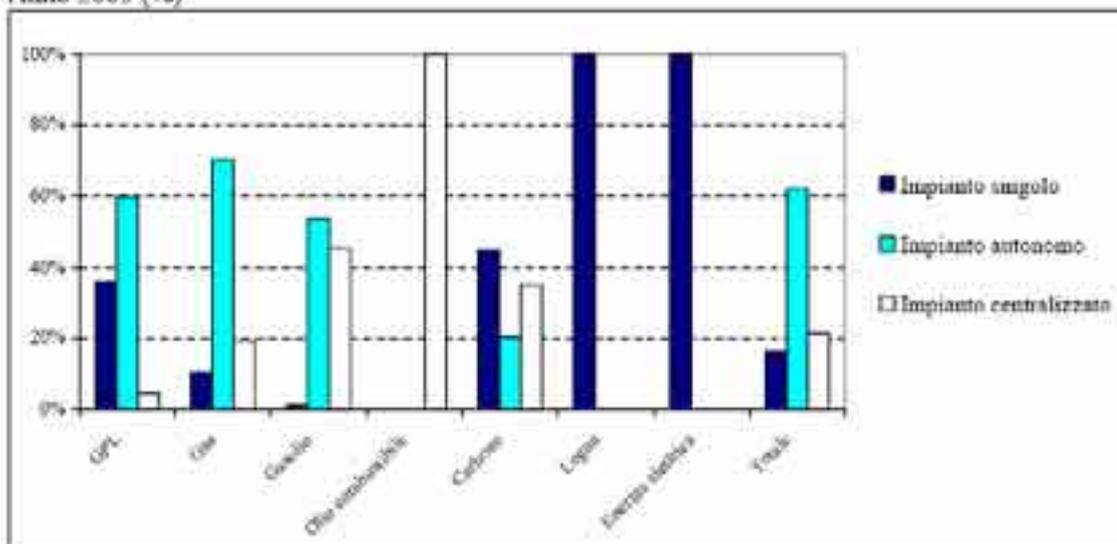


Tabella 8-7 Consumi finali di energia per tipologia di impianto di riscaldamento

8.2.2 Terziario

- Consumi di fonti energetiche nel settore terziario (ktep), Anni 1990-2003

	1990	1995	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Energia elettrica	3.441	4.248	4.822	5.076	5.333	5.576	5.920	6.339
Prodotti petroliferi	1.688	1.269	1.336	1.846	1.640	1.672	1.581	1.585
<i>GPL</i>	183	251	244	705	619	596	576	611
<i>Gasolio</i>	1.156	837	849	848	755	789	710	708
<i>Olio combustibile</i>	344	186	243	293	266	286	276	271
Gas naturale	4.322	5.113	5.624	5.948	5.856	6.158	6.120	7.210
Carbone	20	18	8	8	7	8	1	1
Totale fossili	6.030	6.399	6.965	7.801	7.504	7.837	7.702	8.796
Totale usi finali*	9.471	10.647	11.791	12.878	12.837	13.413	13.622	15.135

* energia elettrica a 860 kcal/kWh.

Fonte: rielaborazione ENEA su dati MAP

Tabella 8-8 Consumi di fonti energetiche nel settore terziario

8.3 Emissioni CO₂ su scala regionale

– Emissioni regionali di CO₂ per settori. Anno 2003

Regioni	Termoelettrico		Trasporti		Civile		Industria		Settore energia		Agricoltura		Totale	
	kt	%	kt	%	kt	%	kt	%	kt	%	kt	%	kt	% Italia
Piemonte	4.087	12,6	8.415,7	26,0	9.546,1	29,5	9.158,5	28,3	583,9	1,8	603,6	1,9	32.394,5	7,3
Valle d'Aosta	1	0,1	488,4	15,1	635,4	19,6	113,3	3,5	0,0	0,0	3,2	0,3	1.241,4	0,3
Lombardia	13.992	42,8	20.432,3	62,9	19.064,9	58,8	13.849,9	42,8	817,8	2,5	1.088,1	3,3	69.154,8	15,5
Trentino A. A.	176	0,5	2.517,0	7,7	1.808,4	5,6	880,0	2,7	1,2	0,0	121,4	0,3	5.504,0	1,2
Veneto	15.832	48,8	10.097,5	30,9	7.809,5	24,1	7.888,8	24,3	469,8	1,4	638,7	1,9	42.736,3	9,6
Friuli V. Giulia	5.276	16,2	2.153,2	6,6	1.889,5	5,8	3.700,5	11,4	211,1	0,6	199,4	0,6	13.589,2	3,0
Liguria	10.229	31,3	2.886,7	8,9	2.356,6	7,3	2.350,4	7,3	742,7	2,3	267,2	0,8	19.233,3	4,3
Emilia Romagna	8.802	27,1	11.599,6	35,7	9.240,8	28,4	8.356,8	25,7	114,3	0,3	1.147,8	3,5	39.261,8	8,8
Toscana	9.115	28,1	8.275,5	25,4	5.188,4	15,9	6.032,2	18,6	1.222,0	3,7	363,3	1,1	30.196,9	6,8
Umbria	1.904	5,8	2.082,1	6,4	951,2	2,9	2.168,2	6,7	5,1	0,0	157,7	0,5	7.268,3	1,6
Marche	699	2,1	3.732,0	11,5	1.670,9	5,1	1.577,1	4,8	528,6	1,6	272,1	0,8	8.479,4	1,9
Lazio	16.488	50,4	13.657,4	41,7	6.964,2	21,4	3.958,2	12,1	392,7	1,2	475,7	1,4	41.935,8	9,4
Abruzzo	1.203	3,7	3.087,1	9,5	1.445,7	4,4	1.833,8	5,6	19,4	0,0	225,7	0,7	7.613,0	1,7
Molise	398	1,2	533,3	1,6	228,5	0,7	473,9	1,4	0,0	0,0	73,4	0,2	1.703,0	0,4
Campania	1.538	4,7	8.836,4	27,2	2.641,1	8,1	2.756,5	8,5	62,6	0,2	477,9	1,4	16.312,5	3,7
Puglia	23.283	71,8	7.047,3	21,6	2.814,2	8,6	13.377,4	41,1	713,4	2,2	1.199,0	3,6	47.590,6	10,7
Basilicata	467	1,4	909,4	2,8	474,2	1,4	630,7	1,9	14,5	0,0	128,9	0,4	2.604,3	0,6
Calabria	3.738	11,4	3.066,4	9,4	796,2	2,4	730,6	2,2	8,3	0,0	51,6	0,1	8.546,6	1,9
Sicilia	12.188	37,4	8.614,0	26,3	1.774,2	5,4	4.860,8	14,9	7.996,7	24,5	610,0	1,8	36.043,4	8,1
Sardegna	5.877	18,1	3.883,9	11,9	879,3	2,7	3.145,5	9,7	372,5	1,1	279,0	0,8	14.836,7	3,3
Italia	325.202	100,0	324.515,1	100,0	78.379,3	24,1	86.901,1	26,8	14.539,0	4,5	8.392,1	2,6	446.245,6	100,0

Fonte: elaborazione ENEA

Tabella 8-9 Emissioni regionali di CO₂

8.4 Dati

8.4.1 Calore specifico dell'acqua allo stato liquido saturo.

Calore specifico H₂O

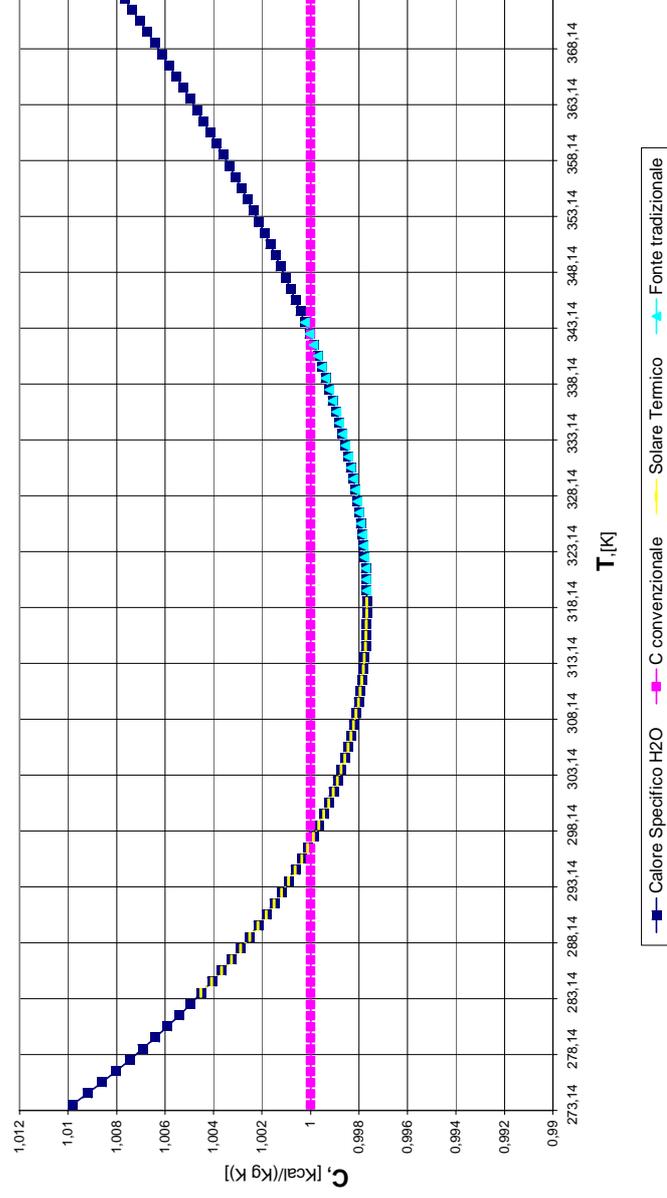


Tabella 8-10 Calore specifico dell'acqua allo stato liquido saturo

Convenzionalmente il calore specifico dell'acqua è preso pari a 1 kcal/(kg · °C), ma in realtà assume un andamento come quello riportato nel grafico a fianco. Ciò permette di evidenziare come, in caso di applicazione solare termico per la produzione di ACS e/o riscaldamento, la zona in cui è richiesta un maggiore quantitativo di energia per innalzare la temperatura per l'unità di massa sia fornita proprio dalla fonte solare (in figura il tratto in giallo riguarda tutti i casi in cui il ST riesca a far raggiungere i 318,14 K, o 45 °C), mentre la restante quota sia coperta dalla fonte tradizionale (in figura è riportato il caso in cui sia richiesto il raggiungimento della temperatura di 343,14 K, o 70 °C, come nella situazione in cui l'impianto radiante è costituito da termosifoni). Da ciò si evince come l'applicazione del ST implichi, seppur in percentuale molto ridotta per una singola utenza, ma non del tutto trascurabile per l'intero settore civile, una ulteriore forma di risparmio intrinseco.

8.4.2 Dati ISTAT (“Edifici ed abitazioni” - Censimento 2001)

Tavola 3- Alcuni indicatori per le abitazioni, per regione e ripartizione, Censimento 2001

Regione e Ripartizione	(a) Superficie media delle abitazioni occupate da persone residenti (mq)	(b) Stanze per abitazione occupate da persone residenti	(c) Superficie per persona residente in abitazioni (mq)	(d) Superficie per stanza delle abitazioni occupate da persone residenti (mq)
Piemonte	91,9	3,9	39,5	23,4
Valle d'Aosta	82,1	3,7	36,8	22,3
Lombardia	94,0	4,0	38,1	23,5
Bolzano-South	90,1	4,2	33,9	21,3
Trentino	92,5	4,0	37,8	22,9
Trentino-Alto Adige	91,4	4,1	35,9	22,1
Veneto	110,6	4,6	42,0	23,9
Friuli-Venezia Giulia	101,5	4,5	42,8	22,7
Liguria	82,6	4,0	37,5	20,6
Emilia-Romagna	100,5	4,3	41,7	23,4
Toscana	97,7	4,5	38,7	21,5
Umbria	103,2	4,5	39,3	23,0
Marche	102,2	4,6	38,3	22,2
Lazio	90,3	4,0	35,0	22,3
Abruzzo	100,4	4,5	36,8	22,2
Molise	99,2	4,4	37,0	22,4
Campania	90,9	4,1	29,7	22,4
Puglia	97,3	4,1	33,4	23,7
Basilicata	86,2	4,0	31,1	21,7
Calabria	96,9	4,2	34,2	23,0
Sicilia	94,6	4,2	34,0	22,3
Sardegna	104,3	4,5	37,5	23,2
Nord-Ovest	91,9	4,0	38,4	23,2
Nord-Est	103,9	4,4	41,5	23,4
Centro	95,2	4,3	37,0	22,1
Sud	94,6	4,2	32,3	22,8
Isole	97,0	4,3	34,9	22,5
ITALIA	95,0	4,2	35,8	22,9

(a) Somma delle superfici delle abitazioni occupate da residenti sul numero delle abitazioni occupate da residenti.

(b) Numero delle stanze delle abitazioni occupate da residenti sul numero delle abitazioni occupate da residenti.

(c) Somma delle superfici delle abitazioni occupate da residenti sulla somma delle superfici delle abitazioni occupate da residenti.

(d) Somma delle superfici delle abitazioni occupate da residenti sulla somma delle stanze delle abitazioni occupate da residenti.

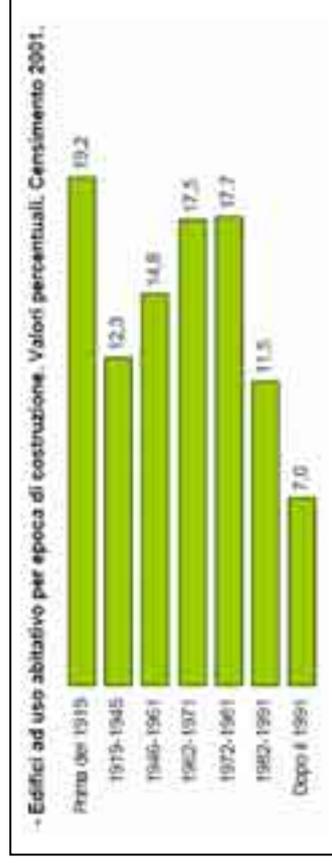


Tavola 8-11 Dati ISTAT “Edifici e abitazioni”

8.5 Equivalente energetico di alcuni combustibili

La [Circolare MICA del 2 marzo 1992, n. 219/F](#) riporta le modalità di conversione, in base alle quali è stata preparata la seguente tabella riassuntiva (i valori in essa contenuti vanno usati qualora non siano noti dati precisi sui poteri calorifici dei combustibili utilizzati).

EQUIVALENTE ENERGETICO DI ALCUNI PRODOTTI COMBUSTIBILI	
(Valori indicativi espressi in tep primari per unità fisica di prodotto)	
Prodotto	Equivalenza in tep
<i>Combustibili liquidi</i>	
Gasolio	1 t = 1,08 tep
Olio combustibile	1 t = 0,98 tep
Gas di petrolio liquefatti (GPL)	1 t = 1,10 tep
Benzine	1 t = 1,20 tep
<i>Combustibili solidi</i>	
Carbon fossile	1 t = 0,74 tep
Carbone di legna	1 t = 0,75 tep
Antracite e prodotti antracinosi	1 t = 0,70 tep
Legna da ardere	1 t = 0,45 tep
Lignite	1 t = 0,25 tep
<i>Combustibili gassosi</i>	
Gas naturale	1000 Nm ³ = 0,82 tep
<i>Elettricità</i>	
fornita in alta e media tensione	1 MWh = 0,23 tep
fornita in bassa tensione	1 MWh = 0,25 tep

Tabella 8-12 *Equivalente energetico di alcuni prodotti combustibili*

Per le fonti rinnovabili si adottano i criteri di conversione validi per l'energia elettrica, qualora sia prodotto e consumato tale vettore (es. fotovoltaico, idraulico, eolico), o quelle della formula valida per i fluidi termovettori, se il vettore prodotto e consumato è energia termica (es. solare termico o geotermia per usi termici).

Si aggiunge una tabella di conversione per combustibili liquidi dei litri in chilogrammi, facendo presente che ha un valore puramente indicativo, in quanto non è tratta dalla circolare indicata, che può essere utilizzata in assenza di dati più precisi dichiarati dal fornitore.

Combustibile	kg/litro
Benzina	0,734
Gasolio	0,825

Tabella 8-13 *Conversione per combustibili liquidi*

8.5.1 Dati rendimento medio centrali elettriche (ENEA)

Calcolo del rendimento medio delle centrali termoelettriche in Italia

A) Impianti con sola produzione di energia

	Carbone		Gas naturale		Gas derivati		Prodotti petroliferi		Altri solidi		Altri gassosi		Totale
	Energia Prodotta (GWh)	Consumo specifico medio (Kcal/KWh)	Energia Prodotta (GWh)	Consumo specifico medio (Kcal/KWh)	Energia Prodotta (GWh)	Consumo specifico medio (Kcal/KWh)	Energia Prodotta (GWh)	Consumo specifico medio (Kcal/KWh)	Energia Prodotta (GWh)	Consumo specifico medio (Kcal/KWh)	Energia Prodotta (GWh)	Consumo specifico medio (Kcal/KWh)	
Motori a c.i.			250	2387	25	2276	266	2335	27	9958	998	2550	1566
TG			2245	2363			69	2537			49	3308	2363
Vapore condensazione	44987	2336	13502	1966	1493	2500	35676	2257	1765	4502			97423
CC			41575	1578			1,4	1804	13	3656			41589,4
ripotenziato			16641	1994			2452,7	2214					19103,7
TOTALE A	44987	2336	74213	1771,9828	1518	2496,3109	38475,1	2255,2726	1805	4576,8	1047	2585,4747	162045,1

B) Impianti con produzione combinata di energia elettrica e calore

	Carbone		Gas naturale		Gas derivati		Prodotti petroliferi		Altri solidi		Altri gassosi		Totale
	Energia Prodotta (GWh)	Consumo specifico medio (Kcal/KWh)	Energia Prodotta (GWh)	Consumo specifico medio (Kcal/KWh)	Energia Prodotta (GWh)	Consumo specifico medio (Kcal/KWh)	Energia Prodotta (GWh)	Consumo specifico medio (Kcal/KWh)	Energia Prodotta (GWh)	Consumo specifico medio (Kcal/KWh)	Energia Prodotta (GWh)	Consumo specifico medio (Kcal/KWh)	
Motori a c.i.			1517	1420	164	1271	104	1801	51	1500	84	2073	1920
TG			4877	1477			510	1538					5387
CC			45178	2012	3484	1960	1904	1817	10722	1488	1	3039	61289
Vapore contropress	531	1431	2213	1186	21	980	1491	1150	1132	2284	26	1724	5414
Vapore cond. e spill.			1775	2057	195	3137	4769	2125	2287	2753	95	1700	9121
TOTALE B	531	1431	55560	1917,4118	3864	1904,8209	8778	1854,6397	14192	1755,3958	206	1861,6262	83131

Consumo specifico medio totale	Kcal/KWh	KWh/KWh	η
2017,5692	2,3460107	—	0,4262955
			42,6 %

Tabella 8-14 Calcolo del rendimento medio delle centrali termoelettriche

8.5.2 Dati Fattori di Emissione¹⁴² dei combustibili maggiormente usati nel settore residenziale

Inquinante	CO ₂		CO		COVNM		NO _x		PM ₁₀		SO ₂	
	g/GJ	g/kWh	g/GJ	g/kWh	g/GJ	g/kWh	g/GJ	g/kWh	g/GJ	g/kWh	g/GJ	g/kWh
Energia Elettrica		4,94E+02		1,21E-01		1,76E-02		4,47E-01				6,91E-01
Gas Naturale	5,55E+04	2,00E+02	2,50E+01	9,00E-02	5,00E+00	1,80E-02	5,00E+01	1,80E-01	2,55E-01	9,18E-04	5,76E-02	2,08E-04
GPL	6,24E+04	2,25E+02	1,00E+01	3,60E-02	2,00E+00	7,20E-03	5,00E+01	1,80E-01	2,00E+00	7,20E-03	0,00E+00	0,00E+00
Gasolio	7,33E+04	2,64E+02	2,00E+01	7,20E-02	3,00E+00	1,08E-02	5,00E+01	1,80E-01	1,29E-01	4,65E-04	9,40E+01	3,38E-01

Tabella 8-15 Fattori di emissione dei combustibili maggiormente usati nel settore residenziale

¹⁴² Ricavati da:

-dati ENEA-“Rapporto Energia e Ambiente 2005” pag. 238 riferiti al 2003;
 -sito Internet CTN_ACE e APAT

E' da notare il fatto che l'emissioni di CO₂ per quanto riguarda l'energia elettrica si riferiscono al kWh elettrico (tenendo già conto della trasformazione subita nelle centrali elettriche)

8.5.3 Tabelle di energia libera, entalpia molare standard di formazione¹⁴³

Specie chimica	ΔG_f°	Specie chimica	ΔG_f°	Specie chimica	ΔG_f°
H^+ (aq)	$\equiv 0$	$AgCl$ (c)	- 109,9	CH_4 (g)	- 50,78
H_3O^+ (aq)	- 237,3	Ag_2SO_4 (c)	- 618,8	Fe^{2+} (aq)	- 78,92
OH^- (aq)	- 157,4	Cu^{2+} (aq)	64,81	CO (g)	- 137,3
H_2O (g)	- 228,7	N_2O (g)	104,2	CO_2 (g)	- 394,6
H_2O (l)	- 237,3	NO (g)	86,62	CCl_4 (l)	- 65,31
HCl (g)	- 95,38	NO_2 (g)	51,29	CS_2 (l)	- 67,20
$HCl (Cl^-)$ (aq)	- 131,3	N_2O_4 (g)	97,89	C_6H_6 (g)	129,8
HF (g)	- 273,4	NH_3 (g)	- 16,50	SO_2 (g)	- 300,3
$HF (F^-)$ (aq)	- 279,0	NH_3 (aq)	- 26,58	SO_3 (g)	- 371,4
Zn^{2+} (aq)	- 146,5	NH_4Cl (aq)	- 210,8	SO_3^{2-} (aq)	- 745,1
HBr (g)	- 53,46	Ca^{2+} (aq)	- 553,9	H_2S (aq)	- 27,88
$HBr (Br^-)$ (aq)	- 104,0	$CaCO_3$ (c)	- 1128	Pb^{2+} (aq)	- 24,41
$HI (I^-)$ (aq)	- 51,62	$Ca(NO_3)_2$ (aq)	- 766,6	PbO_2 (c)	- 217,5
Ag^+ (aq)	77,46	$CaSO_4$ (c)	- 1323	$PbSO_4$ (c)	- 813,7

(g) = gassoso; (l) = liquido; (aq) = soluzione acquosa diluitissima; (c) = cristallino

Tabella 8-16 Energia libera molare standard di formazione (kJ/kmol)

Specie chimica	ΔH_f°	Specie chimica	ΔH_f°	Specie chimica	ΔH_f°
H^+ (aq)	$\equiv 0$	Ag_2SO_4 (c)	- 713,3	CO (g)	- 110,5
H_3O^+ (aq)	- 285,8	N_2O (g)	82,10	CO_2 (g)	- 393,5
OH^- (aq)	- 230,1	NO (g)	90,31	CH_4 (g)	- 74,84
H_2O (g)	- 242,0	NO_2 (g)	33,20	CCl_4 (g)	- 103,0
H_2O (l)	- 285,8	N_2O_4 (g)	9,17	CF_4 (g)	- 925,0
HCl (g)	- 92,36	NH_3 (g)	- 46,14	CS_2 (g)	- 117,4
$HCl (Cl^-)$ (aq)	- 167,3	NH_3 (aq)	- 80,34	C_6H_6 (g)	82,95
HF (g)	- 271,3	NH_4^+ (aq)	- 132,6	SO_2 (g)	- 297,0
$HF (F^-)$ (aq)	- 332,8	Ca^{2+} (aq)	- 543,0	SO_3 (g)	- 396,0
HBr (g)	- 36,42	$CaCO_3$ (c)	- 1207	SO_2Cl_2 (l)	- 389,1
$HBr (Br^-)$ (aq)	- 121,6	$Ca (NO_3)_2$ (aq)	- 958,6	H_2S (aq)	- 39,77
Ag^+ (aq)	105,6	$CaSO_4$ (c)	- 1450	Pb^{2+} (aq)	- 1,67
$AgCl$ (c)	- 127,2	$CaHPO_4$ (c)	- 1815	PbO_2 (c)	- 277,6
AgF (c)	- 204,7	$CaSiO_3$ (c)	- 1635	$PbCO_3$ (c)	- 699,6

g = gassoso; l = liquido; aq = soluzione acquosa diluitissima; c = cristallino(*)

Tabella 8-17 Entalpia molare standard di formazione (kJ/kmol)

¹⁴³Da libro: "Chimica generale"- P. Silvestroni

Specie chimica	S°	Specie chimica	S°	Specie chimica	S°
H ⁺ (aq)	0	Zn ²⁺ (aq)	-112,2	Zn (c)	41,66
H ₂ O ⁺ (aq)	69,96	N ₂ (g)	191,6	C (diamante)	2,38
OH ⁻ (aq)	-10,76	N ₂ O (g)	220,0	C (grafite)	5,73
H ₂ O (g)	188,8	NO (g)	210,8	CO (g)	197,7
H ₂ O (l)	69,96	NO ₂ (g)	240,1	CO ₂ (g)	213,8
H ₂ O (0 °C)	41,06	N ₂ O ₄ (g)	304,4	CO ₂ (aq)	117,6
Cl ₂ (g)	223,1	NO ₃ ⁻ (aq)	146,5	CH ₄ (g)	186,3
HCl (g)	186,9	NH ₃ (g)	192,5	CCl ₄ (g)	310,1
HCl (Cl ⁻) (aq)	56,52	NH ₃ (aq)	111,4	CS ₂ (g)	237,9
HF (g)	173,7	NH ₄ ⁺ (aq)	113,5	CS ₂ (l)	151,4
HF (F ⁻) (aq)	-13,81	Ca ²⁺ (aq)	-53,17	Fe (c)	27,30
HBr (g)	198,7	CaCO ₃ (c)	92,95	Fe ²⁺ (aq)	-137,7
HBr (Br ⁻) (aq)	82,48	Ca(NO ₃) ₂ (aq)	239,9	S (rombico)	31,82
Ag ⁺ (aq)	73,93	CaSO ₄ (c)	106,8	S (monoclinico)	32,55
AgCl (c)	96,30	Pb ²⁺ (aq)	10,47	SO ₂ (g)	248,3
O ₂ (g)	205,2	Pb (c)	64,85	SO ₃ (g)	256,8
H ₂ (g)	130,7	PbO ₂ (c)	68,66	H ₂ S (aq)	121,4
I ₂ (c)	116,2	Pb ₃ O ₄ (c)	211,1	CO ₃ ²⁻ (aq)	-56,94

(g) = gassoso; (l) = liquido; (aq) = soluzione acquosa diluitissima; (c) = cristallino

Tabella 8-18 Entropia molare standard (J/mol/K)

8.5.4 Caratteristiche e proprietà dell'idrogeno¹⁴⁴

Caratteristiche principali d'infiammabilità	Idrogeno	Metano	Propano
Densità in condizioni standard di T e P	0.0898	0.7174	2.005
Limiti di infiammabilità (%vol)	4.0-74.5	5-15	2.2-9.5
Energia minima di ignizione in aria (mj)	0.017	0.28	0.25
Temperatura di autoignizione (1 atm, °C)	570	580	480
Temp. Fiamma (combustione in aria, °C)	1430	1957	1980
Potere calorifico superiore (Kcal/mc)	3050	9530	24350
Velocità di fiamma (combustione in aria, m/s)	2.65	0.40	0.51
Velocità di fiamma (combustione in O ₂ , m/s)	14.36	3.90	3.31
Energia minima di ignizione in aria (mJ) CN	0.017	0.28	0.25

Tabella 8-19 Principali caratteristiche dell'idrogeno, del metano e del propano

¹⁴⁴ Da "Corso introduttivo all'idrogeno come vettore energetico" 24-25/09/02 Roma

Proprietà Fisico chimiche più comuni dell'idrogeno gassoso	
Tossicità	Nessuna
Densità (Kg/mc)	0.0898
Coeff. Di diffusione in aria (cm/s)	0.610
Limiti di infiammabilità (%vol)	4.0 – 74.5
Energia minima di ignizione in aria (mj)	0.017
Temperatura di autoignizione (1. atm.	570
Temperatura di ebollizione (°C)	-252.7
Temp. Fiamma (combustione in aria,	1430
Proprietà Fisico chimiche più comuni dell'idrogeno liquido	
Peso specifico a -252.7°C (g/l)	70
Temperatura di fusione (°C)	-259.3
Temperatura di ebollizione (°C)	-252.7
Temperatura critica(°C)	-234
Pressione critica (atm)	12.8
Densità rispetto all'acqua	0.07
Calore specifico (cal/g°C)	0.57
Calore di fusione (cal/g)	14
Calore di vaporizzazione (cal/g)	105

Tabella 8-20 Proprietà dell'idrogeno, allo stato gassoso e liquido

Limiti di infiammabilità di miscele H2-aria (propagazione verso l'alto) CN	LFL (%)	UFL(%)
Tubazioni	4.1	74.8
Contenitori sferici	4.6	75.5
Limiti di infiammabilità di miscele H2-ossigeno CN	LFL (%)	UFL(%)
Propagazione verso l'alto	4.1	94.0
Propagazione verso il basso	4.1	92.0

Tabella 8-21 Proprietà dell'idrogeno