

### XIII. POLITICA ENERGETICA

#### 1. Il problema energetico

Il problema energetico ha oggi assunto a livello mondiale aspetti paradossali. Il 94% dell'energia consumata è energia chimica di origine fossile, cioè derivata da riserve non rinnovabili; l'energia idraulica stagna intorno al 5-6%, mentre l'utilizzazione delle energie alternative è insignificante. La ripartizione delle risorse e del consumo fra le nazioni è intollerabile per la sua iniquità: nel 1975 il consumo mondiale era di circa 5,75 miliardi di TEP (tonnellate equivalenti a petrolio), cioè di 1,45 TEP annua per abitante; ma il consumo pro-capite era di 7,8 TEP negli Stati Uniti, 3,1 TEP in Europa e 0,3 TEP nei paesi in via di sviluppo del Terzo Mondo; la differenza di consumo si spiega non solo con le differenze nei livelli di sviluppo, ma anche con lo spreco sistematico di energia che si verifica nei paesi ricchi (dati CCE, 1978).

Nei paesi del Sahel il consumo annuo di energia è di 365 kg EP (equivalenti petrolio) pro-capite, ma si tratta di statistiche che riguardano solo l'energia commerciale. Se si considera l'energia non commerciale (essenzialmente la legna da ardere), il consumo resta basso in valore assoluto (forse 200 kg EP annui pro-capite), ma assai gravoso in valore relativo in rapporto alle risorse, perché provoca il progressivo disboscamento e infine la desertificazione.

Nell'insieme del continente africano il legname soddisfa al 60% dei bisogni energetici, al 90% nelle zone rurali: il consumo pro-capite è di  $m^3$  0,725, di cui  $m^3$  0,6 come legna da ardere, in pratica per i bisogni di cucina. Ciò implica una distruzione annua di 1.300.000 ha di foresta densa, o di 2.300.000 ha di foresta rada e terreni arborati.

Nei paesi del Sahel l'energia annua consumata deriva per l'81% da combustibile vegetale (legna da ardere) e per il 18% da combustibili commerciali (nel consumo per abitante invece il rapporto è del 94% rispetto al 6%) (v. tab. p. 614). D'altra parte il consumo di prodotti petroliferi (estremamente ineguale: 570.000 t annue in

materiale caro e non indigeno, non resiste al calore e si spacca, la decomposizione della struttura per la perdita di idrati iniziandosi sui 60-80°.

In conclusione sembrano doversi preferire risultati più modesti ma a portata di mano e suscettibili di rapida diffusione. Pertanto vorremmo suggerire per ora il fornello in 'banco' senza camino come obiettivo da raggiungersi per gradi, mentre si dovrebbe immediatamente diffondere la pratica di una semplice schermatura del fornello a 3 pietre con mattoni in 'banco' disposti a corona del fuoco tradizionale a una distanza di 10-30 cm. In questo modo il fornello tradizionale resterebbe intatto, ma si avvierebbe al tempo stesso sul piano culturale il concetto tecnologico della camera di combustione. La soluzione sarebbe prontamente generalizzabile, e anche se l'economia di legna dovesse essere del solo 10%, ciò rappresenterebbe già per il Sahel nel suo complesso 1200 t di legna al giorno tagliata in meno: è meglio il poco a breve scadenza che il più con prospettive incerte e a lungo termine.

### 2.3. Pirolisi (gas povero e carbone di legna)

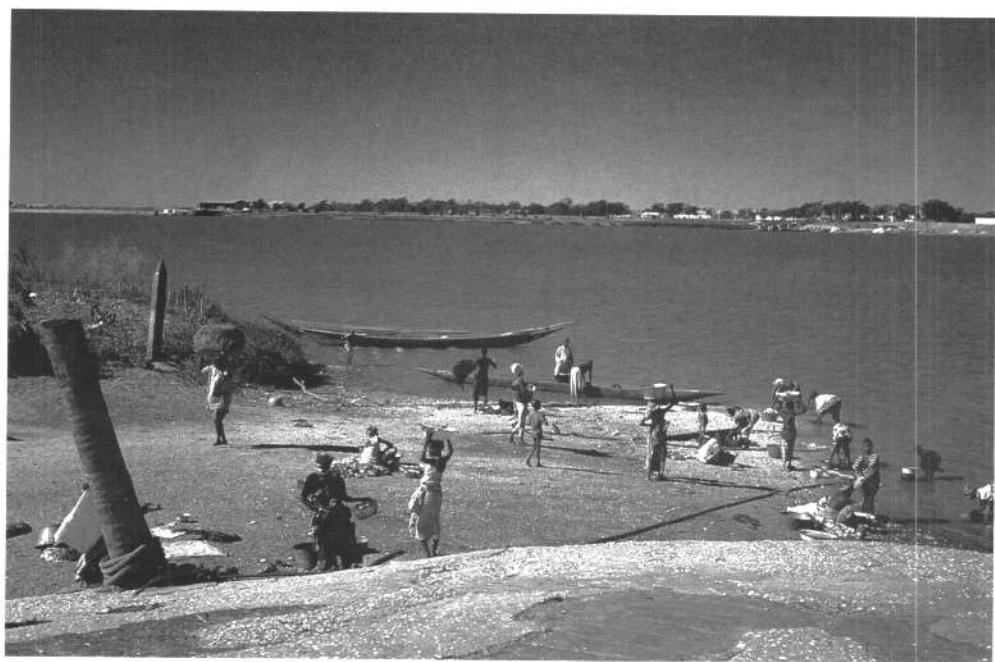
I prodotti vegetali contengono una certa quantità di energia chimica: kg 3 di materia vegetale secca col 20% di acqua sono equivalenti a kg 1 di olio combustibile e a 10.000 Kcal (paglia di frumento secca: 10-15% di acqua). Si può trasformare questa energia in energia meccanica o in altra forma di energia chimica, il carbone di legna. Le colture praticate in vista di questa trasformazione sono dette colture energetiche; in genere sono le paglie, le canne e le erbe che danno i migliori risultati (per es. il 'Pennisetum purpureum' o erba di elefante); 1 ha irriguo può dare in 4 sfalci 150-200 t di materia verde all'anno (con tasso di umidità del 75-80%) e 30-50 t di materia secca, equivalente a 10-16 t di olio combustibile.

La trasformazione si fa mediante pirolisi, ossia decomposizione chimica per riscaldamento fuori del contatto con l'aria in un reattore o 'gasogeno'. Se si vuol trasformare l'energia chimica in energia meccanica si gassifica tutto il prodotto (veicoli e trattori a gasogeno), altrimenti non si spinge la gassificazione a esaurimento e si ottiene un gas povero e un residuo agglomerabile analogo al carbone di legna (in ingl. *char*). Il potere calorifico di questo gas è di 900-1000 Kcal/m<sup>3</sup> (gas di città Kcal/m<sup>3</sup> 8200), ma si può azionare un motore a gas.

Il rendimento del gasogeno (rapporto fra energia chimica dei vegetali e quella del gas) è sempre almeno del 0,7; il rendimento del motore è circa del 0,35; il rendimento totale è dunque del 0,24. Se si vuol produrre elettricità si deve aggiungere l'alternatore a rendimento 0,95 e la trasmissione motore/alternatore a rendimento 0,9<sup>2</sup>.

La pirolisi per la produzione di carbone di legna secondo il metodo tradizionale (cumulo di terra con sfatatoi) è molto diffusa nel Sahel, specie per il mercato urbano. Invece il gas è di più difficile utilizzazione sebbene la tecnica di produzione sia relativamente semplice: l'operazione richiede una buona organizzazione

$$^2 R = \frac{\text{energia elettrica prodotta}}{\text{energia vegetale}} = 0,24 \times 0,9 \times 0,95 = 0,21.$$



*Fiume Senegal a St. Louis.*



*Fiume Niger a Mopti (Mali).*

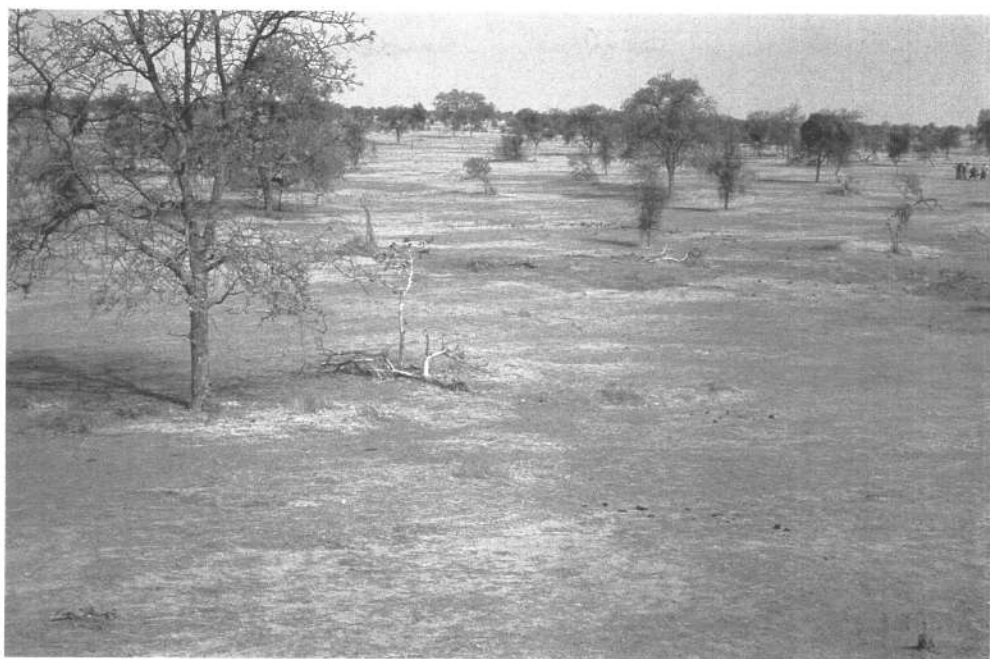


*Lago Ciad (foto di Jean Yves Gac).*



*Rilievi del Gourma.*





*Paesaggio sabeliano tipico (foto di Simon Badji)*



*Paesaggio sabaro-sabeliano (foto di Simon Badji)*



*Paesaggio sabelo-sudanese (foto di Simon Badji).*



*Acacia albida.*



*Euphorbia balsamifera.*



*Acacia ataxacantha.*





*Boscia senegalensis.*

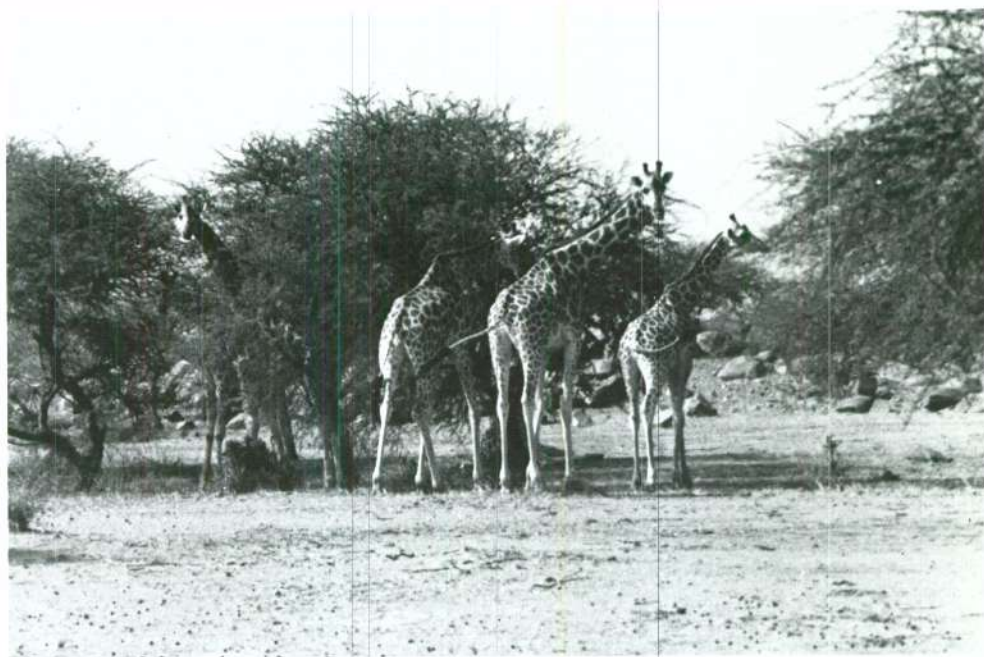


*Acacia nilotica.*





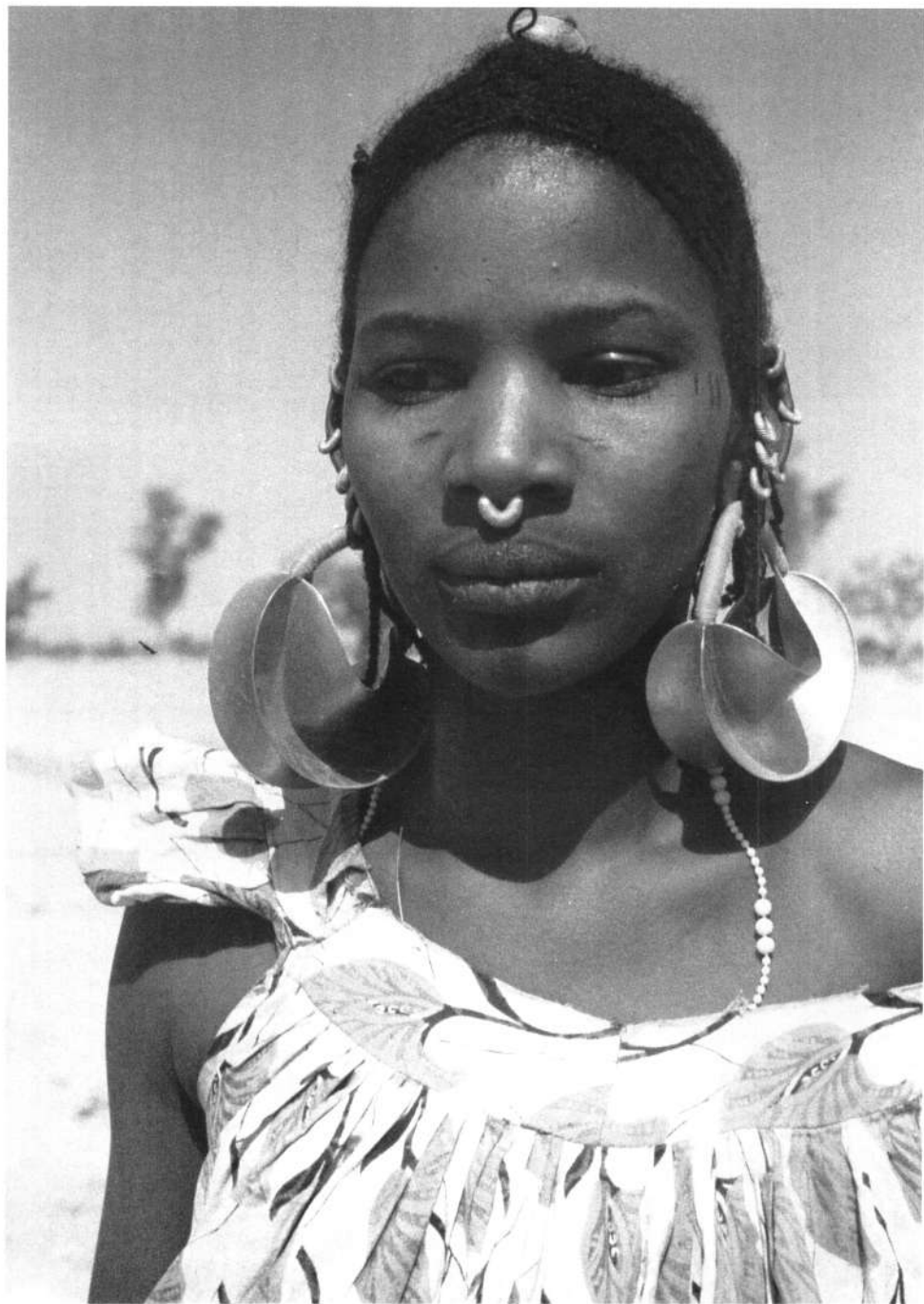
*Tamarix articulata.*



*Sabel nigerino (presso Tillabéry): giraffe.*

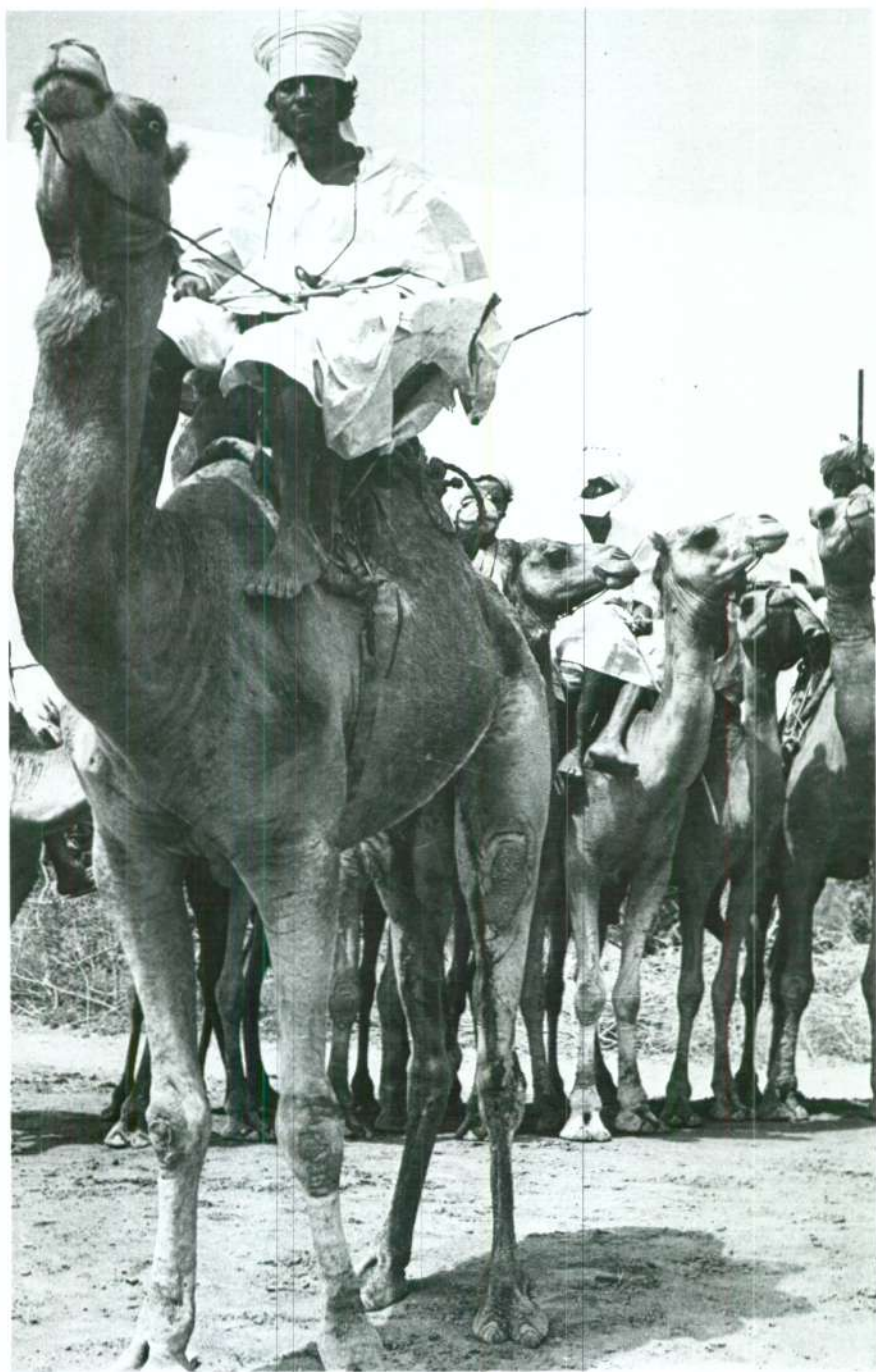


*Pastori Peul.*



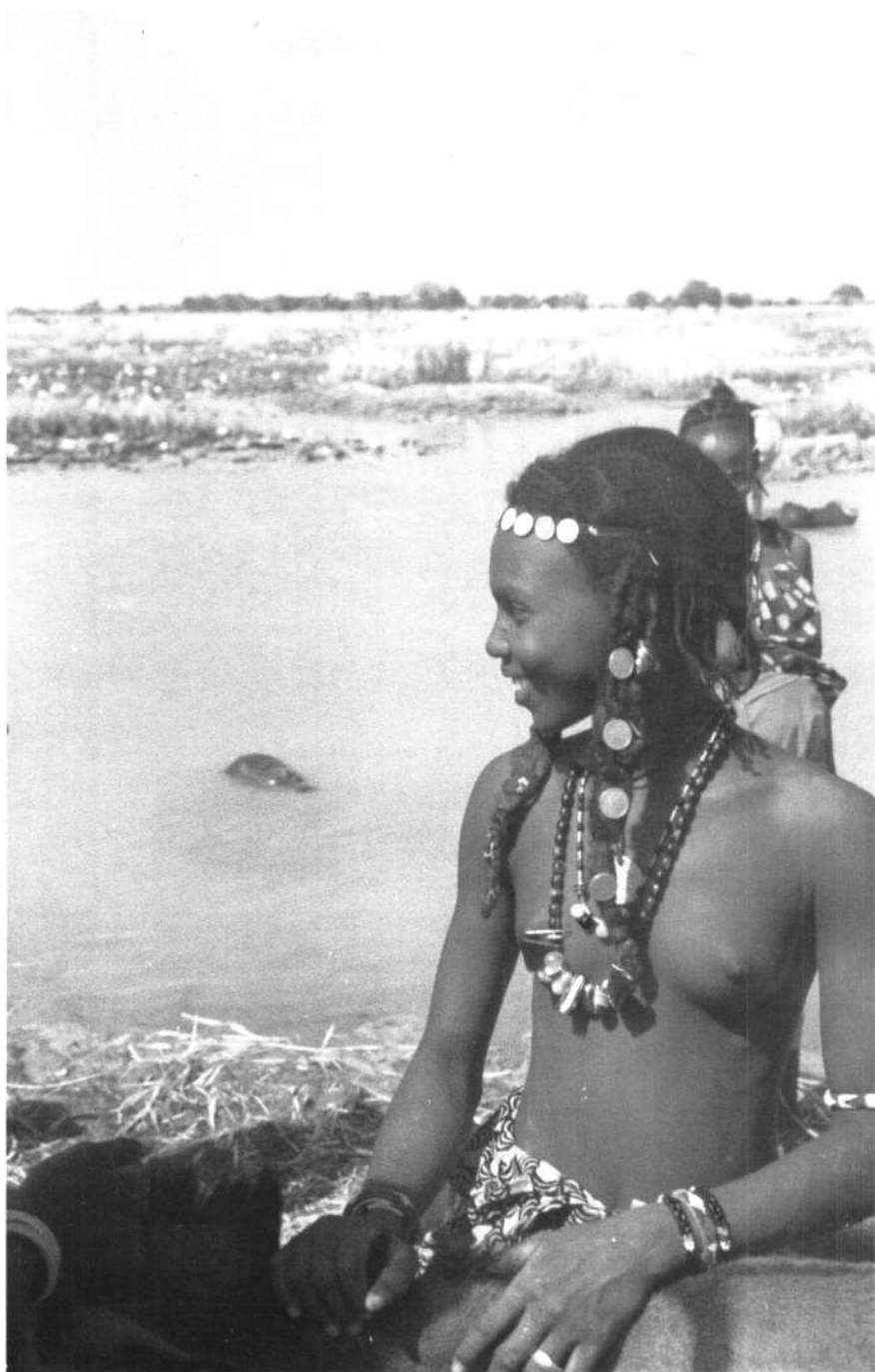
*Donna Peul presso un pozzo sulla pista fra Douentza e il lago Niangaye nel Gourma (Mali).*





*Touareg su cammelli (Mali).*





*Ragazza Peul con una mandria all'abbeverata.*



*Donna Songhai di Gao.*



*Danzatori Peul Bororo (Niger).*



*Accampamento Peul (Niger) (foto di Ramazzotti).*



*Signore di Hombori nel Gourma (Mali).*





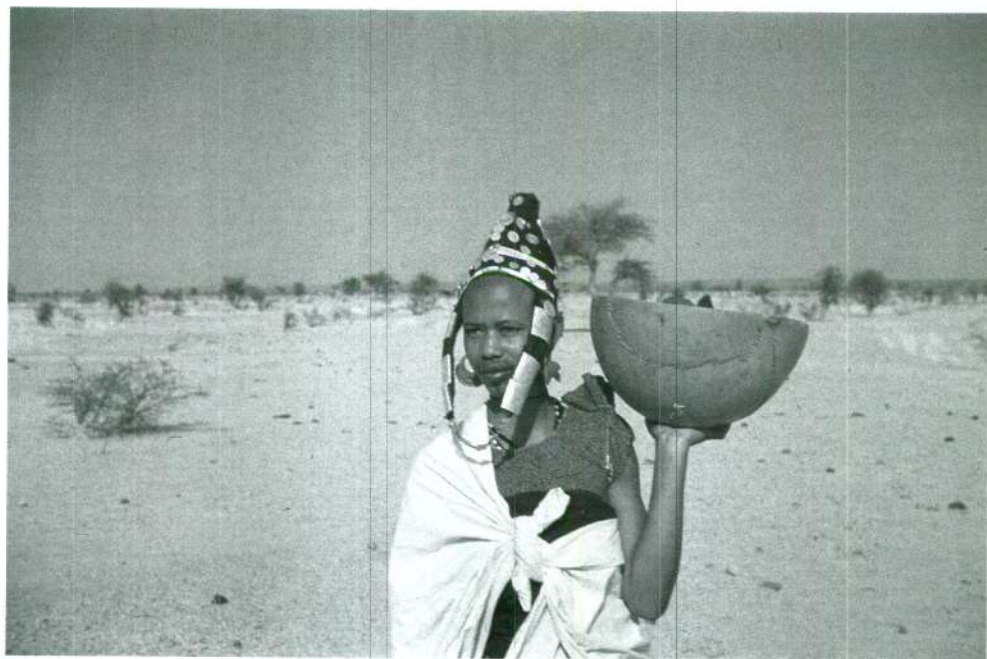
*Il mercato di Djenné con la grande Moschea (Mali).*



*Il mercato di Djenné (Mali).*



*Cammelliere Touareg (Tombuctù - Mali).*



*Donna Peul (foto di Ferorelli).*



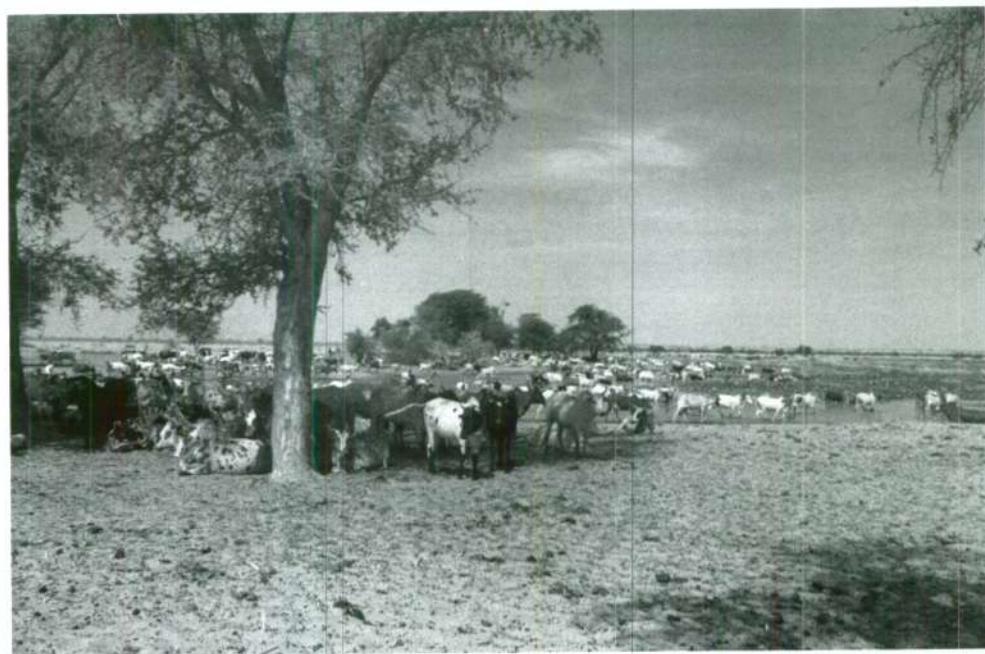
*Pozzo tradizionale cementato - Niger (foto di Ramazzotti).*



*Perforazione m 250 con contropozzo - Oussorogui (Senegal).*



*Grande pozza ('mare') di Abalak (Niger) (foto di Ramazzotti).*

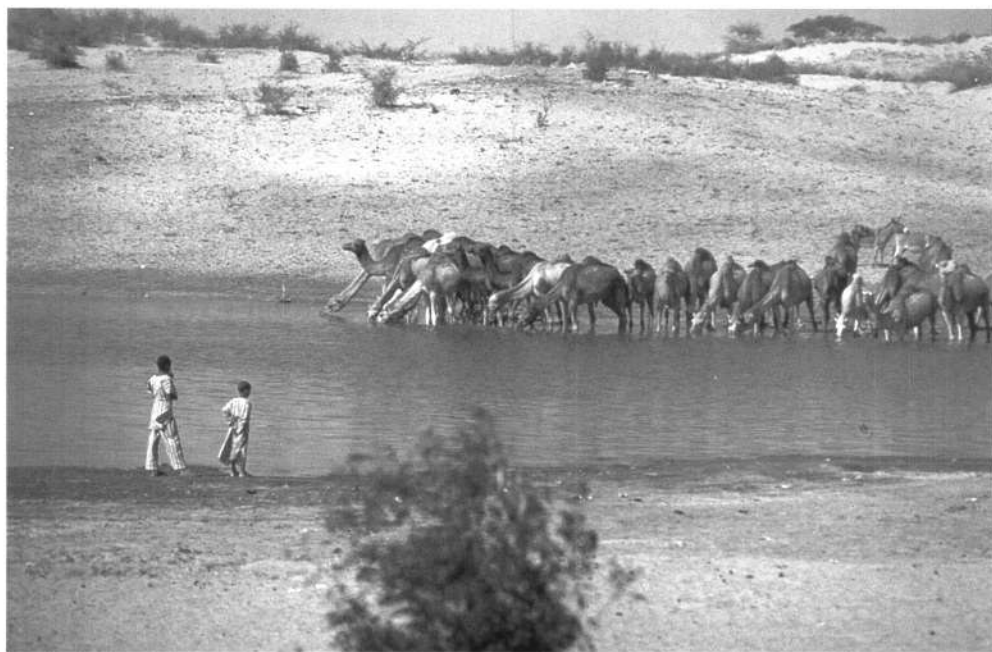


*Pozza ('mare') fra Douentza e Hombori nel Gourma (Mali) con mandria all'abbeverata.*

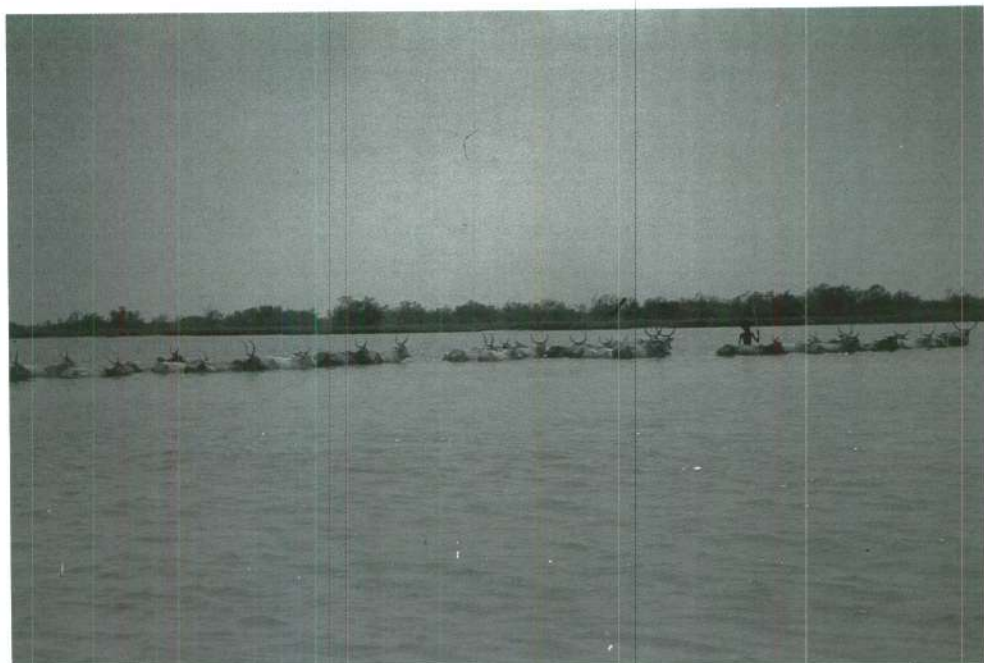




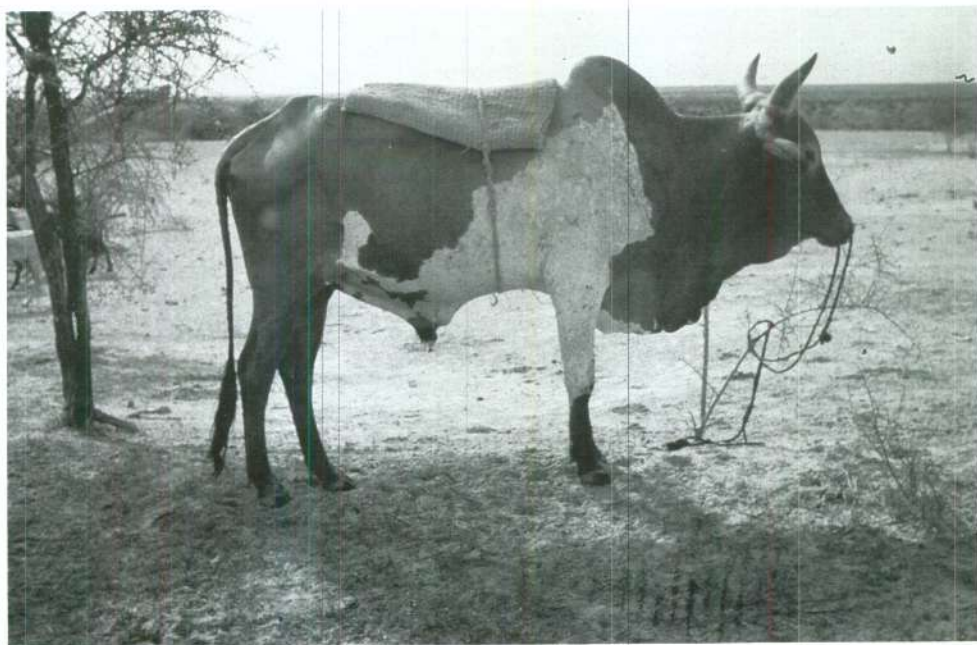
*Ammassamento di bestiame a un pozzo (Senegal) (foto di Simon Badji).*



*Pozza ('mare') (foto di Ferorelli).*



*Zebù Bororo in guado nel fiume Bani (affluente del Niger) presso Djenné.*



*Zebù Mauro (foto Ist. di Zootecnia e Veterinaria - Università di Dakar).*



*Zebù M'Bororo (Niger) (foto di Ramazzotti)*

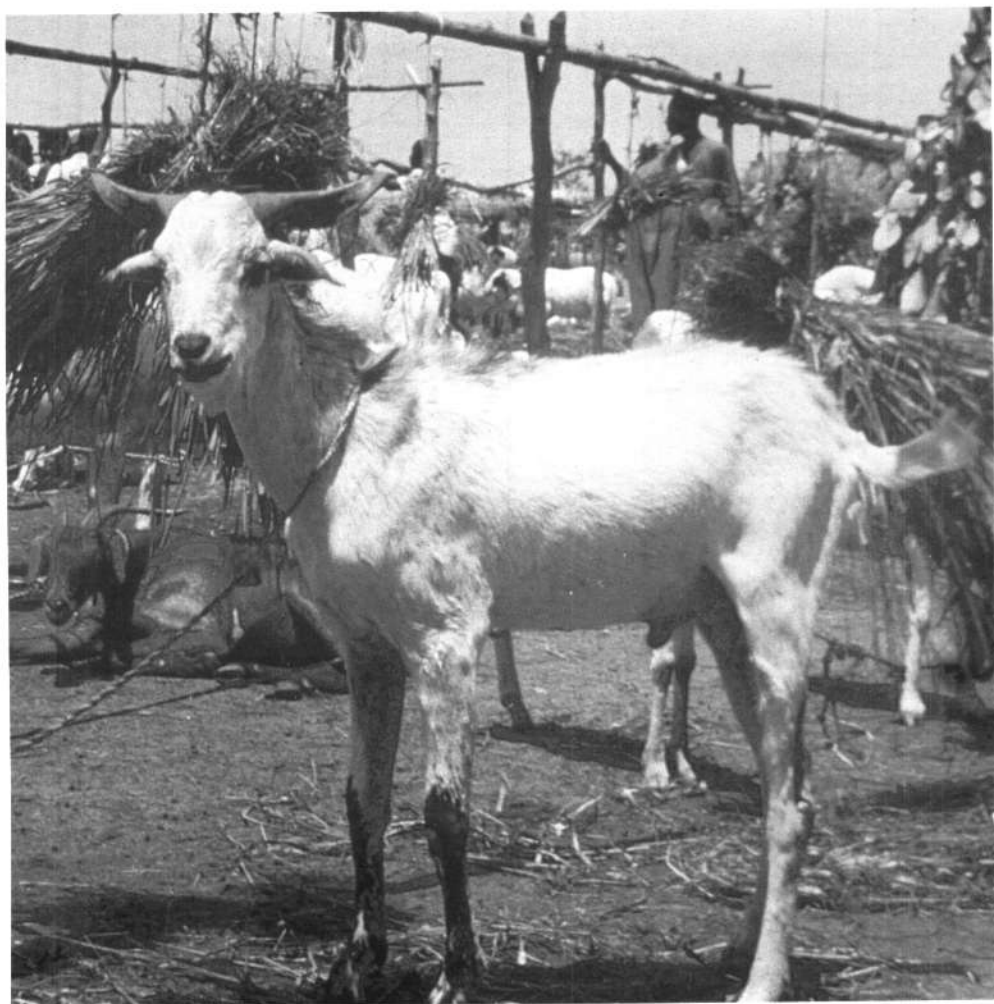


*Zebù Kouri (Mali) (foto di Ferorelli).*



*Montone Peul (foto Ist. di Zootecnia e Veterinaria - Università di Dakar).*





*Capra del Sabel (foto Ist. di Zootechnica e Veterinaria - Università di Dakar).*



*Miglio varietà Souna. Stazione di ricerca agronomica ISRA - Bambey (Senegal)  
(foto di Niang)*



*Coltura di Niébé a Louga (Senegal) (foto di Niang).*



*Miglio nano. Stazione di ricerca agronomica ISRA - Bambey (Senegal)  
(foto di Niang).*



*Colture di cipolle sui 'marigot' dell'altopiano Dogon (Mali).*

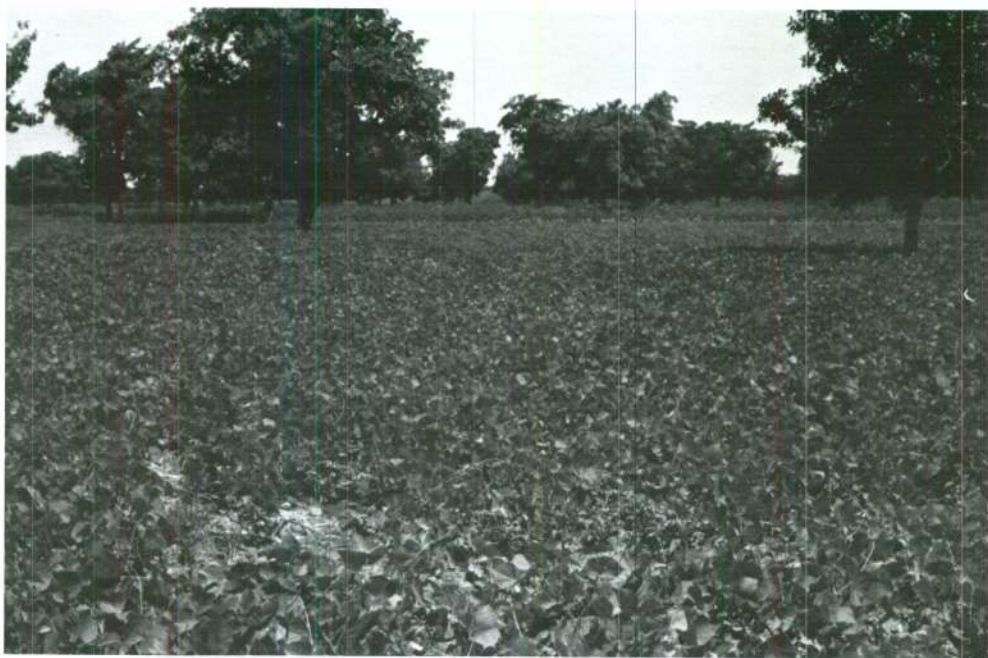


*Baccelli di Niébé. Stazione di ricerca agronomica ISRA - Bambey (foto di Niang).*





*Spiga di miglio nano. Stazione di ricerca agronomica ISRA -  
Bambey (foto di Oudin).*



*Lab Lab Purpurens.*



*Piante varie.*



*Tramonto su villaggio di pescatori Bozo. Fiume Niger a Mopti (Mali)  
(foto di Ferorelli).*

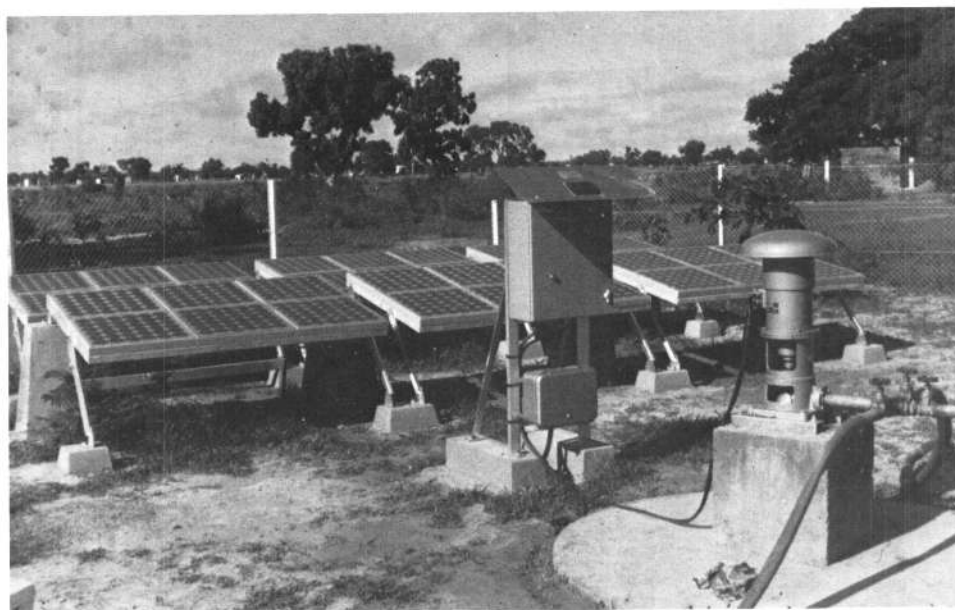


*Pescatori Bozo sul Niger a valle di Mopti (Mali).*



*Bambina Bozo presso Mopti (Mali).*





*Motore solare a fotocellule (Mali).*



*Motore solare di 900 W a Koni (Mali) (foto di Ferorelli).*



*Scimmia Verde o Callitriche (Cercopithecus aethiops). È Wanu che invano cerca insetti fra i capelli dell'autore.*

di raccolta di residui vegetali (o la pratica di colture energetiche), una sorveglianza continua del processo, e non può farsi su scala limitata (è valida solo con potenze superiori ai 500 kW). La gassificazione è il risultato di una ossidazione parziale della materia vegetale, e il gas può essere utilizzato in caldaie o motori diesel a doppio carburante, per esempio per produrre energia elettrica.

Secondo studi compiuti in Mali nel 1977<sup>3</sup>, il costo dell'elettricità così prodotta in una centrale di 300 kW dovrebbe essere di circa 17 Fr. CFA/kW (Lire 68 del 1977), costo molto inferiore a quello delle 4 centrali termiche di Bamako, Bougouni, Gao e Kayes (rispettivamente Fr. CFA/kW 11,24 - 54,28 - 45,3 - 29,03).

Il gasogeno come fonte di energia per usi rurali conta molti convinti promotori e deve senz'altro essere tenuto presente per il futuro. Per ora a nostro avviso è prematuro nel senso che scavalca tappe essenziali e imperative dello sviluppo energetico e tecnologico: non si può introdurre questo tipo di energia in un ambiente rurale dove non è ancora diffusa la trazione animale per le colture alimentari e l'associazione agricoltura-allevamento. Per contro si dovrebbe estendere la produzione del carbone di legna, che già fa parte della tecnologia tradizionale, razionalizzando i metodi.

#### 2.4. Fermentazione metanica (biogas)

Consiste nel far fermentare fuori del contatto con l'aria residui vegetali e animali per ottenere gas combustibile, cioè un miscuglio di metano ( $\text{CH}_4$ ) e biossido di carbonio ( $\text{CO}_2$ ), utilizzabile per uso di cucina, riscaldamento o motori a gas.

Il processo si svolge in un digestore di biogas, che si osserva in natura: per es. nello stomaco di una vacca (200 l di metano al giorno), sul fondo delle paludi e di certi laghi (Kiwu in Rwanda). Sebbene la ricerca batteriologica in materia di digestione anaerobica sia ancora incompleta, ciò non impedisce il funzionamento di numerosi impianti. In linea generale le condizioni per un funzionamento ottimale sono:

- Una composizione costante della materia immessa (per es. un tenore C/N equivalente a 25-30 parti di C per una di N);
- Una temperatura di fermentazione costante di 25-36°C (36°C essendo l'optimum);
- Un'adeguata diluizione in acqua, con contenuto solido del liquame immesso che non superi il 5-10% del peso totale;
- Un leggero tenore alcalino (valori pH fra 7 e 7,5);
- Un tempo adeguato di ritenzione negli impianti a processo continuo, il ritmo quantitativo di ricarica dipendendo dal volume del digestore.

Se per ragioni di clima, di composizione del materiale immesso o per altri inconvenienti le condizioni elencate non possono essere soddisfatte, la produzione di biogas può tuttavia ancora valere la pena.

<sup>3</sup> J. F. Molle, per il « Centre National d'Etudes et d'Expérimentation de Machinisme Agricole » del Min. dell'Agricoltura francese.



Le feci umane, per es., non hanno un rapporto adeguato C/N, e se vengono così fermentate l'apporto di un uomo adulto potrà dare alla temperatura ottimale non più di l 30 di gas; ma se vi si aggiungono kg 0,5 di paglia tritata si possono raggiungere l 200. Una temperatura di fermentazione di 20°C ridurrà la resa ottimale (che è a 36°C) di circa il 50%; ma vi è un modo di migliorare la situazione aumentando il tempo di ritenzione, ossia allungando i tempi del processo, nel qual caso però può essere antieconomico aumentare il volume del digestore fino al livello ottimale di rendimento (il massimo è in genere di 100 giorni, il che implica un volume di 100 volte l'immissione giornaliera).

Un'altra virtù della fermentazione metanica è la sua attitudine a trattare efficacemente i rifiuti producendo una fanghiglia ricca di azoto e sanitariamente non pericolosa da impiegarsi come concime biologico. È una pratica ben nota in Cina dove 7 milioni di impianti trasformano rifiuti umani e animali in concime.

Nella produzione di biogas si devono distinguere due forme:

- a. *Metanogeno a processo continuo*. Si presta bene all'uso di deiezioni animali, ma non accetta i residui vegetali correnti; funziona con un'unica fossa, comporta poche manipolazioni, ma richiede una gran quantità di acqua e presenta problemi di polluzione. L'impianto di tipo cinese è noto come 'digestore a cupola', mentre quello di tipo indiano è chiamato 'fossa a disegno indiano', con cupola fluttuante. Sono impianti complessi e di costo considerevole non certo adatti per l'ambiente saheliano, a causa principalmente della quantità d'acqua necessaria e dell'esigenza di una disponibilità continua e puntuale del materiale da immettere.
- b. *Metanogeno a processo discontinuo* (processo Isman). Funziona a partire da residui vegetali (paglie, steli, fogliame, erbe) e non richiede che in minima parte l'aggiunta di letame e colaticcio di origine animale; l'impianto è molto rustico, di costo moderato, consuma poca acqua ed è adatto anche per un uso ridotto a scala familiare; anch'esso fornisce un residuo di 'compost' utilizzabile come concime; presenta però l'inconveniente di complicate manipolazioni per il carico e lo scarico della fossa. Vi è il noto modello 'zairiano' costruito con 4 fusti di recupero da benzina di 200 l, per una capacità totale di 800 l; funziona con residui vegetali e deiezioni animali in determinate proporzioni, e può produrre 300 l di biogas al giorno; vari studi sono in corso per migliorarne la potenzialità (ISRA-CNRA di Bambey in Senegal).

A nostro avviso però nemmeno il metanogeno a processo discontinuo, sia pure nella forma rustica del modello zairiano, è utilizzabile nel Sahel. A questo proposito vanno fatte considerazioni analoghe a quelle relative alla pirolisi mediante gasogeno. I residui delle colture povere del Sahel e le preziose deiezioni del bestiame hanno una funzione troppo importante e vitale nel quadro dell'associazione agricoltura-allevamento per venire sprecate in complicate manipolazioni in vista della produzione di gas da cucina al posto della legna da ardere, della cui funzione culturale si è già detto; inoltre la disponibilità di residui vegetali e di acqua nel Sahel è stagionale. Come si vede ai contadini saheliani converrebbe, piuttosto che produrre gas in queste condizioni, acquistare bombole coi redditi addizionali derivati dalla intensificazione delle colture nel quadro dell'associazione agricoltura-allevamento.



### 3. Energia idraulica

Il 28,5% dell'energia elettromagnetica solare disponibile sulla terra comprende un 16% che viene utilizzato nel processo di evaporazione delle acque continentali (fiumi, laghi, evapotraspirazione delle piante) e marine. L'acqua che ritorna sulla terra sotto forma di precipitazioni può essere trasformata in energia idraulica, e questa poi in energia elettrica (dighe idroelettriche, maree) o meccanica (mulini ad acqua, maree).

#### 3.1. Centrali idroelettriche

La quasi totalità dell'elettricità prodotta nei paesi del Sahel proviene da centrali termiche (a gasolio o a vapore) che bruciano prodotti petroliferi importati (olio combustibile). La produzione totale è di 2234 gWh (1981-82) con una media di circa 35 kWh annui per abitante, media molto bassa. Questa produzione corrisponde a un consumo annuo di 546.000 t di prodotti petroliferi, cioè al 20% delle importazioni totali di petrolio. La ripartizione geografica del consumo di energia elettrica è molto ineguale e il consumo annuo pro-capite varia da 10 a 93 kWh secondo i paesi<sup>4</sup>. Infine lo sviluppo delle reti interconnesse è molto limitato e l'elettricità è carissima.

Attualmente l'energia elettrica di origine idraulica non rappresenta che il 31,8% del totale<sup>5</sup> ed è di 712 gWh. Per avere un quadro più esatto dell'energia idroelettrica del Sahel bisognerebbe sottrarre i 478 gWh dell'Etiopia, dove il Sahel si limita a parte dell'Eritrea, e aggiungere 88 gWh per il Mali in previsione dell'entrata in funzione della diga di Manantali fra alcuni anni. Vediamo le prospettive idroelettriche del Sahel come zona geografica tenendo conto delle centrali che potrebbero servirlo senza eccessivi costi di trasporto perché localizzate in queste regioni o a esse prossime:

<i>Fiume</i>	<i>Nome diga</i>	<i>Potenza installabile (mW)</i>
Falémé (Senegal)	Gourbassi	113
Senegal (Mali)	Félou	50
»	Gouina	70
»	Galougo	300
»	Manantali (in costr.)	190
Niger (Mali)	Tossaye	30
»	Kandadji	300
Mékrou (Niger)	?	26
»	dell'Ovest	84
(Non si hanno dati per il Sudan)		<hr/>
		1163

<sup>4</sup> Energia elettrica di origine termica per paese in gWh (1981-82): Senegal 700, Mauritania 99, Mali 81, Burkina Fasso 63, Niger 81, Ciad 63, Sudan 950, Etiopia 197.

<sup>5</sup> Energia elettrica di origine idraulica per paese in gWh (1982): Mali 184, Sudan 50, Etiopia 478.

Si tratterebbe quindi di circa 1000 mW di potenza installata, corrispondenti approssimativamente a una produzione di 4700 gWh, sufficienti alla sostituzione dell'energia termica attuale (2234 gWh) e ai prevedibili bisogni futuri.

Resta il fatto che il problema delle dighe idroelettriche per il Sahel è molto complesso perché influenzato da diversi fattori contraddittori:

- Non avendo il Sahel una vocazione industriale tale da far prevedere una forte espansione di consumi elettrici, la produzione addizionale dovrebbe avere il solo fine di rimpiazzare le centrali termiche esistenti o in progetto, consumatrici di prodotti petroliferi importati.
- Nel Sahel la produzione di energia elettrica appare più come un sottoprodotto della diga che come il fine principale: il valore di una diga sta soprattutto nella possibilità di parziale regolazione delle portate (riduzione delle magre e soppressione delle interruzioni di flusso) e di colture irrigue.
- Su ogni progetto di costruzione di dighe pesa oggi l'incognita dell'evoluzione idrologica a medio e lungo termine dei fiumi saheliani e dei loro principali affluenti; ma nei prossimi anni dovrebbe essere possibile di intravedere se l'attuale caduta idrologica di questi bacini sia o meno un fenomeno irreversibile come fu il caso del Nilo all'inizio del secolo (cap. VIII, 3.1.).
- I costi di investimento delle centrali idroelettriche sono di molto superiori a quelli delle centrali termiche, e ciò tanto più nel Sahel per l'aggravio delle spese di trasporto delle attrezzature e materiali. Ma questo fattore non dovrebbe di per sé giustificare la rinuncia ai relativi progetti. Sono stati fatti dei calcoli comparativi dei prezzi al kWh di origine idroelettrica e termica per centrali grandi e medie<sup>6</sup> che hanno dato i seguenti risultati (Fr. CFA = FF 0,02 del 1978):

	Grandi centrali	Centrali medie
Idroelettriche	13,05	17,05
Termiche a vapore	12,1	—
Termiche a olio combustibile	24,95	24,95

Seguono proiezioni agli anni 1990 e 2000 per dimostrare la concorrenzialità dell'idroelettrico al termico in vista degli aumenti dei prezzi petroliferi. Ma va osservato che: a) le previsioni di aumenti dei prezzi petroliferi fatte nel 1978 non sono più valide anzi siamo in fase di ribasso; b) le dighe idroelettriche nel Sahel hanno una redditività a lungo termine difficilmente valutabile ma certamente importante, considerati i rischi climatici, le possibilità di irrigazione e di regolazione delle portate anche in vista dei trasporti fluviali, per cui l'elettricità è appunto quasi un sottoprodotto; c) le enormi distanze non facendo prevedere possibilità di importazione di energia elettrica più economica dai paesi costieri, l'obiettivo dell'autosufficienza energetica dovrebbe prevalere sulla concorrenzialità del prezzo del kWh termico.

<sup>6</sup> CILSS/Club du Sahel, *L'énergie dans la stratégie de développement du Sahel*, studio Lahmeyer GMBH/ORGATEC/SEMA/Ferguson, 1978.

### 3.2. Piccole centrali idroelettriche e mulini ad acqua

Purtroppo l'orografia piatta del Sahel, l'estrema irregolarità delle portate dei grandi fiumi e l'intermittenza dei corsi d'acqua minori non permettono una diffusione significativa di questi impianti, capaci di fornire preziosa energia meccanica o elettrica (turbine) a piccola scala per i bisogni artigianali o agricoli di singole comunità rurali. Possono però presentarsi casi eccezionali che non andrebbero trascurati: per es. la portata abbastanza regolare del Nilo Bianco dovrebbe in certe condizioni rendere possibile l'uso del mulino ad acqua, e nei massicci del Darfur, del Nuba o dell'Eritrea sono sicuramente adottabili minicentrali idrauliche o idroelettriche che possono accontentarsi di cadute di m 5 (una caduta di m<sup>3</sup> 1 di acqua in condizioni ottimali può produrre elettricità con un'efficienza prossima al 90% nella misura di 2,5 Wh per metro di altezza manometrica)<sup>7</sup>.

## 4. Energia solare

### 4.1. Premesse

Nel Sahel la radiazione totale media annua è di circa 6 kWh/m<sup>2</sup>/giorno, di 5 in parte del Senegal e del Sudan (4 in Italia, 3 nel Nord-Europa). La radiazione diffusa (totale meno la diretta) è di circa 1,5 Wh/m<sup>2</sup>/giorno (come in Europa), ma di 2,5 in parte del Senegal e del Sudan. Come punte estreme di radiazione totale si possono calcolare 5 kWh/m<sup>2</sup>/giorno in gennaio (6 in Ciad e Sudan), e 5-7 in luglio (con gradiente da S a N); espresse in calore siamo su valori di 15-16 kcal/cm<sup>2</sup>/mese in gennaio (con gradiente da N a S), e 21-22 in luglio (con gradiente da S a N).

Con cielo senza nuvole l'ampiezza della radiazione diretta e diffusa varia durante il giorno con l'angolo del sole rispetto allo zenith ed è molto influenzata dal contenuto di vapore acqueo, CO<sub>2</sub> e pulviscolo atmosferico, parametri che sono correlati; questi fattori, come del resto la massa d'aria attraversata (altitudine sul l.d.m.), influenzano anche la distribuzione spettrale delle radiazioni (per es. lunghezza d'onda dell'infrarosso). In sostanza, quando il sole è prossimo allo zenith, la radiazione diretta è 10 volte maggiore di quella diffusa, mentre quando è prossimo all'orizzonte la diffusa è quasi pari alla diretta.

Con cielo coperto la radiazione diffusa supera la diretta in qualsiasi momento del giorno, e il rapporto varia a seconda dell'estensione dell'annuvolamento (in decimi di volta celeste) e dei tipi di nuvole quanto a quota (bassa, media, alta) e struttura verticale (strati, cumuli, cirri). L'energia della radiazione solare può essere recuperata sia sotto forma di calore, che può essere utilizzato direttamente o trasformato in energia meccanica, sia per conversione quantistica direttamente in elettricità o in sostanze chimiche incorporanti quantità importanti di energia (fotosintesi, fotoelettricità).

<sup>7</sup>  $P = \frac{H \cdot Q}{200}$  dove P = produzione in kW; H = altezza manometrica in m netta; Q = flusso in l/s; 200 = costante implicante un'efficienza totale del sistema del 51%, abbastanza tipica delle microcentrali.



#### 4.2. Conversione termica e utilizzazione diretta del calore

È ottenuta mediante collettori atti a scaldare acqua o aria, il cui calore immagazzinato verrà utilizzato altrove. I collettori possono essere piani o a concentrazione: in questo caso si usano i piani.

I collettori piani operano la conversione termica mediante l'«effetto di serra» (De Saussure, 1769) prodotto da una camera avente una piastra nera come fondo, che assorbe la radiazione solare, e sulla quale è disposta una normale lastra di vetro. Quando la temperatura della piastra nera aumenta, questa emette un calore termico maggiorato sotto forma di raggi infrarossi perché la piastra assorbente nella quale scorre il fluido (se si ha riscaldamento di aria questa passerà invece fra la piastra e la lastra di vetro) ha le proprietà del «corpo nero» definito in fisica. I corpi neri migliori hanno un più alto potere non solo di assorbimento ma anche di emissione per tutte le lunghezze d'onda luminose; l'emissione aumenta con la temperatura: mano a mano che aumenta la temperatura del corpo nero la radiazione riflessa progressivamente diminuisce di lunghezza d'onda e aumenta in energia (Legge di Wien:  $\lambda \text{ max. } T = \text{costante} = 2989 \mu\text{m Kelvin}$ ). La lastra di vetro ha un assorbimento spettrale perché il vetro, relativamente trasparente alla luce visibile, è invece assorbente della luce infrarossa emessa dalla piastra quando evacua energia termica; la luce infrarossa assorbita dal vetro è diffusa in tutte le direzioni, quindi una metà verso l'esterno e una metà verso la piastra nera che la riassorbe aumentando ancora la sua temperatura. L'equilibrio è raggiunto quando l'acquisto di energia ottenuto dall'assorbimento della luce visibile è esattamente bilanciato dalla perdita di energia dovuta all'emissione infrarossa della lastra di vetro. Tuttavia l'«effetto di serra» in condizioni ottimali, anche se combinato con una concentrazione della radiazione solare, resta al disotto dei 500°C; ma in pratica vanno considerate le perdite di calore della piastra nera per conducibilità termica e convezione d'aria.

Il corpo nero si ottiene rivestendo la piastra con uno strato di metalli vari (per es. elettrodeposizione di nero di Ni o Be) o ossidi metallici (CuO su Al lucidato, CoO, NiO prodotti chimicamente;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgFe}_2$ , SiO, SiN depositati per vapore); anche il silicio ed altri semiconduttori hanno un alto potere di assorbimento della luce visibile e di trasmissione dell'infrarosso (Si su Ag, Ni su Ag, Tu dendritico, Ni e Cr neri, ecc.).

Esistono diversi tipi di collettori piani alcuni dei quali sono molto semplici, di facile manutenzione, di costo modesto e producibili in serie anche con tecniche artigianali. Hanno il vantaggio di captare bene la radiazione solare sia diretta che diffusa con cielo coperto. Il rendimento è tanto migliore quanto più è modesta la temperatura media a cui si vuol portare il fluido, e diminuisce nel caso contrario: ciò perché la temperatura media e quella di uscita sono regolate dal flusso di calore o velocità di uscita; se il flusso è arrestato si ha la temperatura massima corrispondente all'equilibrio fra radiazione incidente e varie perdite (di radiazione, conducibilità, convezione); a questo punto il calore estratto e l'efficienza sono uguali a zero; se invece il flusso di uscita è rapido, la temperatura media scenderà a un livello prossimo alla temperatura ambiente, ma le perdite parassite saranno minime e l'efficienza del collettore potrà praticamente raggiungere il 100%. Sennonché alta



temperatura con efficienza zero e bassa temperatura con massima efficienza non hanno importanza pratica: il compromesso si situa a temperature di 40-70°C con possibilità fino a un limite massimo di 100°C.

Questo tipo di conversione termica dell'energia solare si chiama produzione di calore 'a bassa temperatura'; è il processo che meglio si adatta alle condizioni del Sahel e che va almeno in questa fase preferito ai collettori piani 'ad alta temperatura'<sup>8</sup>.

Le applicazioni della conversione termica a bassa temperatura sono: riscaldamento di acqua per uso domestico e piscine, riscaldamento di ambienti, condizionamento d'aria, essiccazione, produzione di acqua distillata, cucine solari, conversione termodinamica in energia meccanica o elettrica a basso potenziale (4.3.). Vediamo, in ordine di importanza, le applicazioni che possono essere utili nel Sahel:

a. *Essiccazione.* È senz'altro la più importante perché una lunga esperienza esiste nell'essiccazione diretta ai raggi solari di pesce, carne, tabacco, cipolle, niébé, peperoncini, pomodori e altri prodotti, e inoltre dei mattoni di argilla per il 'banco'. In particolare per il pesce questa tecnica più evoluta di essiccazione consentirebbe di migliorare le condizioni sanitarie e la commercializzazione del prodotto. Per giustificare l'investimento di un essiccatoio solare peraltro si richiede un certo volume e una certa continuità di produzione (pesca lungo i fiumi, cipolle del paese Dogon, tabacco dell'alta valle del Niger in Mali).

Due sono i metodi possibili. Il primo è un collettore solare orientato a sud e collegato con un contenitore ad armadio nel quale vengono disposti i prodotti; l'estremità inferiore del collettore è aperta e funziona da sifone termico aspirando e riscaldando l'aria destinata a circolare nell'essiccatoio uscendo dalla parte superiore (e se manca energia elettrica si può benissimo rinunciare all'ausilio di un ventilatore di circolazione). Il secondo metodo differisce dal primo per il fatto che il riscaldamento dell'aria avviene all'interno di un contenitore montato in fogli di plastica trasparenti con 'effetto di serra' (in sostanza il contenitore funziona da rudimentale collettore).

b. *Produzione di acqua calda.* Si ottiene mediante collettore piano la cui acqua riscaldata risale naturalmente in un serbatoio con isolamento termico in vetrofibra posto sul tetto dell'abitazione: la temperatura dell'acqua può arrivare a 70°C per cui si ritrova al mattino, per bagni o docce, a 40-42°C. La già considerevole diffusione di questo apparecchio in molte città saheliene, in sostituzione dello scalda-

<sup>8</sup> La produzione di calore 'ad alta temperatura', oltre i 100°C, può ottenersi con collettori piani più sofisticati: a) superficie selettiva sulla piastra assorbente realizzata mediante fila di liste verticali riflettenti; b) strato selettivo sulla superficie inferiore della lastra di vetro (per es.  $\text{SnO}_2$ ); c) impiego di 2 lastre di vetro sovrapposte (riduzione delle perdite di calore per convezione d'aria, utile per le regioni ventose; ulteriore riduzione del 25% delle perdite nello spettro infrarosso); d) doppia lastra di vetro con camera sotto vuoto. L'alta temperatura infine si ottiene con collettori a concentrazione orientabili (lineari, parabolici). Ma sono tecnologie per ora non utilizzabili nel Sahel perché troppo sofisticate e adatte ad altri fini perlopiù industriali: fornelli e fornaci solari ad alta temperatura, produzione di gas ad alta temperatura, produzione di vapore, conversione termodinamica in energia meccanica o elettrica ad alto potenziale.

bagno elettrico, è dovuta all'economia di energia cara. Ma lo scaldabagno solare, se nelle abitazioni è semplicemente utile (perché nel Sahel la doccia fredda va bene in qualsiasi stagione), diventa necessario nel caso di maternità, dispensari e piccoli centri sanitari dove manca energia elettrica, e anche se questa è disponibile.

Almeno nei climi caldi infatti lo scaldabagno solare è decisamente competitivo con quello elettrico: per scaldare a 100°C, a partire da 20°C, 200 l d'acqua occorrono 9 kWh; per ottenere il medesimo risultato con un'efficienza del 50% occorrerebbe un collettore solare di m<sup>2</sup> 4 che costerebbe circa Lire 800.000 (1984), ma va osservato che non ci sono spese di manutenzione per un periodo lunghissimo (forse di 10 anni) e che il prezzo è di produzione artigianale, non di serie: in Giappone lo scaldabagno di 200 l a tubi nel collettore stesso costa sulle 480.000-640.000 Lire e ve ne sono oltre un milione.

c. *Condizionamento d'aria.* Questa applicazione potrebbe eventualmente interessare solo abitazioni europee o uffici pubblici occupati da funzionari ancora in crisi di acculturazione coloniale, per i quali una temperatura polare nel loro ufficio rappresenta uno 'status symbol', dato che i Saheliani veri e propri (e chi scrive può essere annoverato fra questi) prendono il raffreddore o il mal di gola a temperature inferiori ai 25-26°C. Tenuto conto di ciò si possono senz'altro scartare i sistemi di condizionamento termico più complessi che creano problemi tecnici ed economici: è il caso dei collettori termici combinati con un sistema refrigerante per ciclo di compressione di vapore (che comprende un compressore), o per assorbimento (che richiede una pompa).

L'unico metodo semplice e poco costoso adatto al Sahel è quello della refrigerazione per evaporazione d'acqua. L'aria calda e secca dell'ambiente è condotta su superfici bagnate dove perde il calore destinato all'evaporazione dell'acqua: si ottiene un'aria meno secca e più fresca, e questo metodo, a differenza dei sistemi intensivi a ciclo chiuso, permette di tenere alcune finestre della casa aperte (è un sistema di circolazione d'aria 'aperto'). Con clima umido (ma nel Sahel l'umidità della breve stagione piovosa è molto relativa) occorrerà una preventiva deumidificazione adiabatica dell'aria, con un collettore piano per la deumidificazione del materiale disseccante, dopo di che l'aria secca più calda sarà passata per uno scambiatore di calore dal quale uscirà nuovamente umidificata a 17°C.

d. *Acqua distillata.* Una buona acqua potabile contiene una mineralizzazione dello 0,05% e la tolleranza può arrivare a non oltre lo 0,15% (media dell'acqua di mare 3,44%, Baltico 0,7%, Golfo Persico 4,3%). La necessità della dissalazione dell'acqua per renderla potabile può presentarsi non solo in certe località delle coste marittime, ma parimenti in molte località dell'interno dove è solo disponibile acqua sotterranea salmastra, il cui contenuto minerale può essere dello 0,2-0,5%.

Un processo di dissalazione ideale sarebbe una distillazione a mezzo di vapore a 120°C con condensazione a 30°C, ossia con efficienza del 25%, il che richiederebbe un apporto termico di 3,7 kWh/m<sup>3</sup> di acqua marina (compreso il pompaggio dell'acqua). In pratica però gli impianti di distillazione lavorano con 65 kWh/m<sup>3</sup> a un'efficienza dell'1,5%. I distillatori solari hanno un'efficienza inferiore allo 0,1%

e il loro funzionamento è paragonabile a una turbina a vapore (ciclo Rankine): l'acqua salmastra che assorbe la radiazione solare agisce come evaporatore e la lastra di vetro superiore opera da condensatore; un'efficienza maggiore può ottenersi aumentando la temperatura dell'acqua salata attraverso una introduzione lenta in quantità minima (oppure usando collettori a concentrazione, soluzione costosa da scartarsi).

Il distillatore solare è molto semplice: bacino che riceve l'acqua salmastra — volta in vetro a tetto con effetto di serra — evaporazione dell'acqua e condensazione sulle facce interne della lastra di vetro — scolatura fino alla base del tetto dove l'acqua dolce è raccolta in canaletti fuoriuscenti (l'acqua salata concentrata fuoriesce per altra via); il bacino deve essere a isolamento termico (sabbia asciutta, cemento all'asbesto) e di color nero (asfalto, vernice nera, pietra vulcanica); l'acqua può essere introdotta di notte per sfruttare il calore dell'intera giornata e bisogna evitare una troppo alta concentrazione di sale.

Si pongono evidentemente problemi di costo. Un distillatore solare operante con una radiazione media equivalente a  $6 \text{ kWh/m}^2$  produce giornalmente solo 1,4 di acqua potabile per ogni  $\text{m}^2$  di superficie del bacino, al costo di Lire 98.000 (1984); un impianto convezionale a compressione di vapore comporterebbe per ogni  $\text{m}^3$  di acqua potabile un investimento di circa 30 volte inferiore, ma se si considerano le spese di esercizio il costo dell'acqua dolce verrebbe a essere di sole 5 volte inferiore a quello del distillatore solare. Naturalmente l'efficienza di un processo di dissalazione può essere migliorata con l'aumento della temperatura dell'acqua, per cui, se il volume dei bisogni di acqua dolce lo impone, si può ricorrere alla utilizzazione combinata dell'energia solare con un impianto di distillazione convezionale ad alta efficienza: un generatore solare a fotocellule può fornire elettricità a un impianto di dissalazione per compressione di vapore o a un impianto di elettrolisi. Gli impianti a compressione di vapore (che producono acqua dolce con circa  $12 \text{ kWh/m}^3$  tendono oggi a essere sostituiti dagli impianti di dissalazione a molti stadi, ma gli uni e gli altri sono troppo complessi e prematuri per uso nel Sahel. Gli impianti di elettrolisi invece, sebbene anch'essi complessi, possono essere presi in considerazione in circostanze appropriate perché hanno un costo di esercizio concorrenziale solo con salinità non eccedente il 0,4%, ma le acque salmastre sotterranee continentali sono appunto a questo livello.

Si può concludere che a tutti gli effetti pratici e a medio termine il processo di dissalazione più semplice e meno costoso per il Sahel sia quello del collettore piano a bassa efficienza, e ciò anche considerando che le superfici dei collettori non sarebbero proibitive dato lo spazio sempre disponibile: un collettore di  $10 \times 100$  potrebbe produrre giornalmente  $\text{m}^3$  4 di acqua dolce, sufficiente per una popolazione di 260 persone.

### 4.3. Conversione termodinamica

#### 4.3.1. PREMESSE

È una conversione di radiazione solare in calore e successivamente in energia meccanica (motore a pistone) e elettrica (turbina a vapore) in un processo termo-



dinamico (che in condizioni ottimali è un processo Carnot). Il problema principale sta nell'ottenere una temperatura abbastanza alta dell'acqua proveniente dal collettore solare in quanto l'efficienza è data dalla differenza di temperatura tra la fonte calda e la fonte fredda (funzione di  $\Delta t$ ), la quale ultima non è modificabile perché in genere è rappresentata da acqua sotterranea di pozzo<sup>9</sup>. La necessità di un'alta temperatura della fonte calda ha indotto allo studio di vari tipi di collettori e impianti che sono in funzione in diversi paesi. In particolare si è cercato di ovviare alla bassa efficienza del collettore piano con varie formule di collettore a concentrazione di cui esistono 2 grandi famiglie:

- Collettore con assorbitore lineare: superficie riflettente a specchio parabolico rettilineo; superficie riflettente a specchio sfaccettato in serie di nastri longitudinali (piani o convessi).
- Collettore con assorbitore centrale: superficie riflettente a specchio parabolico con assorbitore innestato al centro; superficie riflettente formata da eliostati intorno a un assorbitore a torre.

Peraltro se i collettori a concentrazione possono trasmettere all'assorbitore temperature superiori ai 100°C, fino ai 500-600°C, presentano rispetto ai collettori piani diversi svantaggi: possono sfruttare solo la radiazione solare diretta (non quella diffusa), per cui devono essere automaticamente orientati in modo da seguire ora per ora e giorno per giorno il movimento del sole, dall'alba al tramonto, dagli equinozi ai solstizi e viceversa. Vediamo i diversi tipi di generatori termodinamici.

#### 4.3.2. GENERATORE A COLLETTORE PIANO

Il collettore è montato su supporto rigido orientato a sud a un angolo rispetto all'orizzonte non molto diverso dalla latitudine del sito: per es. per avere il massimo rendimento l'angolo sarà di 20° superiore alla latitudine in inverno e di 20° inferiore in estate. Il calore del collettore è trasferito a un gas di lavoro che aziona un motore termico accoppiato a un pistone per il pompaggio dell'acqua o a una turbina con alternatore per la produzione di elettricità che a sua volta potrà azionare la pompa.

<sup>9</sup> Rendimento di Carnot:  $WQ \frac{t_2 - t_1}{t_1 + 273} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \times 100$  dove  $WQ$  è la quantità di  $W$  prodotta ( $Q$  = carica elettrica in eccesso presente in un conduttore),  $t_2$  la fonte calda,  $t_1$  la fonte fredda, 273 i gradi Kelvin assoluti.

Esempi di rendimenti comparativi in % ( $\Delta t$  è la funzione della differenza di temperatura):

- |  |   |
|--|---|
| — Generatore solare termodinamico: $\Delta t = 60^\circ/30^\circ$        | $\frac{60 - 30}{60 + 273} = \frac{30}{333} = 9\%$ |
|  | $\Delta t = 70^\circ/20^\circ$ 14 %               |
| — Impianti di conversione ad acqua marina: $\Delta t = 28^\circ/5^\circ$ | 7 %   |
| — Macchine a vapore moderne: $\Delta t = 300^\circ/40^\circ$             | 48 %  |
| — Certe turbine a gas: $\Delta t = 1000^\circ/40^\circ$                  | 76 %  |

Da notare che un motore a bassa temperatura di 10 kW non può essere paragonato a un motore diesel di 13,5 hp, perché i 10 kW solari sono un'energia idraulica netta da perdite, mentre i 10 kW diesel, generalmente calcolati all'albero motore, subiscono perdite meccaniche: ai 10 kW solari possono equivalere 14-28 kW diesel (20-40 hp).



Il calore ottenuto dal collettore, trasportato dall'acqua circolante a circuito chiuso, viene scambiato con un secondo circuito chiuso nel quale circola un fluido organico come il Butano o il Freon ( $\text{SF}_2$ ). Il Freon evapora a  $65^\circ\text{C}$  e aziona il pistone di un particolare modello di macchina a circa 200 giri/minuto (tale velocità di rotazione non consente l'uso di un alternatore la cui velocità deve essere regolata secondo la frequenza desiderata). Il vapore è poi condensato in un secondo scambiatore di calore dove il raffreddamento è ottenuto dall'acqua pompata dal pozzo. L'energia meccanica sviluppata dal motore è trasmessa mediante un albero a una pressa idraulica che aziona una pompa immersa con sistema di trasmissione idraulico. Questo modello di motore a pistone sviluppa 1 kW di energia meccanica con un collettore di  $70 \text{ m}^2$  funzionando per circa 5 ore al giorno, beninteso in climi tropicali a grande radiazione solare<sup>10</sup>. Ne sono stati installati diversi in vari paesi saheliani senza presentare particolari problemi di manutenzione. Il prezzo è di circa Lire 38 milioni (1984) e con un ammortamento annuo dell'8% si ha un costo dell'acqua pompata da m 20, di circa 358 Lire/ $\text{m}^3$ , costo già competitivo rispetto ai motori diesel in regioni dell'interno dove la manutenzione è problema quasi insolubile (si può calcolare che il costo annuo di manutenzione di un diesel di 10 hp può raggiungere Lire 35 milioni, cui si devono aggiungere i costi di ammortamento e di combustibile) (Fig. 1).

Il Freon può essere utilizzato per azionare, invece che un pistone, una turbina a vapore accoppiata a un alternatore che converte l'energia meccanica in energia

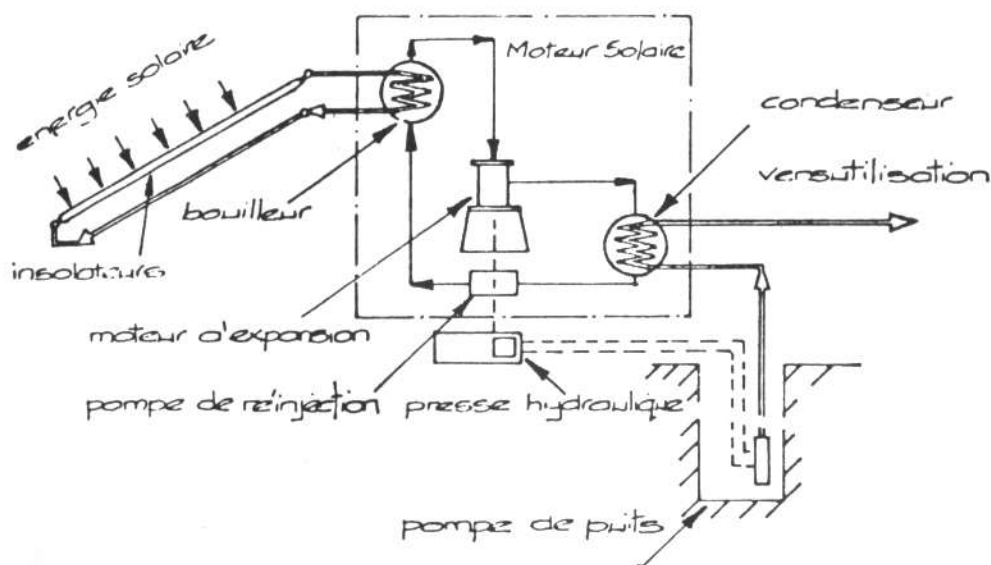


Fig. 1. Disegno schematico del motore solare termodinamico (7 kW).

<sup>10</sup> Il prototipo, installato nel 1967 a Dakar dai prof. Henri Masson e Jean-Pierre Girardet, con motore a pistone di 1 kW, pompava da 40 m  $6 \text{ m}^3$  di acqua in 6 ore giornaliere con collettore di  $\text{m}^2$  12; il rendimento di Carnot era di 8,5% teorico e 5% effettivo.

elettrica per pompaggio di acqua o altri usi. Il motore a turbina e alternatore con collettore piano è adatto a produzioni di energia elettrica molto superiori, di 25-100 kW (il motore installato a Diré in Mali nel 1982 sviluppa 80 kW). Nonostante la bassa efficienza (1-3%) si potrebbero teoricamente concepire anche motori di 1 mW con collettore di 5 ha ( $m\ 100 \times 500$ ), se non fosse per i problemi connessi a tali dimensioni, in particolare le complicazioni relative alla bassa efficienza e al trasporto del calore su distanze lunghe (Fig. 2).

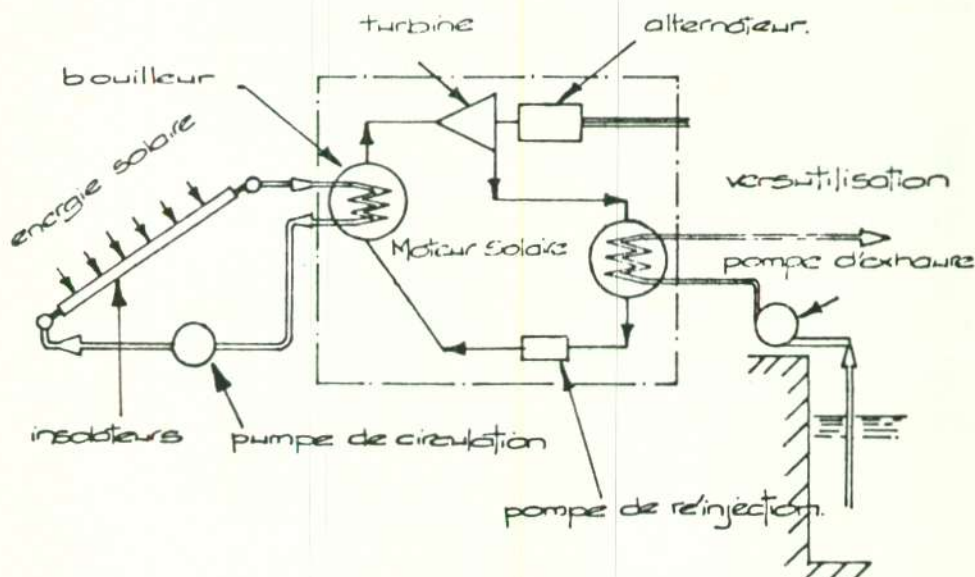


Fig. 2. Disegno schematico del turbo-alternatore solare termodinamico (50 kW).

Per quanto riguarda i collettori piani è certo dunque che la loro estrema semplicità è tale da dare buon affidamento. Resta però il fatto che l'efficienza complessiva dell'insieme è molto bassa per l'incompatibilità del modello di collettore con un motore termico: per massimizzare l'efficienza del motore bisognerebbe avere nell'acqua che esce dal collettore una temperatura più alta possibile, ma come si è detto (4.2.) a temperature alte l'efficienza del collettore è minore; diamo qui appresso un paragone delle diverse efficienze (Fig. 3). A un'intensità massima di radiazione ( $1\text{ kW/m}^2$ ) e con una temperatura di uscita di  $60^\circ\text{C}$ , facilmente ottenibile con collettori a piastra nera di basso costo, si può supporre un'efficienza del collettore del 50%; tenendo presente che l'efficienza ideale di Carnot è funzione della temperatura della fonte calda, e che supponiamo quella della fonte fredda di  $30^\circ\text{C}$ , si potrebbe arbitrariamente concludere che il motore termico utilizzato in pratica abbia un'efficienza del 70% rispetto a quella ideale. Ma ciò non è il caso se si tiene conto di tutto.

Combinando l'efficienza del collettore con quella del motore otteniamo un'efficienza globale del sistema come funzione della temperatura di uscita dal collettore che può essere variata regolando il ritmo di estrazione dell'acqua calda: si constata che una temperatura di uscita di  $60^\circ\text{C}$  nelle condizioni supposte rappresenta l'optimum,

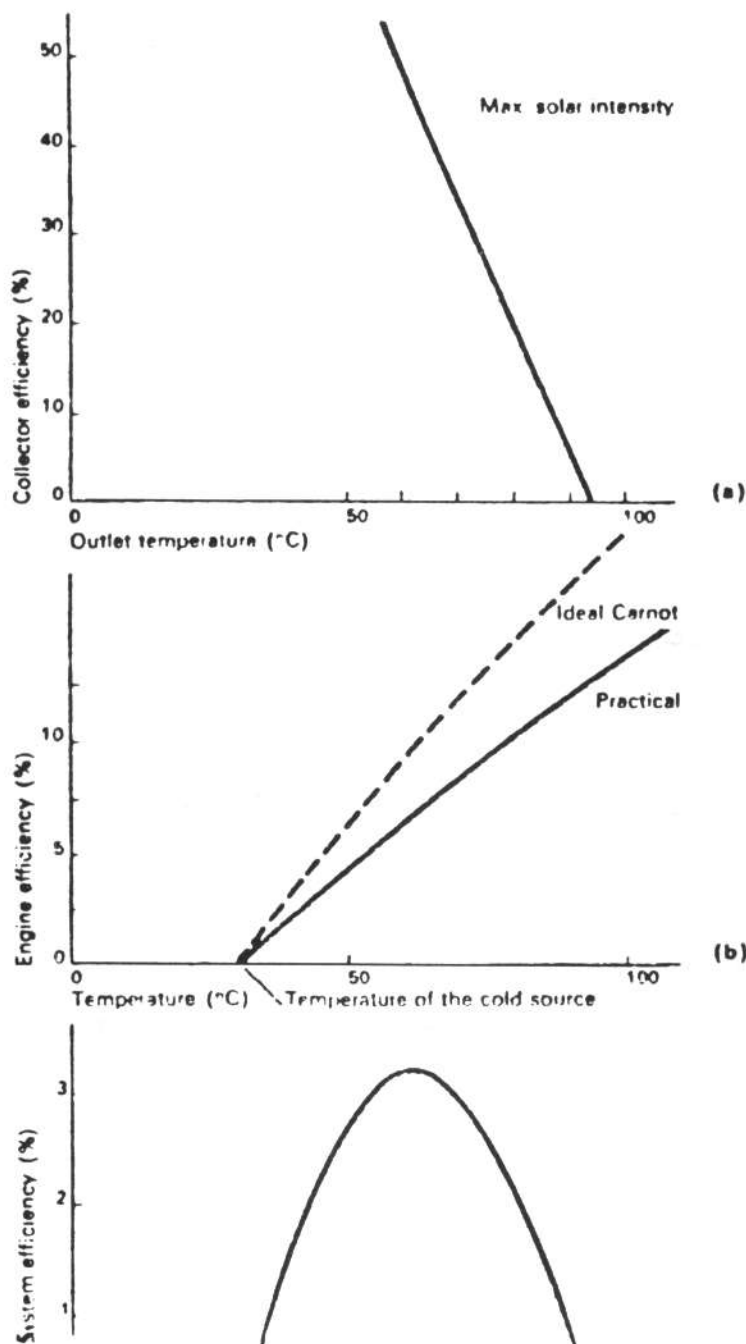


Fig. 3. Efficienza di un generatore a collettore piano. (a) Efficienza tipica di un collettore piano a piastra nera a radiazione solare massima. (b) Efficienza tipica di un motore meccanico al 70% dell'efficienza ideale di Carnot (fonte fredda a  $30^{\circ}\text{C}$ ). (c) Efficienza globale del sistema (non tenuto conto degli scambiatori di calore).

con la riserva peraltro che tali efficienze sono raggiunte solo con radiazione solare massima. L'efficienza media del sistema può essere determinata tenendo presente la dipendenza dell'efficienza del collettore dall'intensità luminosa; questo rapporto va applicato alle variazioni di intensità della radiazione solare che in condizioni di cielo sereno segue una legge di coseno dovuta al fatto che il collettore è fisso; diamo qui appresso le variazioni di intensità luminosa dal mezzogiorno al tramonto, le variazioni mattutine essendo simmetriche a questa curva (Fig. 4). Supponendo un'efficienza massima di conversione del 50% per una temperatura di uscita costante di

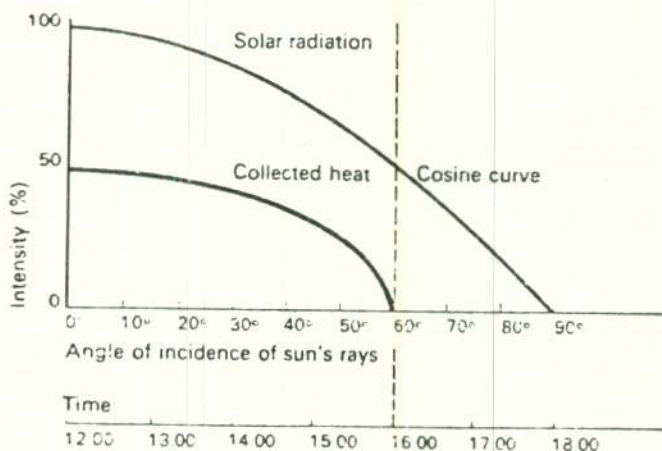


Fig. 4. Radiazione solare ricevuta da un collettore piano agli equinozi e calore raccolto dalla piastra nera.

60°C, un'efficienza di conversione media di circa il 38% può essere calcolata per l'insieme del pomeriggio (1,5 kWh dei 4 kWh della radiazione incidente). Rispetto a un collettore orientato uno fisso produce circa la metà dell'energia; in pratica però la differenza è minore perché i collettori mobili sono più influenzati dalle perdite dovute all'atmosfera nelle ore serali; inoltre la semplicità del collettore fisso compensa bene i vantaggi di quello orientato.

Tutto ciò dimostra che l'efficienza media della conversione deve essere inferiore al 3,2%, massimo determinabile in base alle variazioni della radiazione; ciò significa che con un'efficienza media del collettore del 38%, l'efficienza totale del sistema cade al 2,4%; essa si riduce ancora all'1,5% circa considerando l'energia perduta al mattino per l'inerzia termica dei collettori; se si aggiungono infine le perdite degli scambiatori di calore si può concludere per un'efficienza reale dell'1,3%. Quanto ai collettori piani ad alta temperatura più sofisticati, come si è detto<sup>11</sup>, la loro adozione potrebbe concepirsi in certi casi solo in una seconda fase in base ai progressi compiuti dalla tecnologia locale.

<sup>11</sup> Vedi n. 8.



Inutile dire che tutti gli altri tipi di generatori termodinamici non possono essere presi in considerazione in ambiente saheliano: alludiamo in particolare ai generatori con collettore parabolico lineare, agli impianti a torre con collettore a eliostati, agli specchi parabolici. Ciò non solo per la loro complessa tecnologia e l'altissimo costo, ma anche perché, tutto sommato, il collettore piano è il più conciliabile con le difficoltà ambientali come si vede dalla tabella che segue (Fig. 5) dalla quale in particolare si rileva che: a) il collettore piano, la cui efficienza è la più bassa, è più conveniente dei collettori a concentrazione per tutti gli aspetti eccetto che per l'impianto idraulico di trasporto di calore (tubazioni); b) i collettori a specchio paraboloidale sono i meno convenienti per tutti gli aspetti eccetto che per il livello di calore fornito.

Molto si è discusso sui pregi e difetti rispettivi dei generatori termodinamici e fotovoltaici. Da parte nostra siamo di avviso che l'esperienza acquisita finora sul terreno induce senz'altro a preferire i fotovoltaici; ciò in quanto i termodinamici necessitano di una assistenza tecnica qualificata più o meno continuativa, il che equivale a limitare il loro impiego ai grandi centri, in sostanza alle sole capitali. Questa conclusione è fra l'altro corroborata dai problemi insorti in 4 impianti termodinamici recentemente installati: in Niger sul fiume Niger (13 kW), in Mali a Diré (80 kW), in Senegal a Matam (25 kW) e Diakao (25 kW).

	Collettore piano	Lineare parabolico	Lineare sfaccettato	Torre con eliostati	Specchio paraboloide
Efficienza impianto per area collettori (%)	1-2,5	6-10	6-10	6-10	12-18
Area di terreno occu- pata (%)	90	30	30	30	30
Efficienza impianto per area occupata (%)	0,9-2,3	2-3,5	2-3,5	2-3,5	4-6
Costo stimato al m <sup>2</sup> per collettore (migliaia di Lire del 1984)	164-238	328-820	328-820	230-656	656-1640?
Orientamento	nessuno	1 asse	1 asse	2 assi	2 assi
Tubazioni trasporto di calore (coll. piano = 1)	1	0,5	0,5	zero	0,2
Sensibilità alla foschia	bassa	alta	media	media	altissima
Sensibilità alle nubi	media	altissima	altissima	altissima	altissima

Fig. 5. Tabella comparativa dei dati relativi ai diversi tipi di collettori solari per generatori termodinamici.

#### 4.4. Conversione fotovoltaica

##### 4.4.1. LE CELLULE SOLARI

La conversione diretta della luce solare in energia elettrica si ottiene con le 'cellule solari' in un processo impropriamente chiamato 'effetto fotovoltaico'. Da notare che esso non dipende in alcun modo dal calore perché l'efficienza delle cellule in realtà diminuisce con l'aumento della temperatura (l'efficienza massima è stata registrata nelle basi scientifiche dell'Antartico); ciò è dovuto al fatto che i fotoni della luce solare trasferiscono l'energia direttamente agli elettroni senza intermediario sta-

dio termico. Di conseguenza le cellule solari sono adatte non solo alle regioni tropicali a forte insolazione, ma altresì alle regioni equatoriali o temperate a insolazione minore o saltuaria, perché contrariamente ai collettori dei generatori termodinamici sfruttano la luce diffusa anziché la radiazione diretta e conservano la stessa efficienza con cielo coperto o nuvoloso.

L'effetto fotovoltaico può ottenersi con tutti i semiconduttori; gli isolatori non sono adatti per la loro bassa conduttività, mentre i metalli sono insensibili alle luce per la forte concentrazione di elettroni nell'oscurità. I semiconduttori più appropriati sono i più sensibili, che danno il voltaggio più alto per luce visibile, perché la maggior parte dell'energia trasmessa dai raggi solari è appunto nella parte visibile dello spettro; semiconduttori come PbS, sensibili alla luce infrarossa, non sono quindi adatti e sono utili solo per rivelare l'infrarosso; inadatto è parimenti il ZnS, la cui massima sensibilità è per l'ultravioletto.

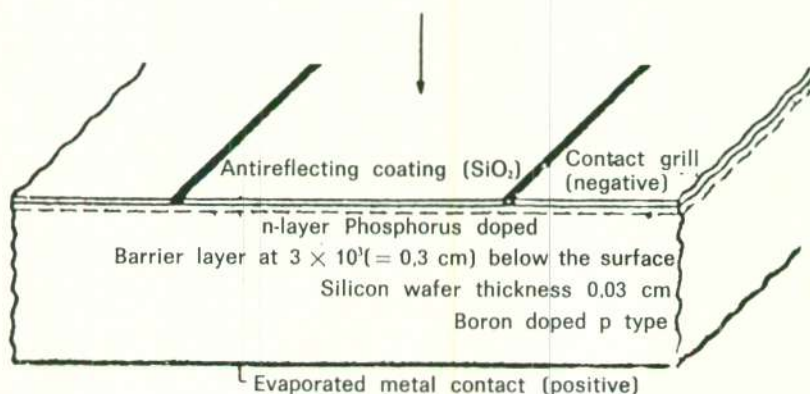


Fig. 6. Sezione schematica di cellula solare convenzionale al silicio (secondo W. PALZ, in *Solar Electricity*, Butterworths, UNESCO).

Il semiconduttore più importante è il silicio. Le attuali cellule comuni a basso costo per uso terrestre sono rotonde o quadrate (cm 10 di diametro o di lato) e sono segate da barre di materiale multicristallino a grana grossa all'uscita dalla fusione dopo raffinazione del silicio estratto per trattamento chimico dalle sabbie. Sono come cialde sottilissime il cui spessore non arriva a mm 0,4 e si compongono essenzialmente di 2 elementi: la faccia anteriore è uno strato di silicio drogato al fosforo, di tipo negativo, con rivestimento antiriflettente di  $\text{SiO}_2$ , sul quale corre la griglia di contatto negativo; la faccia posteriore è uno strato di silicio drogato al boro, di tipo positivo, al di sotto del quale un rivestimento di metallo evaporato forma il contatto positivo; nell'area di giunzione fra i due strati, ossia nella 'barriera' negativo/positivo, si forma un campo elettrico. La cellula solare è infatti un diodo a semiconduttore, cioè fondato sulla diversa conduttività nei due sensi di superfici di contatto fra particolari sostanze; ed essendo i diodi di bassa potenza, per ottenere potenze maggiori occorre associarli in serie e in parallelo (Fig. 6).

Il funzionamento della cellula riposa dunque interamente sulle differenti proprietà elettroniche acquisite dal silicio quando atomi di particolari sostanze vengono inseriti nel suo reticolo cristallino mediante il drogaggio. Dove gli atomi hanno più elettroni del silicio di base l'insieme che si crea conterrà elettroni liberi in eccedenza e sarà di tipo negativo (N); al contrario il drogaggio con atomi aventi meno elettroni del silicio di base crea un insieme che conterrà spazi vuoti o 'buchi' e sarà di tipo positivo (P). Quando un fotone, particella di luce di sufficiente energia, urterà un atomo, gli sottrarrà un elettrone lasciando al suo posto un 'buco'; presso la giunzione l'elettrone sarà accelerato dal campo elettrico e potrà arrivare nella zona di tipo N, mentre la carica positiva (buco) acquistata dall'atomo si propagherà verso la zona di tipo P. In questo modo una tensione elettrica si creerà dalle due parti della giunzione. La presa di corrente si farà sulla faccia anteriore con la griglia di contatto dalla superficie da essa non coperta, e sulla faccia posteriore dalla intera superficie della cellula; si avrà così un circuito di corrente esterno di potenza commisurata al numero di cellule associate in serie e in parallelo.

Come si vede l'elemento essenziale per l'effetto fotovoltaico è appunto la giunzione, ossia la 'barriera', che conferisce alla cellula le caratteristiche del diodo nell'oscurità. Col flusso di fotoni della luce solare la cellula può considerarsi una fonte di corrente variabile a tensione fissa; dal punto di vista elettrico si comporta come un generatore di corrente montato in parallelo con un diodo  $D$  e una resistenza  $R_{sh}$  (resistenza 'shunt' o di derivazione); o montato in serie con un'altra resistenza  $R_s$  (resistenza di serie). I valori rispettivi di questi elementi determinano l'efficienza della cellula, in particolare la curva corrente/tensione,  $I = f(V)$ ; alla luce solare questa curva mantiene la stessa forma della curva nell'oscurità, ma con la differenza che viene derivata verso l'asse di corrente negativa; si stabilirà così un voltaggio di circuito di intensità sull'asse di corrente negativa. La curva corrente/voltaggio è spostata verso l'asse di intensità di corrente con variazione lineare in funzione dell'intensità luminosa, per cui si avrà: da una parte una dipendenza lineare dall'intensità luminosa del corto circuito di corrente, e dall'altra un aumento in funzione logaritmica con l'intensità luminosa del voltaggio di circuito aperto<sup>12</sup>.

La potenza massima ( $P_{max}$ ) si ottiene da una cellula ottimizzando il prodotto corrente/voltaggio (corrente nominale  $I_L$ /tensione nominale  $V_L$ ), e a questo punto

<sup>12</sup> Nell'oscurità il campo elettrico della giunzione si oppone al passaggio della corrente: se si applica un voltaggio esterno in senso inverso il campo si rafforza come l'efficacia della 'barriera' contro il flusso di elettroni, così che la corrente non può aumentare col voltaggio; se si applica un voltaggio esterno in senso diretto, il voltaggio interno è progressivamente compensato dall'esterno agente in senso inverso, così che la corrente diretta aumenta fino a superare il voltaggio interno, punto al quale la 'barriera' non è più di ostacolo al suo passaggio. Quando il diodo è illuminato, e gli elettroni liberati subiscono l'effetto del campo interno che li spinge nel suo senso, si genera una fotocorrente in senso inverso rispetto alla corrente nell'oscurità: anche se non si applica alcun voltaggio esterno, essa continua a passare, misurata come corrente di corto circuito; varierà linearmente con l'intensità luminosa perché con l'assorbimento di fotoni un sempre maggior numero di elettroni verrà esposto alla forza del campo interno; la fotocorrente non è influenzata dal voltaggio applicato. Le condizioni di voltaggio a circuito aperto sono raggiunte quando la fotocorrente è bilanciata da una corrente diretta di oscurità, associata a un fotovoltaico generatore di corrente diretta operante esattamente come un voltaggio applicato dall'esterno.



corrisponde un voltaggio massimo che sarà leggermente inferiore al voltaggio di circuito aperto; il punto a tensione nulla essendo quello del valore di corrente massimo (corrente di corto circuito ICC), il punto a corrente nulla quello della tensione massima (tensione di circuito aperto). Per le cellule al silicio a temperatura ambiente e con intensità luminosa massima i voltaggi tipici di circuito aperto sono intorno a 550-600 mV (0,55-0,6 V), e le intensità di corto circuito sono intorno alle 30 mA/cm<sup>2</sup> (Fig. 7). La flessione della potenza massima con l'aumento della temperatura, di cui si è detto, rappresenta solo una perdita del 0,35-0,45% per ogni °C di aumento (12% fra 20 e 50°C); è dovuta principalmente a una diminuzione del voltaggio di circuito aperto, perché la temperatura ha poca influenza sull'intensità (la corrente di corto circuito aumenta).

L'efficienza di una cellula solare può definirsi come il rapporto fra l'energia elettrica ottenibile al punto massimo della curva corrente/voltaggio e la luce incidente. Con la luce visibile monocromatica (per es. raggio giallo o verde) l'efficienza massima teorica è del 45-50%, ma le efficienze ottenute con la luce solare sono minori perché lo spettro va dall'ultravioletto all'infrarosso e le cellule al silicio sono insensibili al di là della parte visibile dello spettro e di un piccolo margine dell'infrarosso. La luce massima al livello del mare è circa di 1 kWh/m<sup>2</sup>. Nelle condizioni del Sahel l'efficienza teorica con intensità luminosa massima è circa del 23% o poco al di sotto; si può comunque contare su efficienze pratiche superiori al 16% perché si sono già ottenute in laboratorio efficienze del 18-19%, prossime a quelle teoriche.

#### 4.4.2. IL GENERATORE FOTOVOLTAICO

L'elemento di base è costituito dal 'modulo' solare che comprende un certo numero di cellule associate in serie e in parallelo e la cui potenza dipende da questo numero. Per raddoppiare il voltaggio 2 cellule sono collegate 'in serie' giungendo il contatto N anteriore dell'una col contatto P posteriore dell'altra mediante filo o linguetta; per raddoppiare la potenza (W) a voltaggio costante vengono giunti i 2 contatti anteriori per la produzione negativa e i 2 posteriori per la positiva con un collegamento che sarà allora 'in parallelo'. Si può così ottenere in un modulo qualsiasi potenza e qualsiasi voltaggio. Per assicurare la massima speditezza e flessibilità nel montaggio di generatori di diversa potenza secondo le necessità di impiego i moduli sono oggi prodotti in serie per tutti i principali voltaggi commerciali (V 1,5, 6, 12, 24, 48). I moduli vengono poi montati in 'pannelli' di varie misure sostenuti ciascuno dal loro supporto metallico, e un generatore può avere un pannello o molte decine <sup>13</sup>.

<sup>13</sup> È importante far bene combaciare le caratteristiche elettriche delle cellule associate nel modulo. Le cellule collegate in parallelo devono avere lo stesso voltaggio di circuito aperto e in particolare lo stesso punto massimo di tensione; le cellule collegate in serie devono avere la stessa intensità di corrente di corto circuito e lo stesso punto massimo di intensità. Se queste caratteristiche non combaciano si avranno moduli difettosi nei quali le cellule con fotocorrente e fotovoltaggio più alti dissipano potenza nelle cellule a prestazione elettrica inferiore, per cui il rendimento del modulo è limitato dalle cellule di minore efficienza e ulteriormente ridotto dall'aumento di temperatura conseguente alla dispersione interna di



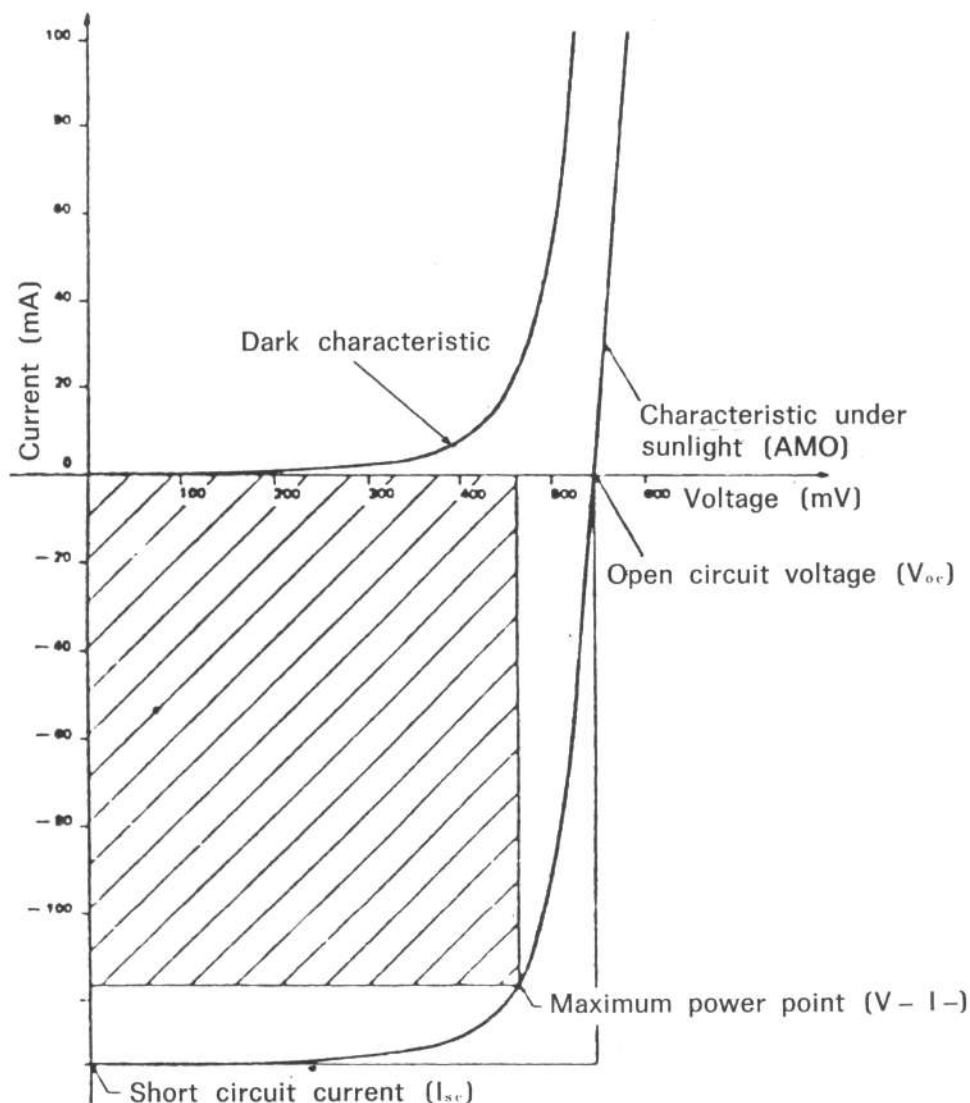


Fig. 7. Caratteristiche intensità/voltaggio di una cellula solare tipica di  $cm\ 2 \times 2$  a piena illuminazione fuori dell'atmosfera (secondo W. PALZ, in *Solar Electricity*, Butterworth, UNESCO).

energia. Per ovviare a inconvenienti di questo tipo i raccordi elettrici dei moduli fra loro e con gli altri componenti del generatore fotovoltaico (regolatore di carico, eventuali accumulatori, ecc.) vengono protetti soprattutto in due modi: a) diodi antiritorno, che proteggono le cellule contro lo scarico delle batterie attraverso i moduli durante la notte, e contro la circolazione di corrente inversa nella parte del modulo a minore potenza in caso di squilibrio di tensione (talora questi diodi sono incorporati nel regolatore di corrente); b) diodi by-pass, che proteggono le cellule contro fenomeni di surriscaldamento per accidentali mascherature di parti del pannello (ombreggiamento, detriti vegetali, sporcizia).

Dato che i moduli di cellule sono fragili, devono essere protetti da ambo i lati con materiali solidi aventi lo stesso coefficiente di espansione termica e una buona compatibilità col silicio, come il vetro e la plastica. Per il lato superiore il vetro ha il vantaggio di immutabili proprietà ottiche, meccaniche ed elettriche per lunghi periodi; i polimeri invece, anche se sono più leggeri del vetro e non possono spaccarsi, non impediscono la penetrazione dell'umidità per cui parti e giunzioni metalliche devono essere trattate con anticorrosivi, e possono perdere trasmissività alla luce e poteri tensili dopo lunga esposizione (in Kenya è stato scoperto un insetto plasticofago). Tutto ciò considerato, si dà oggi la preferenza per la faccia anteriore al vetro temprato con basso tenore di ferro e alto coefficiente di trasmissività luminosa, e per la faccia posteriore, dove non occorrono proprietà ottiche, a un complesso impermeabile multistrato di metallo e film sintetico; oppure, per ambedue le facce, a un doppio vetro con strato intermedio di resine (bi-vetro).

I pannelli sono montati su supporti rigidi in leghe di alluminio anodizzate e vanno orientati a sud con un'inclinazione prossima all'angolo di latitudine; generalmente si prevedono 3 diverse inclinazioni (solstizio di inverno, equinozi e solstizio di estate) che possono essere modificate 4 volte all'anno spostando pioli su fori negli assi del supporto. Devono inoltre essere difesi il meglio possibile dalle alte temperature (aerazione naturale e convezionale, assenza di superfici metalliche scure o altri assorbitori di calore, ecc.). Vanno infine tenuti puliti da polvere, sabbia, foglie secche, detriti vegetali vari, e a questo fine quando necessario uno straccio umido farà all'uopo.

Gli attuali generatori fotovoltaici possono avere oltre agli elementi citati (moduli di cellule e pannelli di moduli sui loro supporti) anche altri componenti:

- a. *Scatola di giunzione*, elemento necessario e sempre presente.
- b. *Accumulatori*, non necessari se il generatore è impiegato per pompaggio di acqua (perché l'accumulatore sarà idraulico, con serbatoio a fior di terra o sopraelevato), ma indispensabili se si deve assicurare il funzionamento anche notturno di apparecchi elettrici, circa i quali una delle priorità è oggi rappresentata dalle esigenze dei centri sanitari, come frigorifero, condizionamento d'aria in sala di rianimazione, lampada chirurgica, ecc. (vedasi l'ospedale di San in Mali, con generatore di 9,4 kW). Vari sono i tipi di batterie utilizzati (piombo a tenuta stagna, monoblocco, ecc.); il fotovoltaggio al suo punto massimo deve essere uguale al voltaggio di ricarica della batteria.
- c. *Regolatore di voltaggio*, con la funzione di limitare la ricarica della batteria, evitare la sovraccarica e proteggerla contro una scarica eccessiva; ci sono spie di allarme per difettoso funzionamento del regolatore e indicatori di intensità di corrente fornita da ciascun pannello.
- d. *Convertitore*, per trasformare il voltaggio adattandolo alle necessità di impiego (per es. 220 V monofase o trifase).
- e. *Ondulatore*, per la conversione di corrente continua in corrente alternata (pseudosinusoidale, sinusoidale, a parzializzazione di corrente).

Attualmente i generatori fotovoltaici sono forniti corredati di tutto il sistema necessario per gli usi cui sono destinati: pompaggio di acqua da pozzi cementati,

perforazioni, fiumi; dispensario, centro sanitario, ospedale; telecomunicazioni e televisione comunitaria; segnalazione per piste di atterraggio o di transito desertico; elettrificazione rurale; protezione catodica. Convertitori e ondulatori consentono l'adattamento a tutti gli apparecchi elettrici tradizionali, come per qualsiasi normale gruppo elettrogeno. Non ci sono più limiti di dimensioni o di potenza (60 mW in USA, 50 kW in Corsica, Pakistan e Medio Oriente). Nel pompaggio di acqua, impiego fondamentale per il Sahel, non ci sono più limiti di profondità, potendosi pompare anche dal Maestrichtiano del Senegal a m 300 (il generatore recentemente installato a Sokolo in Mali pompa 80 m<sup>3</sup>/g a m 75).

In materia di costi va tenuto presente che il costo delle fotocellule rappresenta la parte di gran lunga maggiore del costo totale degli impianti. Le fotocellule sono scese dai 240 \$/W dei primi satelliti, e dagli 80 \$/W delle capsule spaziali, ai 12 \$/W dei primi generatori terrestri degli anni 1979-80: attualmente siamo a circa 8,5 \$/W (Lire 18.000). In certi studi tecnici si anticipa che il costo del materiale cristallino delle cellule prodotte in serie potrebbe essere ridotto a 0,15-0,30 \$/W, con costo finale di 0,30-0,60 \$/W, ma sono cose che si dicono da anni senza risultati concreti; in realtà per aversi riduzioni di costo a questi livelli occorrerebbe un salto tecnologico di cui pure si parla da anni e che consisterebbe nello sviluppare la produzione, invece che da barre o blocchi di silicio, da nastri sui quali verrebbe disposta la griglia di contatto con processo serigrafico (un po' come la stampa di francobolli e di carta moneta). E così parimenti esistono numerose formule allo studio che dovrebbero in futuro fare concorrenza al silicio: solfuro di cadmio associato a solfuro di rame (CdS-Cu<sub>2</sub>S) e arseniuro di gallio (GaAs), quest'ultimo impiegato nei progetti lunari dell'URSS dove le temperature erano particolarmente elevate; non sembra però che queste soluzioni possano detronizzare il silicio nell'uso terrestre, dove non si richiede materiale di grande purezza con in più il vantaggio che esso esiste in grande quantità ottenuto dalle sabbie.

Per attenerci a una valutazione realistica dello sviluppo dei costi a medio termine è quindi opportuno lasciare da parte proiezioni avveniristiche e concludere che l'attuale costo degli impianti in ragione di circa 8,5 \$/W (FF 9, Lit. 18.000-19.000) non è riducibile sul costo delle cellule, ma solo in parte sulle spese generali di produzione di grande serie a seguito dell'espansione del mercato. Purtroppo però l'espansione del mercato sta incontrando ostacoli di tutt'altra natura e prevalentemente psicologici: il carattere nuovo e rivoluzionario della conversione fotovoltaica, una certa pubblicità negativa subliminale dei produttori dei gruppi elettrogeni convenzionali, e anche un fenomeno di pura e semplice disinformazione<sup>14</sup>.

<sup>14</sup> Molto stranamente negli ambienti governativi dei paesi saheliani si sente talora esprimere l'opinione che i generatori fotovoltaici «non sono ancora a punto»: è un luogo comune che continua in forma ripetitiva fin dagli anni 1974-75, quando si cominciavano a installare sul terreno i prototipi usciti dai laboratori o dalla produzione non di serie; il fatto che il ritorno sia così persistente suggerisce appunto l'idea di un'azione subliminale dei venditori di gruppi elettrogeni o di una negligente mancanza di aggiornamento. Durante i 5 anni di permanenza in Mali a capo della missione della Commissione Europea, chi scrive fece finanziare o cofinanziare molteplici generatori fotovoltaici, tanto che il loro numero in quel paese passò da 4 a 34. Certamente a quel tempo, che segnava il passaggio dai prototipi di labora-



Nella presente situazione del mercato dobbiamo quindi calcolare i costi FOB per gli impianti nei seguenti ordini di grandezza (in via esemplificativa):

- kW 0,9 = CFA 4.050.000 o Lit. 16.200.000 — È la dimensione per fornitura idrica e irrigazione orticola di piccolo villaggio.
- kW 1,3 = CFA 5.850.000 o Lit. 23.400.000 — Dimensione per fornitura idrica a villaggio dove si pratica allevamento di bestiame bovino e/o irrigazione.
- kW 2,6 = CFA 11.700.000 o Lit. 46.800.000 — Dimensione per fornitura idrica a grande villaggio con allevamento bovino e/o irrigazione.
- kW 5,2 = CFA 23.400.000 o Lit. 94.600.000 — Dimensione per grande villaggio con annesso pozzo pastorale e/o vari ettari irrigui.
- kW 12 = CFA 54 milioni o Lit. 216 milioni — Dimensione per pompaggio da pozzi profondi per uso pastorale o agricolo irriguo.

Diamo qui appresso i due diagrammi delle portate alle diverse altezze manometriche per potenze comprese fra 0,4 e 10,4 kW, rispettivamente per il pompaggio da pozzi e perforazioni (Fig. 8) e per il pompaggio da acque di superficie (Fig. 9); sulle colonne a margine sono indicati per ciascuna portata i dati approssimativi di utilizzazione, in termini di numero di abitanti forniti, bovini abbeverabili o ettari irrigabili<sup>15</sup>, con la riserva peraltro che nella programmazione di progetti di idraulica di villaggio o pastorale sarà bene riferirsi ai dati più analitici presentati in questo studio (cap. IX, 2. e 3.; cap. X, 3.1.).

Quali sono i generatori fotovoltaici attualmente in funzione nel Sahel centro-occidentale? Escludendo gli impieghi di basse potenze per telecomunicazioni, segnalazione, illuminazione, e considerando unicamente le potenze necessarie per il pompaggio dell'acqua, sono attualmente in funzione 30 generatori fotovoltaici in Mali, 15 in Senegal, 2 in Burkina Fasso, 2 in Mauritania, 2 in Niger. Questa distribuzione dice molto sui modi di soluzione dei problemi del Sahel. L'avanzata del Mali nell'energia solare è dovuta a iniziative individuali: il massiccio lavoro sul terreno del Padre Bianco francese Bernard Verspieren e l'azione di chi scrive durante i 5 anni

torio alla produzione di semi-serie, inconvenienti tecnici ancora si verificavano: formazione di 'punto caldo' (cellule buone collegate in parallelo con una cellula difettosa nelle caratteristiche corrente/voltaggio), difettosa protezione fra moduli (passaggio di corrente inversa), ossidazione dei contatti fra cellule (passaggio del voltaggio ma non dell'ampereaggio), pompa centrifuga troppo potente, deformazione della plastica di protezione, ombreggiamento dei pannelli. Non solo tali inconvenienti sono oggi eliminati, ma anche a quel tempo la loro ricorrenza era piuttosto eccezionale: la maggioranza dei generatori funzionò per periodi lunghissimi (12-24 mesi) con perfetto automatismo e senza bisogno di intervento alcuno, tanto che uno fu installato in piena boscaglia, nel villaggio di Nabasso, a 17 km di pista dalla strada Bla-San, dove non esiste alcuna assistenza tecnica. Ovunque si assisteva alla medesima scena: appena il sole raggiunge i 20° sull'orizzonte (mettiamo alle ore 8,15) alla bocca del tubo di scarico del serbatoio appare un filo d'acqua che in capo a 10 minuti diviene un getto; verso il tramonto il getto diviene un filo e poi la pompa centrifuga si ferma fino all'indomani... Il direttore generale dello Sviluppo della Commissione, Hans Broder Krohn, mi disse: «Non importa se questi motori costano ancora cari; sono disposto a pagare qualsiasi prezzo purché si cominci».

<sup>15</sup> Questi diagrammi sono relativi alle pompe solari ALTA-XF per i pozzi e ALTA-XS per le acque di superficie della Soc. Guinard-Photowatt (francese).



di permanenza in quel paese quale delegato della Commissione Europea. Ma non dovrebbe essere così: questi risultati dovrebbero essere il frutto di una coerente politica di aiuti che invece manca del tutto.

In Mali le potenze installate sono le seguenti: un 600 W, quattro 900 W, quattordici 1,3 kW, un 1,5 kW, un 1,8 kW, due 2,6 kW, e poi un generatore per ciascuna di queste potenze — kW 3,1 — 3,4 — 3,9 — 4,3 — 5,2 — 9,4 (ospedale di San) — 12 (a Sokolo dove si pompano 80 m<sup>3</sup>/g da una profondità di m 75). Certamente se nei paesi indicati i generatori fotovoltaici fossero oggi 5100 invece di 51, come sarebbe ragionevole pretendere, i costi di investimento avrebbero potuto essere ridotti.

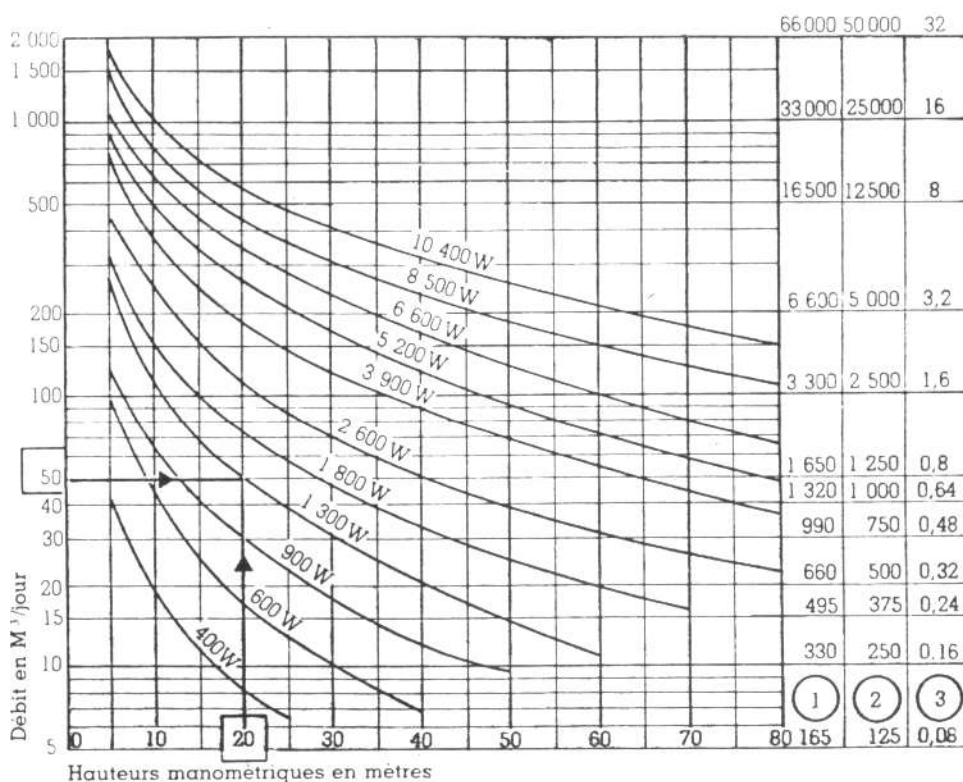


Fig. 8. Pompaggio di acqua da pozzi cementati e perforazioni idriche. Portate (in m<sup>3</sup>/giorno) per altezze manometriche (in m lineari) della gamma di potenze da kW 0,4 a kW 10,4. Colonne a margine: 1 - numero di abitanti forniti; 2 - numero di bovini abbeverabili; 3 - numero di ettari irrigabili.

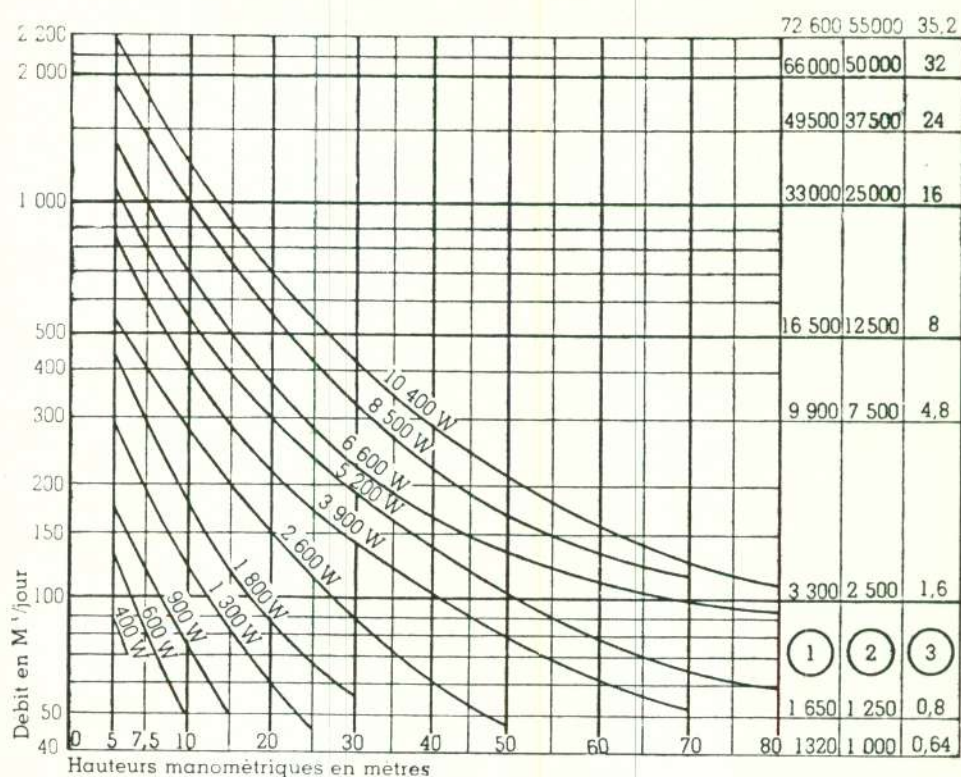


Fig. 9. Pompaggio di acqua da acque di superficie (vedasi Fig. 8).

#### 4.4.3. PROSPETTIVE PER IL SAHEL.

I generatori fotovoltaici offrono la soluzione più soddisfacente per i paesi tropicali aridi e semiaridi, e l'unica per le zone rurali e pastorali lontane dai grandi centri. Rispetto ai generatori diesel e termodinamici presentano questi vantaggi:

- trasformano l'energia solare in elettrica senza stadi intermedi e con un rendimento apprezzabile;
- non comprendono parti mobili per cui la manutenzione è semplice e le panne eccezionali;
- non richiedono una fonte fredda come i termodinamici e non provocano inquinazione come i diesel;
- possono essere installati e mutati di sito con estrema facilità, come pure aumentati o ridotti di potenza, per cui rispondono alla principale esigenza di queste regioni che è quella del decentramento delle fonti energetiche;
- hanno durata lunghissima (superiore ai 20 anni);
- ai maggiori costi di investimento fanno riscontro costi di esercizio nulli o estremamente ridotti essenziali per queste economie;
- il costo al m³ di acqua pompata è inferiore a quello dei diesel di pari potenza.

Le obiezioni che si sentono ancora formulare a proposito dei generatori fotovoltaici sono infondate e le elenchiamo:

- a. Funzionano solo per 8-10 ore giornaliere mentre i gruppi elettrogeni funzionerebbero 24 ore su 24. La seconda affermazione non corrisponde a verità nel Sahel dove si può calcolare che nell'arco dell'anno la media giornaliera di funzionamento non supera qualche ora: i gruppi elettrogeni che abbiamo incontrato sul terreno erano per una buona metà regolarmente in panne per lunghi periodi; se nei centri urbani maggiori l'arresto tecnico può durare qualche giorno, nelle zone rurali e pastorali è normalmente di mesi (le parti di ricambio devono venire dalla capitale, o dall'estero dopo sosta di un mese in dogana; devono essere pagate e può mancare il denaro; qualcuno deve portarle sul posto e bisogna che ci sia chi le monti).
- b. Non funzionano di notte. Per l'impiego principale, il pompaggio dell'acqua, l'accumulatore è idraulico (serbatoio); per gli usi elettrici si ricorre agli accumulatori in casi specifici dove è in genere presente adeguata assistenza tecnica per il controllo delle batterie (centri sanitari, amministrativi, di ricerca agronomica, ecc.).
- c. I costi di investimento sono alti. I costi di investimento non possono essere valutati che in connessione coi costi di esercizio e in relazione alle soluzioni alternative in particolari condizioni ambientali e di isolamento: se per ipotesi occorrono 100 kW di potenza per le camere di congelamento di un importante centro di pesca su un grande fiume, l'investimento di F. CFA 450 milioni o Lire 1,8 miliardi può risultare conveniente, tenuto conto dei rilevanti costi di esercizio dei gruppi elettrogeni in combustibile (trasportato da centinaia di km) e delle rilevanti perdite a seguito di pannes (perdite di pesce congelato e di pesce fresco delle messe a terra, interruzione del circuito commerciale).

Circa il costo comparativo del m<sup>3</sup> d'acqua pompato, rispettivamente dal generatore fotovoltaico e dal diesel, sono stati fatti calcoli precisi tenendo conto degli investimenti necessari per un funzionamento di anni 15, degli ammortamenti a diversi tassi di interesse (5-10-15%), dei costi di esercizio annuali. Ne riassumiamo le conclusioni:

	Gruppo elettrogeno (pompa elettrica immersa)	Pompa fotovoltaica (1300 W di cresta)
— Altezza manometrica	m 30	m 30
— Portata oraria nominale	7 m <sup>3</sup> /ora	32 m <sup>3</sup> /giorno
— Durata annuale di funzionamento	ore 1800	ore 1800
— Volume annuale pompato	m <sup>3</sup> 12.600	m <sup>3</sup> 11.500
— Investimento totale installato (Lire del 1982)	25.000.000	54.000.000
— Costi annuali di esercizio (Lire del 1982)	7.520.000	1.600.000
— Costo m <sup>3</sup> d'acqua pompato (a interesse annuo 10 %, Lire del 1982)	990	760

L'attuale mercato del Sahel centro-occidentale per l'impiego principale del pompaggio di acqua è attualmente coperto per il 65% dalla Soc. Guinard-Photowatt, per il 20% da altre società francesi, per il 15% da società non francesi. Sarebbe augurabile, specie considerando l'interesse del governo e del parlamento italiani per i problemi del Sahel, che ogni sforzo fosse compiuto per sviluppare una produzione di grande serie di generatori fotovoltaici a prezzi concorrenziali.



## 5. Energia eolica

### 5.1. Premesse

Del 28,5% dell'energia elettromagnetica solare disponibile sulla terra il 16% è utilizzata nell'evaporazione dell'acqua, fenomeno che rende disponibile energia idraulica grazie alle precipitazioni ed energia eolica grazie ai venti (sono in sostanza ambedue forme di energia solare 'indiretta'). L'energia eolica deriva dalla pressione esercitata dal vento sugli ostacoli che incontra ed è quindi un'energia meccanica.

Del vento, risultante dallo spostamento di masse d'aria fra zone di diversa pressione, temperatura e densità, si è già trattato per gli aspetti fisici in relazione all'erosione eolica (cap. XI, 4.3.). Nel contesto energetico ci interessa per questi altri aspetti: a) velocità (espressa in m/s o km/h); b) frequenza (medie di giorni/anno, giorni/mese, ore/giorno); c) regolarità (in termini di variazioni orarie e accelerazione). Queste caratteristiche mutano in funzione di un certo numero di fattori: a) latitudine (per i grandi movimenti di circolazione atmosferica come anticicloni, cicloni, linee di perturbazione, alisei, monsoni); b) localizzazione geografica (coste marittime, zone montane, deserti); c) sito (vallata, pianura, pendio, area boschiva).

L'utilizzazione dell'energia eolica è caratterizzata dalle limitazioni dovute alle fluttuazioni aleatorie del vento, ma a differenza dell'energia solare non ci sono limitazioni legate alle ore notturne o di scarsa luce. Un'altra differenza sta nel fatto che il vento non è disponibile ovunque, anche se le zone dove può essere sfruttato sono abbastanza estese. Zone adatte sono tutte le coste marittime (vento da mare di giorno e da terra di notte) e alcune zone montagnose.

Per quanto riguarda le regioni considerate, nella fascia saharo-saheliana, a nord dei 17°N, gli aeromotori possono funzionare normalmente senza rischio di calme piatte o insufficienza di vento. Nella fascia tra 15°N e 17°N, ossia nel Sahel senegalese e mauritano, in buona parte del maliano e del nigerino, nella provincia sudanica di Kassala, ci si trova in una zona di transizione dove il normale funzionamento degli aeromotori dipende dalle meteorologie regionali, dalla scelta del sito e dalla sensibilità meccanica degli apparecchi. Nel complesso il Sahel ha calme piatte infrequenti e brevi e si può sempre contare su una 'brezza tesa', corrispondente al 3° grado della scala di Beaufort (m/s 3,4-5,2), sufficiente a far funzionare gli aeromotori più sensibili (m/s 4,5-5). Nella fascia sudanese per contro le calme sono frequenti e lunghe per cui questa forma di energia non è utilizzabile, almeno al di fuori delle coste marittime.

L'energia meccanica ottenuta mediante il collettore dinamico (elica, mulino, panemone, rotore, turbina, mulinello, pale girevoli, valvole battenti, ecc.) può essere utilizzata direttamente o convertita in energia elettrica mediante dinamo. È strano che questa preziosa macchina così antica, penetrata anche in Africa durante la colonizzazione per uso degli europei, sia totalmente scomparsa con l'indipendenza. La consueta razionalizzazione di stampo razzista fu che « coi neri non funziona ». La verità è che questa scomparsa fu dovuta a tre motivi: l'apparente disinteresse di



certi ambienti dirigenti e burocratici locali per le soluzioni semplici; il provato disinteresse della tecnologia occidentale per gli adattamenti tecnici relativi a situazioni ambientali e umane che riguardino il Terzo Mondo; e infine l'azione subliminale degli interessi petroliferi e nucleari contro l'energia solare ed eolica.

Bisogna quindi ricominciare da zero.

## 5.2. Tipi di aeromotori

Il loro numero è una prova dell'estrema versatilità della tecnica occidentale, ma che fa strano contrasto con la paralisi della tecnica applicata per uso del Terzo Mondo.

Fra questi modelli quattro sono certamente utilizzabili fin da adesso, al caso con piccoli adattamenti:

- a. *Mulino americano multiplo.* È il tipo più corrente, con lunga storia, usato negli Stati Uniti, in Europa e nell'Africa coloniale. È una ruota di 2-6 m di diametro portante un gran numero di pale oblique. Si orienta meccanicamente al vento grazie al timone posteriore. Ha il vantaggio di funzionare anche con 'brezza tesa' (3° Beaufort) e con bassa velocità di rotazione, il che lo rende adatto al pompaggio di acqua con pompa a pistone. È di costruzione e manutenzione facile anche con mezzi artigianali. Per contro non sopporta venti forti nel qual caso, per evitare rotture, deve essere disposto 'in bandiera'; inoltre la trasmissione del moto rotatorio all'asse verticale della pompa presenta una certa fragilità che impedisce il pompaggio a grandi profondità. Sono stati studiati vari meccanismi automatici atti a spostare il rotore di traverso con l'aumento della forza del vento fino a disporlo 'in bandiera' in caso di uragano (nel modello ancora oggi usato sulla costa marittima della Maremma tale meccanismo consiste in una robusta molla); non sembra però che il problema sia stato risolto in modo del tutto soddisfacente.
- b. *Mulino olandese.* Ha un'elica di 2-3-4 pale e normale timone di coda. È insensibile a venti deboli, mentre funziona efficacemente e senza rischi con venti medi e forti (a partire da 'vento teso', 5° Beaufort).
- c. *Aerogeneratore.* Ha un'elica di grande diametro a 2-3 pale e timone di coda sovrelevato con disegno non dissimile dal mulino olandese, e come quest'ultimo è insensibile ai venti deboli ma utilizza bene i medi, forti e fortissimi. Il rotore aziona una dinamo per la produzione di energia elettrica. È macchina complessa non utilizzabile fuori dai grandi centri dove non sia disponibile una adeguata assistenza elettrotecnica.
- d. *Rotore Savonius.* È una formula ad asse verticale, molto semplice e costruibile artigianalmente. Il rotore è formato da due fusti metallici da 200 l per prodotti petroliferi sezionati per lungo in due metà che sono montate in senso opposto, a 'S'. Di costo modesto (circa Lire 500.000 del 1984) funziona con pompa idraulica e può estrarre 2 m<sup>3</sup>/h di acqua da una profondità di m 8. È sensibile ai venti deboli ('brezza tesa') e a direzione molto variabile; per contro, mentre resiste bene anche agli uragani, l'aumento di rendimento con l'aumento della forza del vento è insignificante o modesto. Queste caratteristiche, che rispondono a diverse esigenze contraddittorie, lo rendono meritevole di maggiore studio.

Con soluzioni tecniche così numerose è imperdonabile che la ricerca applicata abbia finora fatto passi da lumaca (Fig. 10). Ma la sottile e efficace azione sabo-

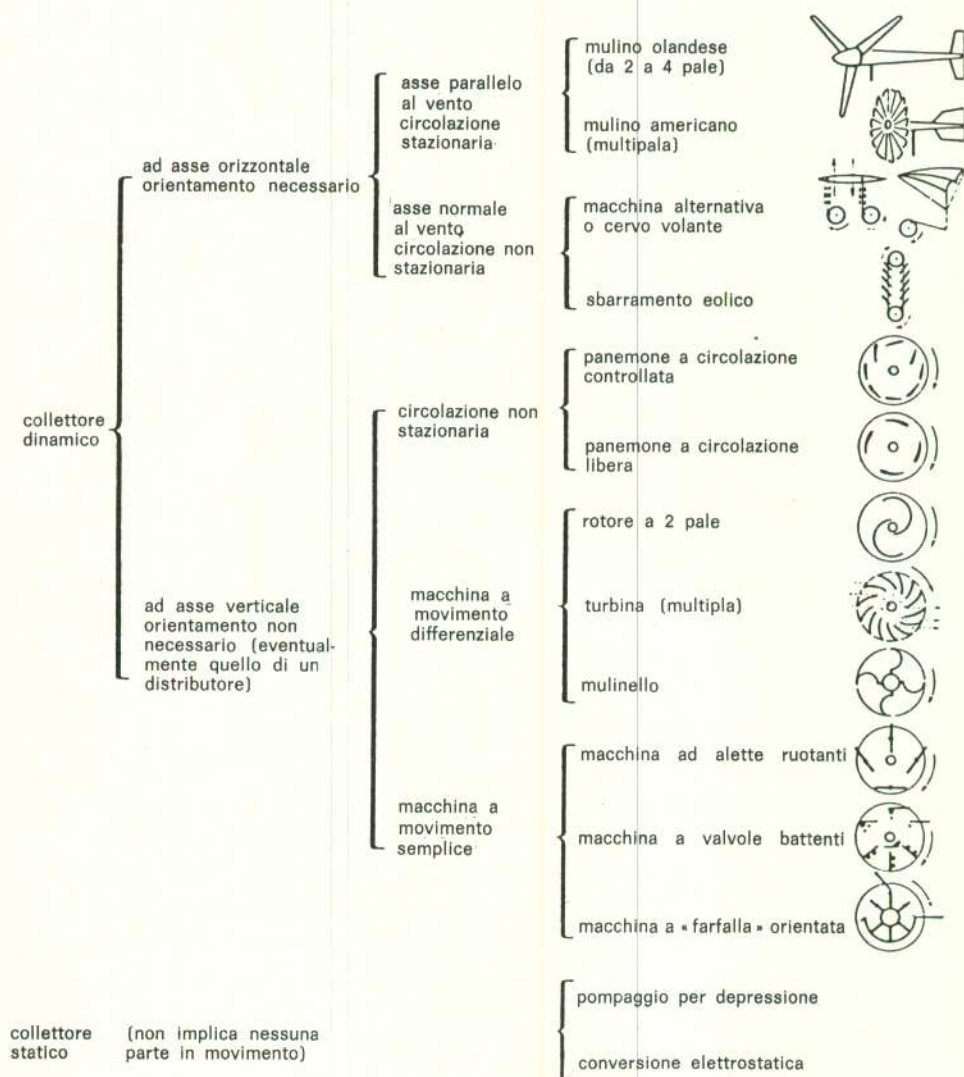


Fig. 10. Tabella sommaria di classificazione dei principali collettori dinamici (da Sahel et Technologies Alternatives, di J.-C. WOILLET, studio della Compagnie d'Etudes Industrielles et d'Aménagement du Territoire (CINAM), a cura del Ministère de la Coopération, Parigi, 1978).

tratrice degli interessi petroliferi e nucleari non è una fantasia. Il professore Henri Masson, che era direttore dell'Istituto di Fisica Meteorologica dell'Università di Dakar, e il professor Jean-Pierre Girardier, avendo intuito l'enorme importanza del-

L'energia solare per i paesi tropicali, cominciarono a lavorare da soli già nel lontano 1962 a un prototipo di generatore termodinamico di fronte al più tetragono disinteresse degli istituti di ricerca occidentali e degli aiuti internazionali; lavorarono in un capannone sbilenco della periferia di Dakar il sabato e la domenica, arrabattandosi con tubi, vetri e lamiere, segnando e limando con le proprie mani, e pagando i materiali e gli attrezzi dai propri magri stipendi universitari. Così nacque il primo motore solare a pistone di 1 kW. A questo modo si impiegarono 7 anni per creare i prototipi delle prime pompe solari che entrarono in funzione in Senegal, Mauritania e Niger: se invece di energia solare per i paesi tropicali si fosse trattato di nuove soluzioni tecniche per l'energia chimica o nucleare, oppure di armi sofisticate e micidiali, invece di 7 anni per i prototipi sarebbero forse bastati 7 mesi per la produzione in serie. E per quanto riguarda i motori eolici, si è talora accennato in passato a grandi aerogeneratori su torri, allineati lungo le coste marittime particolarmente ventose, o su piattaforme a mare, per la produzione di notevoli quantità di energia elettrica da fonte gratuita, continua e non inquinante; ma anche qui perdura il silenzio e l'inazione. Ci rendiamo conto che con gli 'interessi' non si usa scherzare, ma non comprendiamo quale grave minaccia possano rappresentare per gli interessi petroliferi e nucleari dei modesti mulini a vento per il Sahel.

A nostro avviso sarebbe urgente accelerare la ricerca applicata sui modelli che abbiamo indicato più sopra in tutti gli aspetti: materiali e forma dei rotori; meccanismo di frenaggio statico dei rotori secondo la forza del vento; possibilità di abbinamento rotore/statore nei motori ad asse orizzontale; miglioramenti possibili ai motori ad asse verticale (in particolare il Savonius); robustezza delle trasmissioni alla pompa; particolari accorgimenti nel raffreddamento ad aria delle dinamo degli aerogeneratori specie in connessione coi venti di sabbia. Sarebbe inoltre urgente studiare per i pozzi trivellati di grande portata formule appropriate di abbinamento del motore solare a fotocellule col motore eolico: ciò potrebbe assicurare una garanzia di fornitura idrica anche in caso di grave siccità nei punti d'acqua importanti (grandi perforazioni pastorali, oasi saheliene e sahariane naturali e artificiali).

È così, e solo così, che si combatte concretamente la siccità nel Sahel.

## 6. Politica energetica

In campo energetico si può dire che sia ancora tutto da pensare, pianificare e realizzare. Come si è visto (1.), il consumo energetico del Sahel comprende solo il 18% di energia chimica (ossia prodotti petroliferi importati) che è utilizzata soprattutto nel settore dei servizi (trasporti e centrali termiche) perché il settore industriale e minerario è limitatissimo (uniche eccezioni: fosfati di Taiba in Senegal, minerale di ferro di Zouerat in Mauritania, minerale di uranio di Arlit in Niger). Per il restante 82% si consuma energia biochimica, essenzialmente legna da ardere, col risultato di un accelerato disboscamento, principale fattore di desertificazione. Non statisticamente quantificabile è infine l'energia biochimica di origine animale, ossia i muscoli di bestie da soma ma soprattutto umani.



Dai rapporti del CILSS non è possibile derivare un calcolo della quota di aiuti internazionali andata all'energia, in sostanza all'energia idroelettrica (dighe) e chimica (centrali termiche), ma è certo che all'energia derivata da fonti rinnovabili e gratuite gli apporti sono stati nulli.

La responsabilità per questa situazione appartiene in primo luogo ai paesi cosiddetti 'donatori', per tre ordini di circostanze:

- a. L'incapacità di elaborare politiche energetiche conseguenti per loro stessi, specie a lungo termine, adottando criteri ecologici anziché unicamente mercantili, ed estendendo progressivamente il ricorso a fonti rinnovabili, gratuite e non inquinanti. Se si manifestò qualche proposito concreto e si avviò qualche conato negli anni successivi alla crisi petrolifera del 1973, il budino si sedette immantinente con la flessione e la stabilizzazione di questi prezzi a seguito dell'andamento del mercato e della crisi del cartello OPEP.
- b. In omaggio all'indirizzo etnocentrico dello sviluppo unilineare, per cui i paesi poveri tropicali ed equatoriali non possono che seguire il modello di sviluppo dei paesi ricchi della zona temperata, non insorse nemmeno il sospetto che i paesi 'aiutati' potessero avere anche per il settore energetico esigenze, problemi e soluzioni diverse: abbiamo infatti da una parte consumi alti e concentrati, che consentono prezzi tollerabili di produzione e di trasporto, e quindi l'uso massiccio di materie prime care, come gli idrocarburi e l'uranio; e dall'altra parte consumi bassi, molto decentrati, che non consentono economie di scala e l'uso di materie prime care. Si opera così in base al seguente sillogismo: devono fare come noi — non possono pagare — dunque non si fa (i camini fumano — gli uomini fumano — dunque gli uomini sono camini). Di conseguenza niente minicentrali idroelettriche, niente gasogeni, niente motori solari termodinamici e fotovoltaici, niente motori eolici.
- c. Ma sopra questo palcoscenico, nella botola centrale, c'è il grande burattinaio che è rappresentato dagli interessi petroliferi e nucleari. Perché non si parli, e nemmeno si pensi, alle fonti di energia rinnovabili, gratuite e non inquinanti si manovrano svariati fili che sarebbe troppo lungo analizzare in questa sede. Possiamo però citare alcune considerazioni a portata di mano: il caso dei professori Masson e Girardier prima descritto; il caso della competente commissione del Senato statunitense di fronte alla quale almeno una volta furono falsati i dati sulle prospettive dell'energia solare ed eolica onde promuovere l'energia nucleare e proteggere la petrolifera; i ricatti e le soperchierie messi in atto negli Stati Uniti dalle imprese elettriche contro lo sviluppo dell'energia solare per uso privato. Ma ci sono sviluppi più gravi e patenti: in Europa alcune società importanti che si erano lanciate nell'energia solare per il mercato dei paesi tropicali hanno abbandonato o stanno abbandonando il settore dopo aver perso soldi per le distorsioni artificiali del mercato provocate da sovvenzioni a questa produzione da parte di nuovi concorrenti, spesso sussidiarie di società petrolifere entrate nel settore solare per distruggerlo o limitarlo e poi magari abbandonarlo a lavoro compiuto. Ecco le ragioni per le quali,



contrariamente ai missili, satelliti e navette spaziali, i motori solari ed eolici per il Sahel non sono mai stati prodotti in grande serie.

L'unica politica energetica concepibile, non solo per il Sahel ma per vastissime zone del Terzo mondo, non può dunque che fondarsi sui 3 criteri seguenti da applicarsi nella massima misura possibile: a) netta preferenza alle fonti di energia rinnovabili e gratuite; b) polivalenza e diversificazione di fonti al livello locale, regionale e nazionale; c) decentralizzazione.

Non si dovrebbero più costruire centrali termiche convenzionali, ma limitarsi a mantenere le attuali in fase di transizione. L'uso dei generatori diesel dovrebbe essere ridotto allo stretto necessario, in via temporanea e fino all'abolizione. Gli organismi di aiuti internazionali dovrebbero accollarsi i maggiori costi dei motori solari ed eolici che sono tali non per colpa dei paesi poveri ma degli interessi petroliferi e nucleari dei paesi ricchi. Detto ciò sembra proprio che l'unica soluzione rimasta sia quella di affidarsi alla volontà politica dei 'Verdi' delle varie tinte, che stanno sorgendo nell'opinione pubblica europea, e continuare il nostro discorso.

Riassumiamo qui di seguito in tabelle comparative tutte le possibili soluzioni energetiche concepibili per il Sahel fra le quali figurano quelle che abbiamo descritto e suggerito in prima istanza (Figg. 11, 12, 13, 14). Concludiamo precisando i 3 criteri di politica energetica sopra enunciati:

- A. La preferenza va data alle fonti energetiche rinnovabili e gratuite, cioè all'energia solare, eolica e idraulica. Per ogni esigenza di consumo dovrebbero essere esaminate le diverse alternative in questo ordine: a) impiego dell'energia solare con collettore piano soprattutto per essiccazione di prodotti e distillazione di acqua salmastra; b) microcentrali idroelettriche (possibilità rara per ragioni idrologiche); c) generatore fotovoltaico (pompaggio d'acqua o produzione di elettricità per centri sanitari); d) generatore termodinamico a pistone (pompaggio di acqua) o a turbina (elettricità); e) aeromotore multipale o aeromotore olandese (pompaggio d'acqua a piccola profondità); f) aerogeneratore (elettricità per centri sanitari); g) eventuale accoppiamento di motore solare/eolico; h) pirolisi (se grande disponibilità di sottoprodotti agricoli, caso raro).
- B. Il criterio della polivalenza e diversificazione significa che la scelta della fonte di energia e del sistema di conversione viene fatta non su base geotopografica (regione, dipartimento, distretto, borgo, villaggio), ma in base all'utilizzazione (pompaggio, essiccazione, refrigerazione, distillazione, energia elettrica motrice, illuminazione), per cui diverse forme di energia possono coesistere anche nell'ambito di un comprensorio rurale.
- C. Il criterio della decentralizzazione è una conseguenza dei primi due e presenta in più un duplice vantaggio: evita costi di trasporto di energia su lunghe distanze, e offre un massimo grado di flessibilità e fungibilità di motori e generatori che possono con facilità essere trasferiti o modificati in potenziale secondo i bisogni.

Tecnologie Criteri	Eolica Savonius + pompa Vergnet	Eolica multipla di pompaggio	Pompa solare termodinamica	Pompa solare fotovoltaica
Fase di sviluppo	Sperimentale	In commercio	In commercio e in costante evo- luzione	In commercio
Concezione sempli- ce. Possibilità di fabbricazione in loco	Sì	Sì	Parziale	No
Semplicità di utilizzazione	Sì	Sì	Sì	Sì
Manutenzione possibi- le da parte degli u- tenti	Eventuale	Eventuale	No	No
Affidabilità e dura- ta	Probabilità alta	Media	Abbastanza buona	Abbastanza buona
Costo d'investimento elevato che esclude un finanziamento da parte degli utenti	A buon mer- cato	Poco costo- so	Carissimo	Carissimo
Costo di funziona- mento, manutenzio- ne inclusa	Ridotto	Ridotto	Ridotto	Ridotto
Resa energetica	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa
Capacità abitualmen- te considerate	<500 W	<1kW	1 - 80 kW	25 kW attual- mente
Possibilità di stoccaggio	Serbatoio	Serbatóio	Serbatoio	Serbatoio
Risposta a un biso- gno primario	Sì	Sì	Sì	Sì
Accettabilità psicologica	Buona	Buona	Buona	Buona
Necessità di uno sforzo di divulga- zione preliminare	No	No	No	No
Effetti economici e sociali indiretti	Favorevoli	Favorevoli	Favorevoli	Favorevoli
Possibilità di mi- glioramenti notevoli	No	No	Sì	Sì
Possibilità di un grande calo dei prez- zi unitari	No	No	Notevole abbassamento	Sì
Caratteristiche	Presuppone un regime dei ven- ti adatto	Presuppone un regime dei ven- ti adatto	Funzionamento irregolare in certe stagioni	Funzionamento irregolare in certe stagioni

Figg. 11, 12, 13, 14. Tabelle comparative dei motori, generatori e diverse utilizzazioni dell'energia solare ed eolica in ambiente tropicale (da Énergie Nouvelle et Développement, studio della Soc. SEMA per conto del Ministère de la Coopération, Paris, 1978). Le correzioni da noi apportate tengono conto dei progressi compiuti a tutt'oggi.

Tecnologie Criteri	Climatizzatore solare ad as- sorbimento	Forno solare ad alta tempe- ratura	Aerogene- ratore	Generatore di elettricità fotovoltaica
Fase di sviluppo	Sperimentale	Sperimentale	In commercio	In commercio
Concezione sempli- ce. Possibilità di fabbricazione in loco	Complessa	Complessa	Complessa	Complessa
Semplicità di utilizzo	Complessa	Complessa	Sì	Sì
Manutenzione possibi- le da parte degli u- tenti	No	No	No	Eventualmente (carattere mo- dulare)
Affidabilità e dura- ta	Probabilmente alte	Incerte	Buona (10 anni)	Buona (10 an- ni e più)
Costo d'investimento elevato che esclude un finanziamento da parte degli utenti	Molto caro	Molto caro	Caro	Al momento molto caro
Costo di funziona- mento, manutenzio- ne inclusa	Medio	Alto	Basso	Bassissimo
Resa energetica	Bassa	Media	Media	Media
Capacità abitualmen- te considerate	>10 kW	>50kW	da 25 W a 10 kW	Al momento da 10 W a 25 kW
Possibilità di stoccaggio	Sì, serbatoio d'acqua refri- gerata	No	Batteria o serbatoio di acqua con pompaggio	Batterie
Risposta a un biso- gno primario	-	No	Sì	Sì
Accettabilità psicologica	-	Cattiva	Buona	Buona
Necessità di uno sforzo di divulga- zione preliminare	-	-	-	No
Effetti economici e sociali indiretti	Risparmio di elettricità	Risparmio di combustibile	Molto favorevoli	TV per la scuo- la, telecomuni- cazioni, illu- minazione dei centri isolati
Possibilità di mi- glioramenti notevoli	Sì	No	No	Sì
Possibilità di un grande calo dei prez- zi unitari	No	No	No	Molto probabile
Caratteristiche	Ricerche note- voli negli USA	Poco adatto all'Africa	Il suo inte- resse di- pende dal re- gime locale dei venti	La caduta dei prezzi unitari dovrebbe allar- gere notevol- mente le sue applicazioni

Fig. 12.

Tecnologie Criteri	Scalda acqua solare	Essiccatoio solare	Distillatore solare	Fornello solare
Fase di sviluppo	In commercio	In funzione ma con scarsa diffusione	In funzione ma con scarsa diffusione	Sperimentale
Concezione sempli- ce. Possibilità di fabbricazione in loco	Sì	Sì	Media	Varia
Semplicità di utilizzazione	Sì	Sì	Sì	No
Manutenzione possibi- le da parte degli u- tenti	Sì	Sì	Sì	Eventuale
Affidabilità e dura- ta	Ottime	Buone	Limitate a causa della corrosione	Medie
Costo d'investimento elevato che esclude un finanziamento da parte degli utenti	A buon mer- cato	A buon mer- cato	Abbastanza caro	Caro
Costo di funziona- mento, manutenzio- ne inclusa	Molto basso	Molto basso	Medio (ma- nutenzione costosa)	Basso
Resa energetica	Alta	Media	Media	Alta
Capacità abitualmen- te considerate	da 100 a 1000 l	Qualche doz- zina di chili a volta	Qualche litro o una dozzina di litri al giorno	< 500 W
Possibilità di stoccaggio	Sì (recipien- te)	-	-	No
Risposta a un biso- gno primario	Sì	Sì	Sì (ospedali, garage)	Indiscuti- bilmente
Accettabilità psicologica	Eccellente	Media	Buona	Cattiva
Necessità di uno sforzo di divulga- zione preliminare	Sì	Indispensabile	Sì	Indispensa- bile
Effetti economici e sociali indiretti	Risparmio di elettricità o di combustibile	Riduzione delle perdite dei rac- colti, migliora- mento della qua- lità	Fornitura di acqua distillata	Diminuzione del disbosca- mento, alleg- gerimento del- le spese fa- miliari
Possibilità di un grande calo dei prez- zi unitari	Calo limitato	No	No	Calo limitato
Possibilità di mi- glioramenti notevoli	No	Sì	No	Forse
Caratteristiche	Prodotto sola- re 'a punto'	La 'formazione' degli utenti con- diziona il suo sviluppo	-	Ostacolo psi- cologico mol- to forte, scarsa prati- cità, costo elevato

Fig. 13.



Tecnologie Criteri	Fotosintesi + fermentazione di metano	Fotosintesi + Pirolisi	Microcentrali idroelettriche
Fase di sviluppo	Sperimentale, numerosi rea- lizzazioni	Sperimentale	In commercio
Concezione sempli- ce. Possibilità di fabbricazione in loco	Sì	No	No
Semplicità di utilizzo	Media	Media	Sì
Manutenzione possibi- le da parte degli u- tenti	Sì	No	No
Affidabilità e dura- ta	Alte	Sconosciute	Alte
Costo d'investimento elevato che esclude un finanziamento da parte degli utenti	Ragionevole	Alto	Molto alto
Costo di funziona- mento, manutenzio- ne inclusa	Poco elevato	Medio	Basso
Resa energetica	Media	Buona	Buona
Capacità abitualmen- te considerate	da 1 a 50 kW	> 200kW	da 10 a 500 kW
Possibilità di stoccaggio	Sì materia prima o gas	Sì materia prima o gas	Sì con serba- toio
Risposta a un biso- gno primario	Sì	Sì	Sì
Accettabilità psicologica	Media	Media	Buona
Necessità di uno sforzo di divulga- zione preliminare	Necessario uno sforzo intenso	-	-
Effetti economici e sociali indiretti	Autonomia ener- getica di picco- li centri	Autonomia ener- getica agro-in- dustriale	Risparmio di prodotti pe- troliiferi
Possibilità di mi- glioramenti notevoli	No	Sì	No
Possibilità di un grande calo dei prez- zi unitari	No	Sì	No
Caratteristiche	Esperienza anco- ra insufficiente con paglia e ri- fiuti vegetali, utilizzo facile del gas: cucina, motori ecc.	-	Presuppone corsi d'acqua regolari e adat- ti

Fig. 14.