

POLITECNICO DI MILANO
Facoltà di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica



**Analisi della potenzialità di minireti ibride
per l'elettrificazione rurale in contesti in
via di sviluppo:
dalla definizione accurata dei fabbisogni al
progetto ottimo di minireti isolate**

Relatore: Prof. Ennio Macchi
Correlatore: Ing. Marco Astolfi
Ing. Simone Mazzola

Tesi di Laurea di:
Elena Galliani, matricola 814087

Anno Accademico 2014-2015

Indice

Intro	XI
1 Il problema energetico mondiale	1
1.1 La situazione attuale	2
1.2 Strategie per l'elettrificazione	3
1.3 Definizioni e classificazione per contesti in via di sviluppo	5
1.3.1 Il passaggio dalla generazione centralizzata alla generazione distribuita	5
1.3.2 Generazione distribuita	6
1.4 Stato delle microgrid nel mondo	7
2 Domanda	9
2.1 Caratterizzazione della domanda di energia	9
2.1.1 Basic needs - bisogni di base	10
2.1.2 Agricoltura	13
2.1.3 Usi produttivi	27
2.2 Stima del carico	30
2.2.1 Descrizione dei dataset in input	30
2.2.2 Descrizione dell'algoritmo	33
3 Risorse	39
3.1 Radiazione solare	40
3.2 Velocità del vento	40
3.3 Biomassa	41
3.3.1 Piantagioni perenni	41
3.3.2 Residui agricoli	42
3.3.3 Residui forestali	43
4 Dimensionamento microgrid	49
4.1 Struttura di una microgrid	49
4.1.1 Carichi	50

4.1.2	Generatori	50
4.1.3	Accumulo	52
4.1.4	Convertitore	55
4.2	Dimensionamento della microgrid	56
4.2.1	HOMER	60
4.2.2	MILP	71
4.2.3	Euristica modificata	78
4.3	Test-case	87
4.3.1	Architettura microgrid	87
4.3.2	Ottimo PV-Diesel-Batterie	87
4.3.3	Ottimo PV-Diesel-Batterie-Gassificatore	89
5	Casi di studio	95
5.1	Analisi di sensibilità	96
5.1.1	Costo della biomassa	96
5.1.2	Densità di popolazione	97
5.1.3	Velocità del vento	100
5.1.4	Rapporto tra area coltivata e area forestale	100
5.2	Dimensionamento per tre casi realistici	106
5.2.1	Primo caso di studio	106
5.2.2	Secondo caso di studio	108
5.2.3	Terzo caso di studio	111
	Conclusioni	117

Elenco delle figure

1.1	Legame tra accesso all'energia e sviluppo	2
1.2	Capacità totale da microgrid divisa per regione	8
2.1	Consumo di acqua medio procapite giornaliero	11
2.2	Relazione produttività - acqua fornita	14
2.3	Mappa coefficiente colturale	19
2.4	Precipitazione effettiva	20
2.5	Mappe quantitative della falda acquifera in Africa	26
2.6	Curva di domanda dovuta ai bisogni di base	36
2.7	Curva di carico dovuta ai bisogni di base con lampadine poco efficienti	37
4.1	Schema generico di una minirete	49
4.2	Curva di potenza di una turbina eolica da 1 kW	51
4.3	Curve di rendimento generatori dispacciabili	53
4.4	Rendimento di carica-scarica della batteria	54
4.5	Weighting factor della batteria	55
4.6	Esempio di approccio rolling-horizon	72
4.7	Spiegazione dell'utilizzo del time-step variabile nella strategia rolling-horizon	75
4.8	Confronto curve di costo diesel e batteria	80
4.9	Confronto strategia LF(HOMER) e LF(EM)	82
4.10	Energia persa in CC	83
4.11	Strategia euristica intermedia con $SOC_{CC} = 0.5$ e $SOC_{setpoint} = 0.4$	84
4.12	Confronto costi diesel, gassificatore e batteria	85
4.13	Risultato dell'ottimizzazione eseguita con il metodo EM	86
4.14	Confronto delle strategie di dispacciamento	90
4.15	Confronto strategie al variare di taglie di pv e batteria	91
4.16	Confronto tra le strategie HOMER e EM con taglia della batteria fissata	92
4.17	Confronto fra strategia MILP e EM in presenza di un generatore a biomassa	93

4.18	Confronto fra strategia LF e EM in presenza di un generatore a biomassa	94
5.1	Costo della biomassa	97
5.2	Andamento del rapporto tra carico non programmabile e programmabile al variare della densità di popolazione	98
5.3	Profilo orario della velocità del vento nella località di interesse	100
5.4	Analisi di sensibilità sul costo della biomassa	101
5.5	Analisi di sensibilità sulla densità di popolazione, senza foreste	102
5.6	Analisi di sensibilità sulla densità di popolazione, con foreste .	103
5.7	Analisi di sensibilità sulla velocità del vento	104
5.8	Analisi di sensibilità sul rapporto tra area coltivata e forestalee	105
5.9	Casi di studio e tasso di elettrificazione rurale in India	106
5.10	Carico non programmabile del primo caso di studio	107
5.11	Carico annuale totale del primo caso di studio	107
5.12	Carico non programmabile del secondo caso di studio	110
5.13	Carico annuale totale del secondo caso di studio	110
5.14	Carico non programmabile del terzo caso di studio	113
5.15	Carico annuale totale del terzo caso di studio	113

Elenco delle tabelle

2.1	Rapporto tra la produttività di terreni irrigati e la produttività di terreni non irrigati	15
2.2	Coefficienti colturali	18
2.3	Perdite di carico in irrigazione a pioggia e a goccia	23
2.4	Fattore e_c per diversi tipi di canali	24
2.5	Fattore e_a per diversi sistemi di irrigazione	25
2.6	Consumi elettrodomestici	34
2.7	Fattori di carico delle diverse utenze	35
3.1	Coefficienti utilizzati per il calcolo dei residui	47
5.1	Caratteristiche del primo caso di studio	108
5.2	Risultati del dimensionamento per il primo caso di studio . . .	109
5.3	Caratteristiche del secondo caso di studio	111
5.4	Risultati del dimensionamento per il terzo caso di studio . . .	112
5.5	Caratteristiche del terzo caso di studio	114
5.6	Risultati del dimensionamento per il terzo caso di studio . . .	115

Abstract

In this work we investigate the potential of hybrid stand-alone microgrids for rural electrification.

First we describe in detail all the needs of the community that live in this context. We describe the algorithm we used to translate these needs into electric loads, and the global datasets we used to apply the algorithm. The global datasets and the algorithm have been implemented in an Excel+VBA program, which is able to calculate the hourly load demand in rural villages given the latitude and the longitude.

Then we describe two methods for the optimization of the microgrid, which represent two different states of the art. The first method is based on heuristic dispatch strategies, the second one on an optimization algorithm that achieves better results. We describe the heuristic dispatch strategy developed in this work, that achieves an improvement compared to the common commercial dispatch strategies.

We use the described strategy to design a hybrid stand-alone microgrid in three realistic rural villages in India, and we analyse the effect of external variables (such as wind speed and biomass availability) on the energy cost and on the component optimal sizes.

The present work has reached three important results: (i) the development of a general and flexible algorithm for the definition of load demand, with the possibility of considering different goods, (ii) the definition of a new heuristic dispatch strategy for planning and operation of programmable loads and generators, (iii) the implementation of an optimization routine for the optimal design of the microgrid.

Keywords: stand-alone hybrid microgrid, dispatch strategy, renewable energy sources, load demand definition, rural electrification.

Sommario

Il presente lavoro si occupa di analizzare la potenzialità di minireti isolate ibride per l'elettrificazione di villaggi rurali lontani dalla rete elettrica nazionale in paesi in via di sviluppo.

In primo luogo si esegue una panoramica su quali sono i fabbisogni nel contesto descritto. Si illustra la metodologia che è stata adottata per tradurre questi bisogni in carichi elettrici orari, e si descrivono i dataset globali utilizzati per applicarla. I dataset e la metodologia sono stati implementati in un programma Excel+VBA che rende il processo di calcolo della domanda di elettricità automatico.

In secondo luogo si descrivono due metodologie per il dimensionamento della minirete, che rappresentano due diversi stati dell'arte: una metodologia è basata su strategie euristiche, l'altra su di un vero e proprio algoritmo di ottimizzazione. Quest'ultima riesce ad ottenere i risultati migliori. Si descrive poi una strategia euristica innovativa che è stata elaborata nel presente studio, con la quale si riesce ad ottenere un miglioramento rispetto alle strategie comunemente utilizzate in applicazioni commerciali.

Infine la strategia descritta viene utilizzata per dimensionare una minirete in tre villaggi realistici in India e per una analisi che descrive l'influenza di alcuni fattori esterni, come la velocità del vento e la disponibilità di biomassa, sul costo dell'energia prodotta, sulle taglie ottime dei componenti e sul comportamento della minirete.

In conclusione, il lavoro svolto ha portato a tre risultati importanti: (i) l'elaborazione di un algoritmo per la definizione dei carichi molto generale e flessibile con la possibilità di considerare diversi beni, (ii) la definizione di una nuova strategia euristica per la gestione di carichi e generatori programmabili, (iii) l'implementazione di una routine di ottimizzazione per l'individuazione del progetto ottimo della minirete.

Parole chiave: minirete ibrida isolata, strategia di dispacciamento, fonti rinnovabili, definizione del carico elettrico, elettrificazione rurale.

Intro

L'accesso all'elettricità è un elemento fondamentale per lo sviluppo economico e sociale di un paese, tanto da esser stato incluso tra gli obiettivi di sviluppo sostenibile (SDGs o Sustainable Development Goals) del 2015 [66].

Ad oggi, come indicato nel World Energy Outlook 2014 (WEO2014) dall'International Energy Agency (IEA), quasi 1,3 miliardi di persone non hanno accesso all'energia elettrica. Il tasso di elettrificazione medio nei paesi in via di sviluppo è del 76%, 92% nelle aree urbane e 64% nelle aree rurali.

La soluzione più comune in questi contesti consiste nell'utilizzare generatori diesel, che hanno un costo di investimento basso, ma che presentano una serie di svantaggi, tra cui elevati costi operativi, emissioni dannose per l'ambiente e per la salute ed elevata manutenzione.

Una soluzione promettente consiste invece nell'installazione di minireti ibride isolate, che sono in grado di soddisfare i bisogni della comunità sfruttando risorse locali e con costi ridotti nel lungo periodo.

Quando si lavora in contesti in via di sviluppo si affronta spesso il problema della mancanza di dati, che genera la prima difficoltà nel dimensionamento di una minirete: il calcolo della domanda di energia. Per ottenere un profilo di domanda adeguato, la soluzione migliore consiste nel raccogliere dati a livello locale. Tuttavia ciò può rivelarsi un processo lungo e costoso. Il presente lavoro si propone di raccogliere una serie di dati globali e di elaborare una metodologia generale, a partire dai quali si possa calcolare una stima accurata della domanda di energia in tutti i contesti rurali in paesi in via di sviluppo.

Un altro dato di fondamentale importanza, che tuttavia è molto difficile da ottenere, riguarda la disponibilità di biomassa, che costituisce una fonte molto interessante, in quanto rinnovabile, dispacciabile e neutra dal punto di vista delle emissioni di CO_2 . Il presente lavoro si propone di raccogliere una serie di dati globali dai quali sia possibile calcolare la disponibilità di biomassa, ovunque si trovi la zona di interesse.

Per il dimensionamento della minirete, il software commerciale più utilizzato è HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables), che si basa su una semplice strategia euristica. Il programma presenta tuttavia una serie di

difetti che possono portare a un dimensionamento non accurato. In letteratura esistono approcci più completi, che tuttavia sono molto complessi e richiedono elevati tempi di calcolo. Nel presente lavoro ci si propone di elaborare una strategia che superi alcuni dei difetti di HOMER, senza aumentare troppo la complessità e i tempi computazionali.

Capitolo 1

Il problema energetico mondiale

Nel 2015 entrano in vigore gli obiettivi di sviluppo sostenibile (SDGs o Sustainable Development Goals), un insieme di obiettivi per il futuro dello sviluppo internazionale, creati e promossi dall'organizzazione delle Nazioni Unite [66]. Essi sostituiscono gli obiettivi di sviluppo del millennio (MDGs) scaduti alla fine del 2015.

I SDGs e i MDGs si focalizzano principalmente sui paesi in via di sviluppo.

Tra i MDGs non è presente un obiettivo specifico che riguarda l'accesso all'energia, tuttavia è stata riconosciuta la necessità dell'accesso a servizi energetici affidabili per poter raggiungere gli obiettivi di sviluppo.

Con i SDGs, invece, è stato introdotto un obiettivo specifico riguardante l'accesso all'energia. Il settimo obiettivo di sviluppo sostenibile prevede, entro il 2030, di:

1. Assicurare l'accesso universale a servizi energetici affidabili e moderni;
2. Aumentare sostanzialmente entro il 2030 l'insieme dell'energia rinnovabile nel mix energetico mondiale;
3. Raddoppiare il tasso di miglioramento dell'efficienza energetica;
4. Migliorare la cooperazione internazionale per facilitare l'accesso all'energia;
5. Espandere le infrastrutture e migliorare la tecnologia per fornire servizi energetici moderni e sostenibili in tutti i paesi in via di sviluppo.

L'importanza dei MDGs e dei SDGs dal punto di vista energetico sta nel fatto che è stata riconosciuta ufficialmente la presenza di un problema energetico mondiale, e che l'accesso ai servizi energetici sia presente tra gli obiettivi fissati.

Energia e sviluppo costituiscono un binomio inscindibile: lo sviluppo economico e sociale di un paese non può avvenire senza un accesso adeguato all'energia. L'energia permette di soddisfare i bisogni di base e gioca un ruolo fondamentale per lo sviluppo industriale e rurale di un Paese [58].

Il legame tra energia e sviluppo è evidente se si fa riferimento al grafico 1.1, in cui si confrontano due indici:

- Lo Human Development Index (HDI), presentato dall' UNDP, uno degli indicatori di sviluppo più significativo, che tiene conto dell'aspettativa di vita, dell'educazione e dello sviluppo economico di un paese.
- L' Energy Development Index (EDI), presentato dall'IEA, che è l'indicatore corrispondente all'HDI, che misura lo sviluppo energetico di un paese.

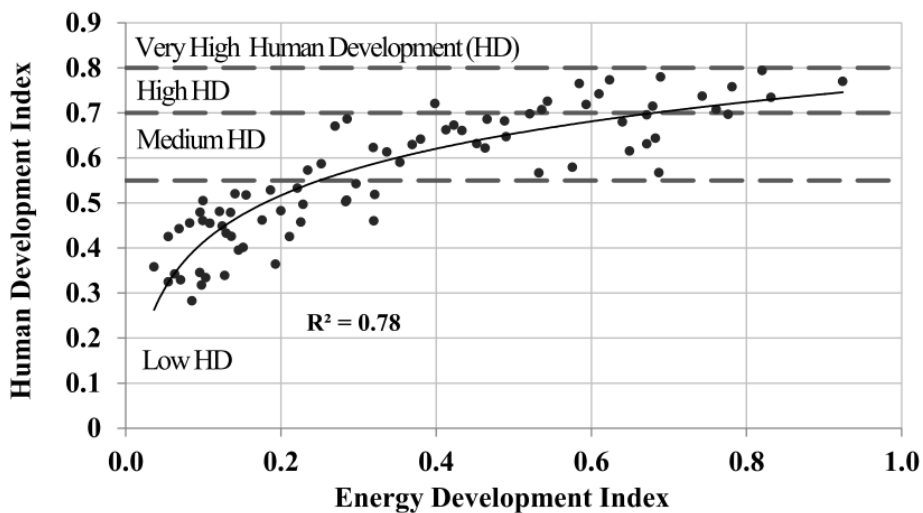


Figura 1.1: Il legame tra energia e sviluppo viene analizzato confrontando tra loro due indici: l' HDI (Human Development Index) e l'EDI (Energy Development Index). [50]

1.1 La situazione attuale

Ad oggi, come indicato nel World Energy Outlook 2014 (WEO2014) dall'International Energy Agency (IEA), quasi 1,3 miliardi di persone (600 milioni in Africa, 615 Milioni in Asia e 24 milioni in America Latina) non hanno accesso all'energia elettrica. Il tasso di elettrificazione medio nei paesi in via di sviluppo è del 76%, 92% nelle aree urbane e 64% nelle aree rurali. Quasi un miliardo

di persone sono connesse ad una rete elettrica non affidabile e 2,7 miliardi di persone (696 milioni in Africa, 1869 Milioni in Asia e 68 milioni in America Latina) dipendono dall'utilizzo di biomassa non commerciale per soddisfare i propri bisogni di base [43].

Il World Energy Outlook 2012 prevede un aumento del tasso di elettrificazione nei paesi in via di sviluppo dal 76% del 2010 all'85% nel 2030 [42]. Tuttavia, nel 2030, ancora un miliardo della popolazione mondiale non avrà accesso all'elettricità. L'accesso aumenterà soprattutto nelle aree urbane, dove fornire il servizio è più semplice e profittevole. Nelle aree rurali la popolazione che ha accesso all'elettricità è molto minore rispetto alle aree urbane (con un rapporto di circa 1 a 8), e fornire il servizio in un contesto più piccolo e non concentrato è più complesso [50].

1.2 Strategie per l'elettrificazione

L'elettrificazione delle zone senza accesso all'energia può avvenire attraverso due strategie: l'ampliamento della rete di trasmissione nazionale o la generazione distribuita.

La prima soluzione costituisce l'approccio tradizionale, tuttavia gran parte delle aree rurali nei paesi in via di sviluppo si trovano a grande distanza dalla rete e sono caratterizzate da una bassa domanda di energia. Per questo motivo, espandere la rete fino a queste aree per garantire l'accesso all'elettricità, risulta economicamente sconsigliato. Per questo motivo i governi hanno concentrato le proprie risorse sulle aree urbane, più facilmente raggiungibili e caratterizzate da attività economiche più produttive.

Spesso, inoltre, la rete nazionale nei paesi in via di sviluppo non è affidabile e non è quindi adeguata a promuovere lo sviluppo economico e industriale.

La soluzione più conveniente in questi contesti è costituita dalla generazione distribuita. Essa prevede la generazione di elettricità vicino al consumo e un dimensionamento adeguato alla domanda che portano ad una diminuzione consistente dell'investimento.

La generazione distribuita può fare uso di tecnologie convenzionali (basate sui combustibili fossili), non convenzionali (basate su fonti rinnovabili) o entrambe.

La soluzione più comune adottata nelle zone rurali senza collegamento alla rete nazionale è costituita dalla generazione decentralizzata convenzionale (uso di un generatore diesel).

Il generatore diesel è molto diffuso perché presenta una serie di vantaggi, ovvero:

- dispacciabilità

-
- tecnologia semplice che richiede poco tempo per l'installazione
 - disponibile per taglie piccole, adeguate alla domanda
 - basso costo capitale

Questa soluzione presenta tuttavia una serie di problemi:

- costi del combustibile elevati e instabili, dovuti anche alla difficoltà dell'approvvigionamento
- elevata manutenzione
- dipendenza da combustibili fossili
- problemi ambientali
- bassi rendimenti ai carichi parziali dove oltretutto il diesel lavora per la maggior parte del tempo.

L'utilizzo di fonti non convenzionali, invece, porta ad una serie di vantaggi:

- consente lo sfruttamento di risorse locali e quindi l'aumento della diversificazione e la diminuzione della dipendenza da combustibili fossili
- la manutenzione risulta minore
- la flessibilità è maggiore
- i prezzi sul lungo periodo sono bassi se confrontati con quelli del diesel.

Le fonti rinnovabili sono, tuttavia, caratterizzate da un grande difetto, ovvero l'aleatorietà.

Per questo è necessaria la presenza di un sistema di accumulo (solitamente batterie) che aumenta la complessità del sistema, la manutenzione necessaria e i costi a lungo termine.

La soluzione migliore è costituita da un sistema che fa uso di fonti convenzionali e non convenzionali, combinando i vantaggi delle due soluzioni e attutendone gli svantaggi.

La presenza del generatore diesel abbinato a una serie di generatori basati su fonti rinnovabili permette di limitare la taglia delle batterie e di ottimizzarne l'utilizzo, e di ridurre l'utilizzo del diesel e quindi i costi operativi legati al combustibile.

1.3 Definizioni e classificazione per contesti in via di sviluppo

In letteratura non è stato raggiunto un consenso per una definizione e per una classificazione della generazione distribuita. Per chiarificare il concetto si adotta l'approccio proposto da da [22].

La generazione di energia elettrica può essere:

- **centralizzata** (centralised)
- **distribuita**, (off main grid) attraverso un sistema
 - *distribuito* (distributed)
 - *decentralizzato* (decentralised)

1.3.1 Il passaggio dalla generazione centralizzata alla generazione distribuita

All'inizio dell'era elettrica in Europa la produzione di energia era decentralizzata; gli impianti di generazione fornivano elettricità solo a zone limitate caratterizzate da una domanda di energia elevata. La rete di distribuzione era in corrente continua, e questo limitava la distanza massima di trasporto dell'elettricità.

La prima era della generazione distribuita si è conclusa con la diffusione delle reti di trasmissione in corrente alternata, che hanno permesso di trasportare l'elettricità su lunghe distanze e di produrre l'elettricità con impianti di grande dimensione, diminuendo quindi i costi di produzione grazie all'effetto scala. La filiera produttiva dell'elettricità (generazione, trasmissione, distribuzione, consumo) risultava essere un monopolio statale verticalmente integrato, ovvero il sistema elettrico era centralizzato.

Questo approccio è stato seguito sia in paesi ora sviluppati sia in via di sviluppo, tuttavia i secondi hanno incontrato difficoltà nell'estendere la rete elettrica in aree rurali, e quindi nell'aumentare il tasso di elettrificazione. Inoltre il sistema elettrico centralizzato nei paesi in via di sviluppo è spesso caratterizzato da basse prestazioni, con numerosi blackout e scarsa qualità.

Il primato del sistema elettrico centralizzato si è concluso prima nei paesi sviluppati e in seguito nei paesi in via di sviluppo, con l'introduzione della competizione nell'industria elettrica a partire dagli anni '80. I motivi principali che hanno spinto alla privatizzazione del settore sono il miglioramento dell'efficienza degli investimenti e l'attrazione di capitali privati per ridurre la pressione sul budget dello stato.

La privatizzazione del settore è stata seguita da una seconda era della generazione distribuita, spinta da fattori ambientali, economici, tecnici, politici e sociali, come la riduzione dei costi di investimento e del rischio associato, la diversificazione del mix energetico, la diminuzione della dipendenza da combustibili fossili, il miglioramento delle tecnologie rinnovabili, un aumento della sensibilità rispetto all'emissione di gas serra e la possibilità di cogenerazione.

Nei paesi in via di sviluppo, a questi fattori si aggiunge il problema dell'accesso, ovvero il fatto che in molte aree la rete nazionale non è presente e non risulta economicamente conveniente estenderla in villaggi remoti. E' inoltre aumentata la spinta all'elettrificazione, perché, soprattutto a partire dal 2000, con i MDGs, è stata portata l'attenzione al legame inscindibile tra energia e sviluppo.

1.3.2 Generazione distribuita

I *sistemi decentralizzati* sono costituiti da singole unità autonome che non hanno interazioni con altre unità. Questi sistemi sono definiti need-oriented: sono progettati per bisogni specifici e sfruttano risorse locali. Si parla ad esempio di sistemi per singoli edifici o industrie. Questi sistemi possono essere sistemi stand-alone, caratterizzati da un solo consumatore e una sola fonte energetica, o microgrid, caratterizzate da più consumatori ma una sola fonte energetica.

I *sistemi distribuiti* sono basati su una produzione decentralizzata ma sono caratterizzati da una rete di distribuzione grazie alla quale tutte le unità interagiscono. Il risultato è una serie di generatori e un'unità di controllo centralizzata che riceve dati sullo stato dei componenti della rete e determina come soddisfare i carichi elettrici. Questi sistemi possono essere indipendenti o collegati alla rete elettrica. Essi sono sempre caratterizzati da più fonti energetiche e più consumatori. Vengono anche chiamati microgrid ibride.

Le microgrid ibride sono composte da unità di produzione basate sia su tecnologie tradizionali (combustibili fossili), sia non convenzionali (rinnovabili).

Per riassumere, le microgrid ibride hanno le seguenti caratteristiche:

- sono in grado di fornire energia elettrica e/o termica ad un carico relativamente grande
- presentano un proprio sistema di controllo che opera secondo una strategia di gestione ottimizzata

-
- possono operare o meno in connessione con la rete elettrica principale. Nel caso in cui la microgrid sia allacciata alla rete, essa può funzionare da gruppo modulabile che partecipa ai servizi secondari di rete.
 - Sono dotate di un sistema di accumulo dell'energia elettrica.

L'installazione di minireti ibride risulta quindi quasi sempre la soluzione più sostenibile (dal punto di vista sociale, economico e ambientale) per l'elettrificazione di villaggi rurali in paesi in via di sviluppo. (capitolo 1.3.1)

1.4 Stato delle microgrid nel mondo

Si è visto che le microgrid costituiscono la soluzione migliore per l'elettrificazione dei villaggi rurali in paesi in via di sviluppo. Tuttavia esse sono un fenomeno globale e non riguardante solamente il contesto appena descritto.

Navigant Research [7] tiene traccia delle microgrid operative, in costruzione e proposte, con report annuali che, sebbene non esaustivi, permettono di quantificare a grandi linee le dimensioni del mercato delle microgrid e di tenere traccia dei cambiamenti annuali.

Per poter tenere traccia delle microgrid è necessario in primo luogo avere una definizione precisa.

Navigant Research utilizza la definizione dell'US Department of Energy (DOE): un gruppo di carichi e risorse energetiche distribuite interconnessi all'interno di confini elettrici ben definiti che agisce come una singola entità controllabile per quanto riguarda la rete. Una microgrid può connettersi o disconnettersi dalla rete e questo le permette di operare sia connessa che isolata.

Navigant Research allarga la definizione del DOE e include nella propria analisi anche sistemi remoti, ovvero non connessi alla rete o connessi ad una rete altamente inaffidabile [7].

L'ultimo report disponibile è quello del maggio 2015, in cui si stima un totale di circa 12031 MW di capacità installata a livello mondiale [55], quasi il triplo rispetto ai 4393 MW del 2014.

Delle microgrid operative, il 66% si trova in Nord America, che attualmente è il leader del mercato. Tuttavia in base al numero di progetti presenti c'è la possibilità che in futuro sia l'Asia a ricoprire questo ruolo. Questo è dovuto soprattutto ad un programma di sviluppo in Cina, che progetta di aumentare la capacità da microgrid di 4000 MW nei prossimi 5 anni, sia in applicazioni collegate alla rete che remote.

Le microgrid possono essere a loro volta classificate in base alla loro funzione e in base alla loro connessione o meno con la rete.

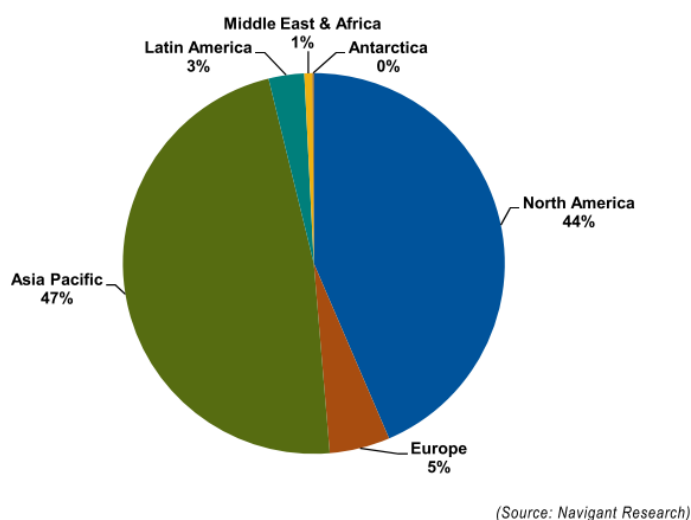


Figura 1.2: Capacità totale da microgrid divisa per regione [55]

- Commerciale-industriale.

Possono essere sviluppate per garantire un'alta qualità e affidabilità per processi o carichi critici in centri industriali o commerciali. Sono connesse alla rete esterna con cui possono scambiare energia.

- Utility

Sono connesse a reti urbane, e sono sotto il controllo del Distribution System Operator.

- Institutional/campus

- Military

- Remote.

Per comunità isolate o isole, non scambiano elettricità con la rete principale.

Le microgrid remote sono definite come sistemi completamente isolati che operano in contesti remoti quali villaggi rurali, comunità montane e isole.

Tra le varie tipologie prevalgono le microgrid remote, sia in numero di progetti che in capacità installata (raddoppiata rispetto al 2014) che rappresentano il 46% del mercato.

Capitolo 2

Domanda

2.1 Caratterizzazione della domanda di energia

L'obiettivo dell'installazione di una minirete è quello di soddisfare quei bisogni della comunità che possono essere tradotti in carichi elettrici o di migliorare servizi già presenti che presentano limiti dovuti al mancato accesso alla rete elettrica.

Per poter dimensionare una minirete è fondamentale conoscere l'andamento della domanda di energia. E' molto difficile ottenere una curva di domanda di energia, soprattutto in contesti rurali in paesi in via di sviluppo, dove non vengono raccolti dati al riguardo. In assenza dell'accesso all'energia, inoltre, la domanda non può essere misurata ma solo stimata.

Da una parte, per poter avere un profilo accurato, è necessario interagire direttamente con la comunità di interesse, raccogliendo dati e interrogando i beneficiari del progetto per conoscerne i bisogni. Tuttavia, essendo il presente lavoro incentrato su villaggi simili tra loro, è possibile pensare ad una metodologia generale, valida in questo contesto. I villaggi in questione sono isolati e, come spiegato nel capitolo 1.2, non risulta conveniente estendere la rete, anche a causa della domanda troppo bassa. L'economia è basata sull'agricoltura.

Per poter eseguire una stima accurata della domanda di energia, è utile in primo luogo classificare i bisogni della comunità che possono essere tradotti in una domanda di energia.

Una prima classificazione, valida in villaggi rurali in paesi in via di sviluppo, è la seguente:

- **bisogni di base**
- **bisogni legati all'agricoltura**
- **bisogni legati agli usi produttivi**

Di seguito si descrive più nel dettaglio la classificazione, come si possa partire dai vari tipi di bisogni per stimare la domanda di energia, quali sono i dati necessari e dove possono essere trovati.

2.1.1 Basic needs - bisogni di base

I bisogni di base possono essere a loro volta suddivisi in:

- energia necessaria nelle abitazioni
- energia necessaria per i servizi comunitari

Abitazioni I principali servizi energetici utilizzati nelle abitazioni che si trovano in villaggi rurali in paesi in via di sviluppo sono i seguenti:

Illuminazione

Se l'elettricità non è disponibile le abitazioni vengono illuminate con lampade al kerosene e candele. Queste sono, tuttavia, fonti costose e dannose per la salute.

Cucina

Per cucinare vengono utilizzati diversi tipi di combustibile, spesso dannosi per la salute, costosi e difficili da reperire. Il problema dei combustibili utilizzati per la cucina è noto nel campo della cooperazione [22].

Purtroppo, spesso, la disponibilità di elettricità non basta per risolvere questo problema, poiché troppo legato alle tradizioni e ad altri fattori sociali.

Acqua calda

Oltre all'acqua da bere, gli usi principali di acqua in una abitazione sono :

Igiene personale

Strutture di base igienico-sanitarie

Attività domestiche come cucinare, lavare piatti e vestiti

L'UNDP (United Nations Development Programme) in [67] fornisce il consumo medio di acqua al giorno per persona in diversi paesi. Esso è pari a 4 litri al giorno per persona in Mozambico, a 200-300 litri al giorno per persona nella maggior parte dei paesi europei, e a 575 litri al giorno per persona negli USA (figura 2.1).

La soglia di povertà per l'acqua, stabilita da agenzie come la World Health Organization (WHO) e l'UNICEF, è pari a:

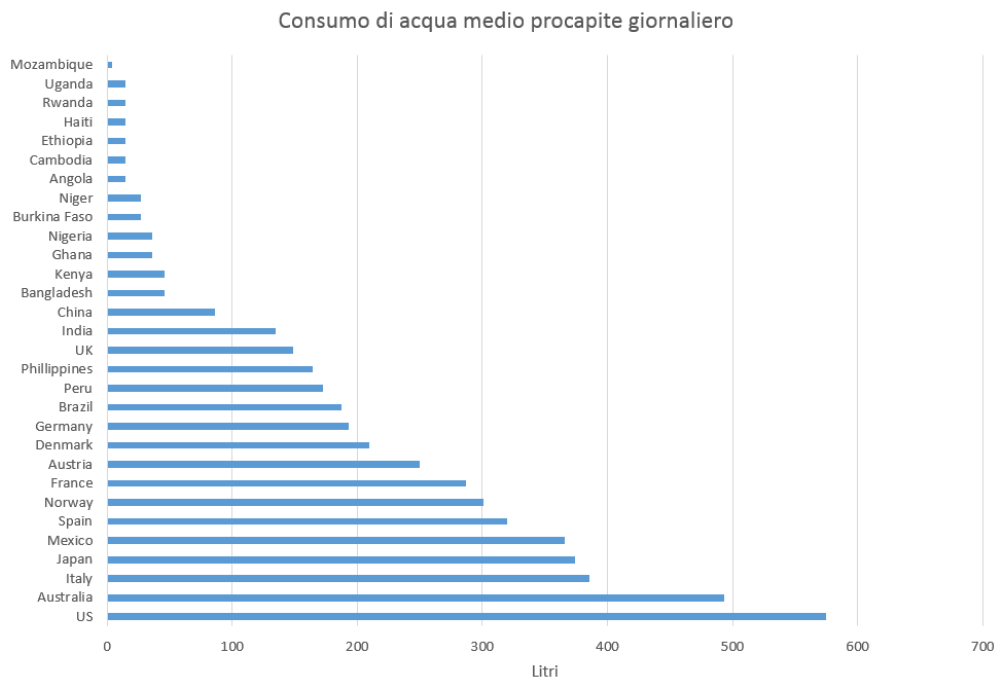


Figura 2.1: Il grafico mostra il consumo di acqua medio procapite giornaliero in diversi paesi, da quelli industrializzati a quelli in via di sviluppo [67]

20 litri al giorno per persona se si considerano come bisogni di base l'acqua da bere e l'igiene personale di base

50 litri al giorno per persona includendo docce e lavanderia.

In india la media del consumo pro capite è pari a 135 litri al giorno, tuttavia le medie nazionali mascherano inevitabilmente grandi differenze interne, specialmente in paesi come questo dove sono presenti zone sviluppate e zone in via di sviluppo.

In vista di uno sviluppo futuro delle aree di interesse, si ipotizza che la disponibilità di acqua sia pari alla soglia minima di 50 litri al giorno per persona.

L'ipotesi è plausibile anche considerati i dati di [65], dove si vede che l'accesso alle fonti migliorate di acqua potabile nelle zone rurali in India è passato da 88% nel 2010 a 93% nel 2015.

L'acqua viene solitamente scaldata utilizzando il legno come combustibile, raramente utilizzando scaldabagno elettrici. Questo è un problema simile a quello dei combustibili utilizzati per cucinare, anche se meno legato a

fattori sociali. E' possibile quindi introdurre scaldabagno elettrici tra i carichi dei bisogni di base.

L'acqua deve, inoltre, essere portata dalla fonte idrica (falda acquifera) alle case. In questi contesti l'ipotesi più probabile è che ci sia un pozzo comune dove l'acqua viene resa disponibile a tutto il villaggio, e che l'acqua venga prelevata per mezzo di pompe a mano, alimentate tramite diesel o (in caso di accesso all'elettricità) motore elettrico.

Si ipotizza un pozzo comune dove viene resa disponibile l'acqua potabile per tutto il villaggio. Per rendere l'acqua potabile si ipotizza di utilizzare un impianto ad osmosi. Le pompe utilizzate per prelevare l'acqua dalla falda e l'impianto ad osmosi generano un carico elettrico programmabile, grazie alla possibilità di installare un serbatoio dell'acqua. Per il calcolo dell'energia necessaria si utilizza lo stesso metodo che verrà illustrato del capitolo sull'Agricoltura, poichè si tratta dello stesso tipo di carico.

Altre apparecchiature

Spesso nelle abitazioni nei villaggi rurali dei paesi in via di sviluppo sono presenti apparecchiature come televisione, telefoni cellulari, frigoriferi e ventilatori elettrici.

Servizi per la comunità L'energia gioca un ruolo fondamentale per migliorare l'accesso e la qualità dei servizi comunitari, quali educazione, salute e sicurezza.

Educazione

Per quanto riguarda l'educazione, l'energia è fondamentale per migliorare le attrezzature delle scuole quali illuminazione e tecnologia dell'informazione.

Salute

Gli ospedali hanno bisogno di elettricità per fornire cure adeguate e per poter fornire acqua calda ai pazienti. Hanno inoltre bisogno di illuminazione lungo tutto l'arco delle ventiquattro ore.

Sicurezza

In questo caso per sicurezza si intende la presenza di illuminazione pubblica sufficiente e adeguata.

2.1.2 Agricoltura

L'agricoltura contribuisce in modo significativo all'insieme economico e sociale della maggior parte dei paesi in via di sviluppo. Il 45 per cento della popolazione nei paesi in via di sviluppo vive in nuclei familiari dipendenti dall'agricoltura [29]. In questi paesi le aziende agricole sono di dimensioni molto piccole (0.5 - 1 ettaro) e di gestione familiare [31].

Aumentare la produttività agricola costituisce il motore primario per garantire la sicurezza alimentare, per la generazione di reddito, per lo sviluppo di aree rurali e quindi per la riduzione della povertà globale.

Di seguito si fornisce una panoramica del fabbisogno energetico di ciascuna attività legata alla produzione agricola, seguendo l'approccio e le definizioni illustrate da [39].

Preparazione del terreno, coltivazione, raccolta L'energia in ingresso in questa fase si divide in diretta e indiretta.

La potenza diretta necessaria per lo svolgimento di questa attività viene fornita da lavoro umano, da animali da tiro o da macchinari azionati da motori a combustione interna, come trattori e mietitrebbie a benzina o diesel. Per quanto riguarda la produzione dei piccoli proprietari terrieri, la maggior parte dell'energia diretta in ingresso viene fornita dal lavoro umano e dagli animali da tiro. In ogni sistema agricolo, la meccanizzazione è fondamentale per aumentare la produttività del terreno e della manodopera.

Per potenza indiretta si intende l'energia necessaria per produrre fertilizzanti, erbicidi, pesticidi, e per la loro distribuzione e trasporto.

Non ci si è occupati di questa fase poichè nessuno di questi input è legato alla disponibilità di elettricità.

Irrigazione L'accesso all'acqua è di fondamentale importanza per la produttività agricola e per stabilizzare i raccolti. La produttività dei terreni irrigati è spesso più che doppia rispetto a quella dei terreni alimentati ad acqua piovana, poichè l'acqua piovana spesso non è sufficiente a soddisfare completamente il fabbisogno idrico delle colture.

La figura 2.2 mostra come la produttività dei raccolti aumenti all'aumentare dell'alimentazione di acqua, fino al raggiungimento di un massimo.

Anche i dati raccolti da [33] testimoniano come la produttività dei terreni irrigati sia sempre maggiore rispetto a quella alimentati da acqua piovana, come viene illustrato nella tabella 2.1.

Per irrigazione si intende la distribuzione dell'acqua necessaria per la crescita dei raccolti. Il fabbisogno energetico per questa attività è dato dall'energia

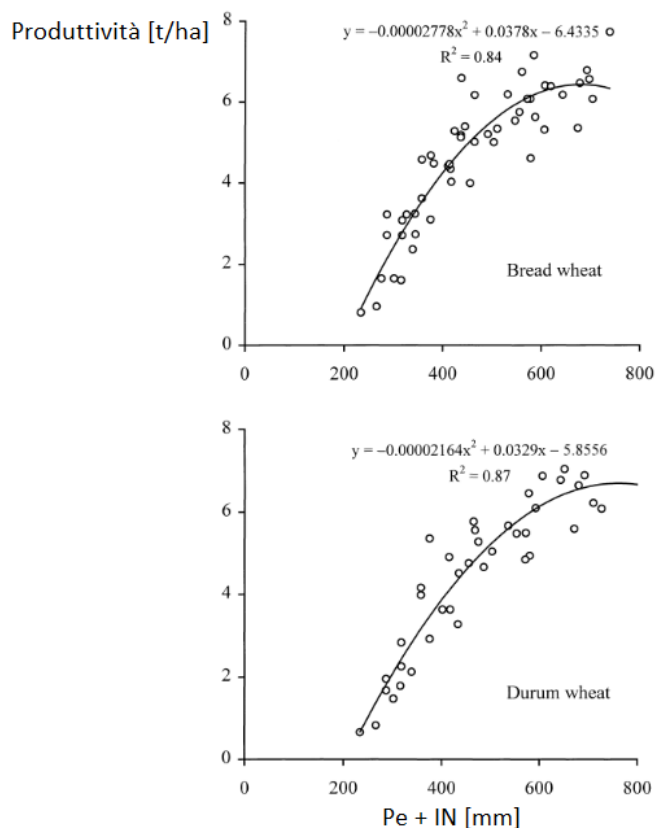


Figura 2.2: Relazione tra la produttività di due tipi di grano e la quantità totale di acqua fornita, che include precipitazioni effettive (Pe) e irrigazione (IN), per dieci stagioni (dal 1985-86 al 1995-96). La produttività raggiunge un massimo per 600 mm di acqua totale applicata. L'apporto minimo di acqua è di 200 mm in entrambi i casi [71].

richiesta per sollevare l'acqua da fonti superficiali (come canali, fiumi o stagni) o sotterranee, usando pozzi aperti o trivellati, a canali superficiali, riserve o serbatoi sopraelevati. Essa dipende da:

- **volume** d'acqua richiesto dal raccolto
- **profondità** della sorgente

Volume d'acqua richiesto dal raccolto. Il fabbisogno idrico di un raccolto può essere soddisfatto dalle precipitazioni, dall'irrigazione o da una combinazione di entrambi.

Il fabbisogno idrico della pianta ET [mm/mese] è la quantità d'acqua necessaria per compensare la perdita d'acqua attraverso l'evapotraspirazione della

Tabella 2.1: La tabella mostra il rapporto tra la produttività di terreni irrigati e la produttività di terreni non irrigati in $\left[\frac{t}{ha_{coltivati}} \right]$. La produttività del terreno aumenta sempre passando da terreno non irrigato a terreno irrigato. I dati di [33] sono stati mediati su tutto il territorio dell'India.

Coltura	$\frac{[t/ha, irrigato]}{[t/ha, precipitazioni]}$
grano	2,53
miglio	1,61
mais	2,48
sorgo	1,52
riso	2,65
altri cereali	2,04
girasole	2,23
soia	2,05
arachidi	1,48
cotone	1,81
verdure	2,48

pianta. Soddisfare il bisogno idrico della pianta significa raggiungere il massimo della curva in figura 2.2.

Il fabbisogno di acqua per l'**irrigazione** (IN , *Irrigation water Need*) è la differenza tra il **fabbisogno** idrico della pianta (ET , *EvapoTranspiration*) e quella parte delle **precipitazioni** che può essere utilizzata dalle radici (Pe *precipitazione effettiva*).

$$IN \left[\frac{mm}{mese} \right] = ET - Pe$$

Il fabbisogno idrico della pianta ET dipende dal **clima**, dalla **coltura** e dallo **stadio di crescita** della pianta, e si esprime come

$$ET \left[\frac{mm}{mese} \right] = K_c ET_0$$

dove ET_0 (*evpotraspirazione di riferimento*) esprime la dipendenza dal clima e K_c esprime la dipendenza dalla coltura e dallo stadio di crescita (adimensionale).

Influenza del clima

I quattro fattori climatici che influenzano il fabbisogno idrico del raccolto sono

- la radiazione solare
- la temperatura dell'aria
- l'umidità
- la velocità del vento

In particolare il fabbisogno d'acqua cresce con la radiazione solare, la temperatura e la velocità del vento, mentre diminuisce con l'umidità.

L'influenza del clima sul fabbisogno idrico della coltura è espresso da ET_0 , l'evapotraspirazione di riferimento, in mm/mese. Essa rappresenta l'evapotraspirazione di una larga area coperta di prato con determinate caratteristiche.

ET_0 può essere determinata:

- **sperimentalmente**, se possibile
- attraverso formule di derivazione **empirica**, sviluppate e valide localmente
- attraverso metodi **teorici** di validità generale.

Un metodo teorico semplice è il metodo FAO Blaney-Criddle che fornisce una buona stima sia stagionale che mensile dell'evapotraspirazione. Tuttavia può portare a errori in condizioni climatiche estreme, in particolare sovrastime in aree soleggiate, asciutte e ventose, e sottostime in aree nuvolose, umide e calme, infatti esso dipende solo dalla temperatura e dalle ore di insolazione.

La formula di Blaney-Criddle è:

$$ET_0 = p(0.46T_{media} + 8)$$

dove

ET_0 = evapotraspirazione di riferimento [mm/mese]

p = rapporto percentuale fra le ore di insolazione del giorno considerato e le ore di insolazione totali annue, dipendente solo dalla latitudine

T_{media} = temperatura media mensile dell'aria [°C].

Il metodo teorico che è stato utilizzato per sviluppare il programma è più dettagliato e dipende da tutti e quattro i fattori climatici. Esso è il metodo illustrato da [4].

Influenza del tipo di coltura e dello stadio di crescita

L'influenza del tipo di coltura e dello stadio di crescita sull'evapotraspirazione è data da K_c (coefficiente colturale adimensionale), che dipende da

- tipo di coltura
- stadio di crescita
- durata del periodo totale di crescita

La durata del periodo totale di crescita dipende dalle circostanze locali. Se il dato non è noto a priori, si può ottenere risalendo al sistema agricolo della zona.

Il periodo totale di crescita è diviso in quattro stadi di crescita:

1. stadio iniziale
2. stadio di copertura
3. stadio di pieno sviluppo
4. stadio di maturazione

Ad ogni stadio di crescita corrisponde un diverso coefficiente K_c .

Per lo sviluppo del seguente lavoro è stata eseguita una media dei coefficienti colturali pesata rispetto ai quattro stadi di crescita, ottenendo così un coefficiente per coltura (tabella 2.2).

Poi, nelle zone in cui si coltivano più di una coltura, è stata effettuata una media dei coefficienti delle varie colture. Il risultato ottenuto è illustrato nella figura 2.3

Non si tratta di una approssimazione eccessiva o scorretta, perché spesso vengono coltivate più colture nello stesso periodo, e in ogni caso i coefficienti sono molto simili.

La domanda di acqua (ET) dipende quindi soprattutto dal clima (ET_0) e meno dal tipo di raccolto (K_c).

La domanda di acqua viene in parte soddisfatta dalle precipitazioni e in parte dall'irrigazione.

Tabella 2.2: La tabella mostra il coefficiente colturale k_c delle principali colture. Esso serve per calcolare il fabbisogno idrico del raccolto. Si può notare come i coefficienti colturali non siano molto variabili da una coltura all'altra. Quelle che richiedono più acqua sono il riso, seguito da cacao, caffè e tè, e dalla canna da zucchero. La coltura che richiede meno acqua sono le olive.

Coltura	k_c
grano	0,86
miglio	0,85
mais	0,88
sorgo	0,86
riso	1,10
altri cereali	0,78
girasole	0,75
soia	0,82
arachidi	0,84
cotone	0,84
verdure	0,94
patata bianca e patata dolce	0,86
barbabietola da zucchero	0,96
rapa	0,80
canna da zucchero	1,00
legumi	0,87
olive	0,69
palma da olio	0,99
foraggio	0,85
cacao,caffè e tè	1,04
manioca e altre radici	0,82

Precipitazione effettiva

Non tutta l'acqua piovana può essere utilizzata dalle piante.

La precipitazione effettiva (Pe) è l'acqua di pioggia che penetra nel suolo e resta a disposizione della coltura.

Quando l'acqua piovana (1) cade sul suolo, essa:

- in parte si infiltra nel sottosuolo (2)
- in parte stagna in superficie (3)
- in parte scorre sulla superficie se il piano è inclinato (4)

Quando smette di piovere, l'acqua rimasta in superficie (3), può:

- evaporare(5)

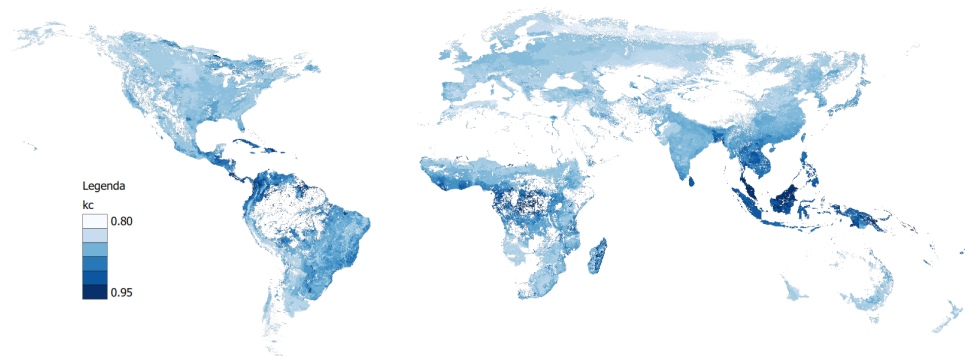


Figura 2.3: La mappa mostra la media dei coefficienti colturali di tutte le colture

- lentamente infiltrarsi nel sottosuolo (6)

Dell'acqua infiltratasi nel sottosuolo (6)+(2),

- una parte va oltre la zona delle radici (7)
- il resto rimane conservato nella zona delle radici (8) e può quindi essere utilizzata dalla pianta.

La precipitazione effettiva è quindi rappresentata da:

$$Pe = (8) = (1) - (4) - (5) - (7)$$

ovvero, da tutta l'acqua piovana meno quella che scorre a causa dell'inclinazione del piano, meno quella che evapora, meno quella che arriva troppo in profondità (figura 2.4).

I fattori che influenzano il meccanismo descritto sono il clima, la struttura del sottosuolo, la granulometria del sottosuolo e la profondità delle radici. Se le precipitazioni sono abbondanti, la parte di acqua persa oltre la zona delle radici e per scorrimento è elevata. Infatti, una volta che il suolo in prossimità della zona delle radici è saturo, il resto dell'acqua cola in profondità. Inoltre, se le precipitazioni sono elevate, la percentuale di acqua persa per scorrimento aumenta.

In molti paesi esistono formule locali per determinare la precipitazione effettiva. Nel presente lavoro è stata utilizzata la seguente formula [11], che tiene conto dell'abbondanza delle precipitazioni.

$$Pe = 0.8P - 25 \quad \text{se} \quad P \geq 75 \frac{\text{mm}}{\text{mese}}$$

$$Pe = 0.6P - 10 \quad \text{se} \quad P < 75 \frac{\text{mm}}{\text{mese}}$$

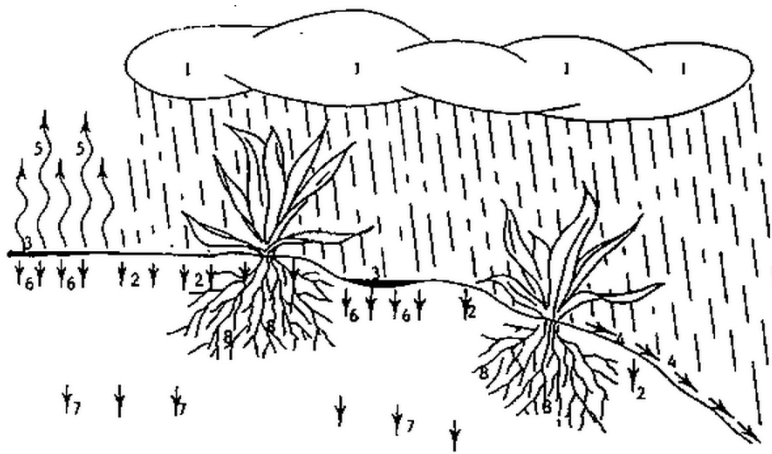


Figura 2.4: La precipitazione effettiva (8) è pari a tutta l'acqua piovana (1) meno quella che scorre a causa dell'inclinazione del piano (4), meno quella che evapora (5) meno quella che arriva troppo in profondità (7).[11]

dove

Pe = precipitazione effettiva in $mm/mese$

P = precipitazione in $mm/mese$

Portata d'acqua da fornire

IN (Irrigation water need) rappresenta l'acqua che deve essere fornita con l'irrigazione come supplemento delle precipitazioni. Essa è indipendente dall'area da irrigare e dal sistema utilizzato per l'irrigazione.

E' necessario introdurre un nuovo parametro, SIN_{gross} , la portata d'acqua necessaria per irrigare l'intera area, ipotizzando una portata continua.

Esso tiene conto dell'area coltivata con A [ha] e del sistema utilizzato per l'irrigazione con e , l'efficienza del sistema di irrigazione.

E' necessario prima convertire IN da $[\frac{mm}{mese}]$ a $[\frac{m^3}{sha}]$ dividendolo per 259200.

$$SIN_{gross} \left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{IN \left[\frac{m^3}{sha} \right] * A [ha]}{e}$$

Per lo sviluppo del programma si vuole mantenere l'indipendenza dall'area coltivata. Si calcola quindi SIN_{gross} come

$$\bar{SIN}_{gross} \left[\frac{m^3}{sha} \right] = \frac{IN \left[\frac{m^3}{sha} \right]}{e}$$

La formula precedente mostra anche come l'efficienza di irrigazione sia fondamentale per il risparmio di acqua, specialmente nei paesi dove il bene è scarso. I diversi tipi di sistemi di irrigazione verranno approfonditi nel paragrafo successivo.

Poiché il terreno è un serbatoio di acqua, non è necessario irrigare con una portata continua. Si può irrigare a intervalli intermittenti se il volume totale di acqua fornito nel mese è pari al volume totale necessario.

Se si utilizza un metodo di irrigazione intermittente, aumenterà la portata d'acqua che circola nei canali e che viene elaborata dalle pompe, in particolare:

$$SIN_{op} \left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{SIN_{gross}}{T_{op}}$$

dove

$$T_{op} = \frac{d}{7} \frac{h}{24}$$

con

d = giorni di irrigazione a settimana

h = ore di irrigazione al giorno.

Questi due valori dipendono da parametri operativi come disponibilità di energia, di acqua, presenza di precipitazioni e di manodopera.

Tecnologie usate per l'irrigazione.

I sistemi di irrigazione differiscono in base all'efficienza nell'uso dell'acqua e alla richiesta di energia per il pompaggio, legata alle perdite di carico nel circuito di irrigazione. I principali sistemi di irrigazione sono i seguenti:

- *Irrigazione manuale*

Vengono utilizzati secchi d'acqua o annaffiatori.

Non sono richieste infrastrutture o attrezzature tecniche, tuttavia richiede elevata manodopera. Essa pone quindi un limite alla grandezza della zona da coltivare.

- *Irrigazione per scorrimento superficiale*

L'acqua scorre per gravità. Il campo sul quale è applicato deve essere dotato di una certa pendenza, che può essere naturale o creata artificialmente mediante opportuna sistemazione. L'acqua si riversa sul campo grazie a un fossetto adduttore posto a monte del campo, e scorre sulla superficie da irrigare sotto forma di un velo sottile e uniforme sino a raggiungere il

grado di saturazione desiderato per il terreno. L'acqua eventualmente in eccesso viene raccolta a valle del campo mediante un fossetto colatore.

La tecnologia richiesta è semplice e il costo è basso, tuttavia può portare all'aumento della salinità del suolo e quindi alla perdita progressiva di area coltivabile e l'uso dell'acqua è inefficiente con alte perdite per evaporazione.

- *Irrigazione a pioggia*

L'acqua viene pompata a uno o più postazioni centrali all'interno del campo, e distribuita attraverso irrigatori a pioggia in pressione che la nebulizzano.

Richiede meno manodopera e l'uso dell'acqua è più efficiente rispetto all'irrigazione per scorrimento, tuttavia richiede capacità tecniche per il funzionamento e la manutenzione. I costi di pompaggio possono essere elevati.

- *Irrigazione a goccia o microirrigazione*

L'acqua viene erogata in portate molto ridotte e a basse pressioni, direttamente o vicino alle radici delle piante.

L'uso dell'acqua è molto efficiente, la manodopera richiesta dopo l'installazione è molto bassa. La richiesta di energia è simile a quella dell'irrigazione a pioggia, perché la diminuzione della pressione necessaria all'erogatore viene bilanciata dalla necessità di introdurre dei filtri per rimuovere particelle che possono otturare le tubature. Per questo motivo richiedono una elevata manutenzione. Possono essere sistemi costosi.

Al fine di calcolare l'input di energia necessario, è utile capire quali sono le perdite di carico nel circuito di irrigazione:

- *emettitore*

Per poter irrigare uniformemente il terreno l'acqua arriva in pressione agli emettitori. Essi vengono quindi considerati causa di una perdita di carico concentrata.

Questa perdita è maggiore in caso di irrigazione a pioggia perché l'acqua deve percorrere una distanza maggiore una volta uscita dall'emettitore.

- *filtro*

Questa perdita è presente solo in caso di irrigazione a goccia, dove è necessario rimuovere particelle che possono otturare le tubature di diametro minore. Si considera la perdita di carico ammissibile indicata dal costruttore del filtro.

- *distribuzione*

Le perdite di distribuzione sono perdite di carico distribuite che si hanno tra il filtro e il collettore, quindi nella linea di distribuzione principale.

Queste perdite sono uguali in caso di irrigazione a pioggia e a goccia.

- *collettore*

Il collettore è presente solo in caso di irrigazione a goccia e separa il canale di distribuzione principale dai canali laterali.

- *canali laterali*

I canali laterali portano l'acqua direttamente sotto le radici della pianta. Anch'essi sono presenti solo in caso di irrigazione a goccia.

Nella tabella 2.3 vengono raccolti valori tipici delle perdite di carico elencate.

Perdite di carico [psi]	Irrigazione a pioggia		Irrigazione a goccia
	Bassa pressione	Alta pressione	
Emettitore	30 - 50	50 - 80	7 - 25
Filtro	\	\	5
Distribuzione	\	\	5 - 20
Collettore	5 - 20	5 - 20	1 - 3
Canali laterali	\	\	1 - 5

Tabella 2.3: La tabella mostra valori tipici delle perdite di carico presenti in sistemi di irrigazione a pioggia e a goccia. L'irrigazione a pioggia ha più perdite di carico all'emettitore, l'irrigazione a goccia ha più perdite di carico di distribuzione e necessita, inoltre, di un filtro. Le due tecnologie sono, quindi, energeticamente equivalenti. Tuttavia l'irrigazione a goccia permette di risparmiare più acqua.

Efficienza del sistema di irrigazione

Non tutta l'acqua che viene presa da una fonte raggiunge le radici delle piante. Esistono una serie di perdite:

- nei **canali**. Ad esempio nei canali in terra possono essere dovute a evaporazione dalla superficie, percolazione nel suolo, superamento degli argini. Queste perdite vengono espresse con e_c .

- nel **campo**, a causa di drenaggio dell'acqua o di penetrazione dell'acqua in strati troppo profondi del sottosuolo (analogamente all'acqua delle precipitazioni). Queste perdite vengono espresse con e_a .

Per tener conto di queste perdite si utilizza l'efficienza di irrigazione, definita come

$$e = e_c e_a$$

dove

$e_c = conveyance\ efficiency$ esprime l'efficienza del trasporto attraverso i canali. Essa dipende dalla lunghezza dei canali e dal tipo (in terra o rivestiti). Valori tipici di questo parametro vengono illustrati nella tabella 2.4.

$e_a = field\ application\ efficiency$ esprime l'efficienza dell'applicazione sul terreno, e dipende dal sistema di irrigazione utilizzato. Valori tipici di questo parametro vengono illustrati nella tabella 2.5.

Lunghezza canali	Canali in terra			Canali rivestiti
	Granulometria del suolo			
	Sabbioso	Terra grassa	Argilloso	
Lunghi (>2000m)	60%	70%	80%	95%
Medi (200-2000m)	70%	75%	85%	95%
Corti (<200m)	80%	85%	90%	95%

Tabella 2.4: La tabella contiene i valori di e_c per diversi tipi di canali. e_c esprime l'efficienza di trasporto dell'acqua lungo i canali. Essa è elevata per i canali rivestiti, bassa per i canali scavati in terreno. Per questi ultimi, aumenta al diminuire della lunghezza del canale e all'aumentare dell'impermeabilità del terreno, poichè meno acqua viene assorbita nel sottosuolo lungo il percorso. Per risparmiare acqua è quindi sempre meglio utilizzare canali rivestiti.

I valori riportati in tabella 2.5 mostrano che l'irrigazione a goccia è il sistema più efficiente dal punto di vista dell'utilizzo di acqua, seguito dall'irrigazione a pioggia. L'irrigazione a scorrimento è, invece, il sistema meno efficiente.

Profondità della sorgente La profondità della sorgente dipende dalla fonte d'acqua utilizzata. Le principali fonti utilizzate per l'agricoltura sono

Metodo di irrigazione	efficienza di applicazione
Irrigazione a superficie	60%
Irrigazione a pioggia	75%
Irrigazione a goccia	90%

Tabella 2.5: La tabella mostra valori tipici di e_a per diversi sistemi di irrigazione. e_a esprime l'efficienza di applicazione dell'acqua sul terreno. Il sistema con maggior efficienza è quello a goccia, poiché l'applicazione dell'acqua è molto precisa: si raggiungono direttamente le radici della pianta. La precisione di applicazione diminuisce con l'irrigazione a pioggia. Il sistema meno efficiente è l'irrigazione a superficie.

- fiumi
- laghi
- acqua di falda

Quando disponibile l'apporto di fiumi e laghi è preferibile, ma queste fonti non sono uniformemente distribuiti sul territorio.

La falda acquifera è invece solitamente caratterizzata da buona uniformità. Essa è caratterizzata da un certo volume di acqua stoccato, dalla ricarica annuale, dalla massima produttività dei pozzi e dalla profondità a cui si trova. Queste caratteristiche rendono l'acqua di falda più o meno accessibile.

Di seguito si mostrano le mappe che illustrano le caratteristiche della falda in Africa.

L'acqua di falda è un'importante fonte soprattutto per i progetti di piccola taglia. Essa ha il grande vantaggio di dipendere poco dai cambiamenti climatici, e viene quindi considerata una fonte poco irregolare e sicura.

Il sottosuolo è formato da una serie di strati

- impermeabili (roccia compatta o argilla)
che non possono contenere acqua
- porosi (sabbia grossa o ghiaia)
che permettono all'acqua di filtrare nel terreno dalla superficie. Strati porosi pieni d'acqua sono chiamati acquiferi.

L'acqua di falda può trovarsi in profondità o vicino alla superficie, ma in ogni caso è disponibile solo nel sottosuolo, e deve quindi essere sollevata o pompata in superficie. Quando la falda è poco profonda (pochi metri

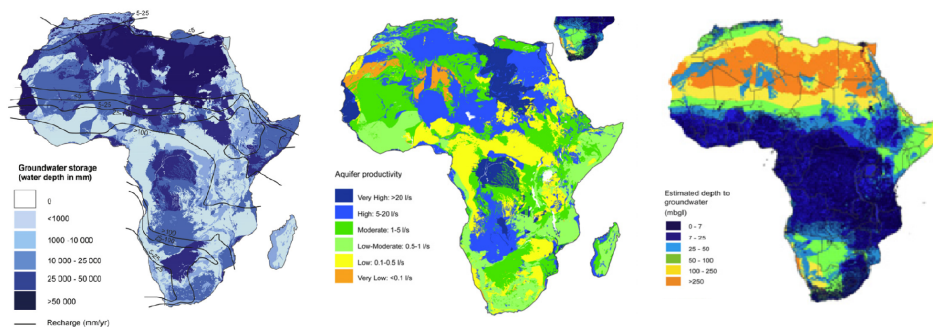


Figura 2.5: L'immagine mostra le caratteristiche della falda acquifera in Africa: volume stoccato, ricarica annuale, produttività e profondità. Si tratta delle prime mappe quantitative della falda africana. Il volume di acqua stoccato nella falda africana è molto elevato (0,6 milioni di km^3), e distribuito in tutto il territorio. Il problema maggiore è dato dalla profondità della falda nelle zone aride, dove arriva anche a superare i 250 m. I pozzi possono essere alimentati da pompe a mano fino ai 50m di profondità. I costi aumentano in modo sostanziale oltre i 100 m a causa della necessità di attrezzatura sempre più specifica per scavare il pozzo [6].

dalla superficie) i pozzi possono anche essere scavati a mano, ma l'area che possono irrigare è limitata. Per gli acquiferi profondi bisogna usare tecniche di perforazione e pompe sommerse al di sotto del livello della falda.

Calcolo della potenza e dell'energia richiesta Nota la portata d'acqua necessaria e la profondità della sorgente, è possibile calcolare la potenza richiesta dalla pompa.

Potenza

La potenza richiesta da una pompa si calcola con la formula

$$P_{OT} = \frac{\dot{Q}H_P}{\eta}$$

dove

P_{OT} = potenza richiesta dalla pompa in $[W]$

\dot{Q} = portata elaborata dalla pompa in $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

H_P = prevalenza della pompa in $[Pa]$

η = rendimento della pompa

La prevalenza che la pompa deve fornire è data da

$$H_P = H_{geo} + J + \sum j_i$$

dove

H_{geo} = prevalenza geodetica in [Pa], $H_{geo} = \rho gh$ con h = dislivello tra la fonte e il campo da irrigare, in [m]

J = perdite di carico distribuite in [Pa]

j_i = perdite di carico concentrate in [Pa]

Le perdite di carico concentrate e distribuite possono essere calcolate attraverso le seguenti formule,

$$J = f \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2}$$

$$j_i = \epsilon \frac{\rho v^2}{2}$$

dove f è il fattore d'attrito, ϵ è il coefficiente di perdita concentrata, L e D sono le dimensioni dei condotti in [m], e v è la velocità dell'acqua in [$\frac{m}{s}$],

oppure, come nel presente lavoro, possono essere utilizzati i valori di riferimento legati alla tecnologia di irrigazione utilizzata.

Energia

L'energia necessaria per l'irrigazione in $\frac{kWh}{mese}$ può essere calcolato moltiplicando la potenza della pompa per le ore di funzionamento al mese.

Poichè si vuole mantenere il valore indipendente dall'area coltivata, si dovrà dividere questo valore per gli ettari che competono a ogni singola pompa. Si ottengono così i $\frac{kWh}{mese \cdot ha_{coltivato}}$ necessari per l'irrigazione.

2.1.3 Usi produttivi

Con usi produttivi ci si riferisce a tutte quelle attività legate ai prodotti dell'agricoltura.

Post raccolta e conservazione Il trattamento del raccolto è fondamentale per garantirne la corretta conservazione. Nei paesi in via di sviluppo, a causa della mancanza o dell'inadeguatezza delle attività di post raccolta e conservazione, si ha spesso la perdita parziale o totale del raccolto.

- **Imballaggio**

L'imballaggio è il presupposto per la conservazione. Esso è fondamentale per evitare perdite e danneggiamento meccanico lungo la catena di lavorazione e trasporto. Questa operazione è sempre manuale.

- **Conservazione**

La conservazione del raccolto è fondamentale, sia per l'autoconsumo, sia per la vendita nei mercati, perché la produzione è stagionale, mentre la domanda è annuale.

- *conservazione a secco*

La conservazione a secco è utilizzata per cereali(mais, sorgo, miglio, grano e riso), legumi(fagioli, piselli), radici, tuberi e semi oleosi.

Il raccolto, prima di essere stoccato, deve essere pulito dagli insetti (a volte è necessario l'utilizzo di insetticidi) ed essiccato al sole, direttamente o all'interno di essiccatoi solari.

Per i cereali è anche necessaria l'operazione di trebbiatura, che separa il grano dal resto della pianta. Essa può essere effettuata manualmente o attraverso l'ausilio di macchine. Le macchine utilizzate possono essere alimentate da motori diesel o collegate alla rete elettrica.

- *conservazione a freddo*

La conservazione a freddo è necessaria per estendere la vita e conservare la qualità di frutta e verdura. Essa offre anche l'opportunità agli agricoltori di vendere i prodotti quando i prezzi di mercato sono più favorevoli.

Essa genera una domanda di energia piuttosto elevata e richiede un approvvigionamento di energia affidabile.

Sono disponibili tre tecnologie per refrigerare piccole quantità:

- * raffreddatori ad evaporazione, senza la necessità di un input di energia
- * refrigeratori ad assorbimento che richiedono in ingresso energia sotto forma di calore
- * refrigeratori a compressione di vapore, dove è necessario un input di energia elettrica continuo e affidabile.

Trattamento Il trattamento dei prodotti derivanti dall'agricoltura è necessario per la conservazione, per il trasporto, per il consumo e per presentare il prodotto in una forma richiesta dal consumatore.

- **Essiccamento**

Per aggiungere valore a frutti e verdure, essi possono essere essiccati. Questa operazione necessita di poco calore e ventilazione, ed è quindi poco meccanizzata, soprattutto per la produzione su piccola scala.

Per essiccare colture in grande quantità, come è necessario fare ad esempio per il tè e per il caffè, oltre all'essiccazione sotto il sole diretto, si può optare per essiccatori solari coperti o per l'essiccazione assistita da macchine che generano calore e un flusso d'aria.

- **Macinatura**

I cereali vengono macinati per produrre farine di vario tipo. Questa operazione può essere effettuata manualmente o attraverso l'uso di macchine. Quest'ultima opzione produce farina di migliore qualità.

Queste macchine possono essere alimentate da animali, persone, acqua, da un motore a combustione interna o da energia elettrica.

- **Estrazione di olio**

L'olio viene estratto da raccolti come arachidi, cocco, palma, semi oleosi. Per questo processo sono disponibili presse manuali, idrauliche o a motore, che possono essere collegate alla rete elettrica.

2.2 Stima del carico

Nella sezione precedente sono stati illustrati i principali bisogni dei villaggi rurali che possono essere tradotti in carichi elettrici.

E' ora possibile, grazie ad una serie di assunzioni e con l'utilizzo di dataset globali, stimare il profilo di carico anche senza effettuare rilevazioni sul posto. Questa operazione può essere considerata preliminare e può essere raffinata con rilevazioni più accurate effettuate sul luogo di interesse, in caso si stia effettuando un progetto dedicato a un sito specifico.

Risulta comunque utile poter ottenere profili di domanda in diverse condizioni per poter osservare poi come cambia la struttura ottimale di una microgrid al variare del profilo di carico, e per poter effettuare un dimensionamento preliminare.

Nel presente lavoro si è studiato un algoritmo che permette di stimare il profilo di domanda noti una serie di dati e fatte una serie di ipotesi. L'algoritmo è stato implementato in Excel ed è stato abbinato ad una serie di dataset globali. Il risultato è un programma in Excel che, nota la posizione geografica del villaggio di interesse, trova i dati nel dataset, applica l'algoritmo e produce un profilo di domanda, divisa in carico programmabile e non. In questo programma è possibile modificare le assunzioni per ottenere una stima più precisa della domanda, nel caso in cui siano state fatte delle rilevazioni nella zona di interesse.

2.2.1 Descrizione dei dataset in input

Per il calcolo della domanda di energia sono necessari una serie di dati. L'opzione migliore consisterebbe nell'effettuare misurazioni e sondaggi nella zona di interesse. Tuttavia le rilevazioni possono essere processi lunghi e costosi. Inoltre, spesso, è necessario avere a disposizione una curva di domanda verosimile per poter effettuare lo studio della gestione e dell'ottimizzazione di minireti, senza avere un progetto specifico. Di seguito si descrivono i dataset utilizzati.

Dati climatici

Sono necessari una serie di dati climatici per poter ottenere la domanda di energia legata all'irrigazione secondo l'approccio descritto nella sezione precedente.

Per calcolare l'evapotraspirazione di riferimento, necessaria per ottenere l'elettricità richiesta per l'irrigazione, è necessario conoscere cinque dati climatici:

- altitudine [m]
- umidità relativa [%]
- temperatura media massima e minima [°C]
- massima durata delle ore di luce [%]
- velocità del vento a 2 m [m/s]

Sono stati utilizzati i dati della Climate Research Unit (CRU) dell'University of East Anglia, versione CRU CL 2.0. Il dataset contiene un reticolo di dati medi mensili, mediati sul periodo 1901-2002. La risoluzione è di 10 arc-min (primi d'arco).¹

Il dataset contiene i dati di

- altitudine [m]
- umidità relativa [%], un valore per ogni mese
- temperatura media [°C] e oscillazione massima della temperatura [°C], un valore per ogni mese. Da questi dati si ricavano la temperatura massima e minima di ogni mese:

$$T_{max} = T_{media} + 0,5 \Delta T_{max}$$

$$T_{min} = T_{media} - 0,5 \Delta T_{max}$$

- massima durata delle ore di luce [%], un valore per ogni mese
- velocità del vento a 10 m [m/s], un valore per ogni mese, da cui si ricava la velocità del vento a 2 m attraverso la formula [4]

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8 \cdot z - 5,42)}$$

con $z = 10m$.

¹La risoluzione di dataset a reticolo (o raster) viene fornita in primi d'arco. L'angolo si riferisce alla latitudine e alla longitudine. Una griglia di 60 arc-min sarà formata da celle i cui confini corrispondono con i 180 paralleli e i 360 meridiani.

Per convenienza spesso si chiamano le griglie da 5 arc-min e da 30 arc-min rispettivamente griglie da 10 km e da 30 km con riferimento al lato della cella. I dati forniti sono mediati sulla superficie di ogni cella.

Da questi dati climatici è stato ottenuto un valore di evapotraspirazione di riferimento per ogni mese, seguendo il procedimento di [4].

I dati ottenuti sono stati sommati per ottenere un valore annuale, che è stato confrontato con il dataset di Global Agro-Ecological Zones (GAEZ) versione 3.0 per verificare la validità dei dati ottenuti. I valori di evapotraspirazione si discostano al massimo del 10%, e nelle zone di interesse (Africa subsahariana, India) la differenza è compresa tra lo 0 e il 5%.

Un altro dato climatico necessario per calcolare l'elettricità richiesta per l'irrigazione è quello riguardante le precipitazioni. Anche in questo caso è stato utilizzato il dataset CRU CL 2.0 che contiene 12 valori di precipitazioni in [mm/mese].

Profondità della falda

L'ultimo dato necessario per il calcolo dell'elettricità necessaria all'irrigazione è la profondità della falda acquifera. Non esistono dataset globali che raccolgono dati sulla profondità della falda.

I dati per l'India sono forniti dalla Central Ground Water Board (CGWB) [18] [20] [17] [19] che monitora lo stato della falda in India dal 1969. Oggi ha una rete di 20698 pozzi di osservazione. Quattro volte all'anno (gennaio, aprile, agosto e novembre) la CGWB pubblica i risultati delle misurazioni. Il livello della falda in India è piuttosto variabile durante l'anno perché le stagioni sono caratterizzate da una stagione molto piovosa, quella dei monsoni, e una stagione molto secca.

I dati per l'Africa sono forniti dalla British Geological Survey (BGS) che ha prodotto le prime mappe quantitative che descrivono lo stato della falda acquifera in tutta l'Africa [6].

Utilizzo del suolo

Per calcolare l'elettricità necessaria per gli usi produttivi e per l'irrigazione, è necessario conoscere l'estensione dell'area irrigata e la quantità e i tipi di colture che vengono prodotti. I dati necessari vengono forniti da Global Agro-Ecological Zones (GAEZ) versione 3.0 che fornisce i dataset raster con una risoluzione di 5 arc-min. Per calcolare l'elettricità necessaria si utilizzano i dati relativi all'area coltivata per ogni tipo di coltura, divisa in area irrigata e non irrigata.

Per ogni coltura è necessario conoscere anche il coefficiente K_c , fornito dalla

FAO nel manuale [11]

Nota l'evapotraspirazione di riferimento, l'area coltivata e il coefficiente K_c per ogni tipo di coltura, è possibile ricavare l'evapotraspirazione effettiva in ogni cella del reticolo. Dove sono presenti più di una coltura è stata eseguita una media dei coefficienti K_c .

I dati relativi all'utilizzo del suolo sono necessari anche per il calcolo dell'elettricità necessaria per gli usi produttivi: si utilizzano i dati di GAEZ 3.0 relativi all'area coltivata e alla produttività in $t_{prodotto\ utile}/ha$ di ogni coltura, ottenendo le tonnellate all'anno di prodotto utile. Poiché la produttività si riferisce al prodotto utile, cioè a valle delle lavorazioni, mentre il consumo dei macchinari viene fornito in base alle tonnellate da processare, è necessario risalire dai valori in $t_{prodotto\ utile}/ha$ ai valori in $t_{prodotto\ da\ processare}/ha$. Per farlo si utilizza il metodo RPR (Residue to Product Ratio) che verrà illustrato nel capitolo successivo relativo alla biomassa.

Popolazione

La popolazione viene ricavata, nota la dimensione del villaggio (o viceversa, nota la popolazione totale di cui il progetto si occupa si ricava la dimensione del villaggio), dal dataset Gridded Population of the World Version 3 (GPWv3): Population Density Grids, che contiene la densità di popolazione in una griglia di 2,5 arc-minutes [23].

2.2.2 Descrizione dell'algoritmo

Si descrive di seguito l'algoritmo che è stato utilizzato per il calcolo della domanda di energia. Questo algoritmo è stato implementato in un foglio Excel ed abbinato ai dataset globali descritti nel paragrafo precedente, creando un programma che esegue tutte le operazioni automaticamente, con la possibilità di modificare manualmente le assunzioni.

Come visto nel capitolo precedente, i bisogni che possono essere tradotti in un carico elettrico si dividono in

- bisogni di base
- bisogni legati all'agricoltura
- bisogni legati agli usi produttivi

Bisogni di base

Il calcolo del carico elettrico abbinato ai bisogni di base si basa su una serie di assunzioni e non fa uso di nessun tipo di dataset: essi non dipendono infatti da fattori climatici o dall'utilizzo del suolo, poichè è stata esclusa la climatizzazione.

Le ipotesi riguardano in particolare le caratteristiche e le abitudini della comunità di interesse. Se fossero disponibili dati acquisiti interagendo direttamente con i beneficiari, è possibile modificare le assunzioni fatte. In ogni caso le ipotesi sono tutte plausibili e portano alla stima di un profilo di carico verosimile.

Le assunzioni riguardano:

- Il consumo degli elettrodomestici/delle utenze.

Di seguito (tabella 2.6) si fornisce una tabella con il consumo delle utenze presenti nelle abitazioni. Esso varia a seconda della classe energetica dell'apparecchio.

Apparecchio	W	kWh/anno
lampadina	10	
radio	10	
pc	100	
frigorifero		300
boiler elettrico	1200	
TV	100	
caricatore telefono	10	
ventilatore	40	
cooking stove	1000	

Tabella 2.6: La tabella mostra il consumo delle apparecchiature che vengono considerate nel calcolo dei bisogni di base.

E' interessante notare come l'efficienza degli elettrodomestici abbia influenza sulla curva di domanda (confronto figura 2.6 e 2.7)

- Il fattore di carico di ogni utenza, che viene definito come

$$f = \frac{E_{\text{consumata dall'apparecchio}}}{P_{\text{nominale, apparecchio}} \cdot h_{\text{finestra}}} = \frac{P_{\text{nominale, apparecchio}} \cdot h_{\text{effettive, apparecchio}}}{h_{\text{finestra}}}$$

dove

h_{finestra} rappresenta la finestra oraria durante la quale c'è la possibilità che l'apparecchio venga acceso. Anche questa è un'ipotesi modificabile.

$h_{effettive,apparecchio}$ sono le ore, appartenenti alla finestra, in cui effettivamente l'apparecchio rimane acceso. Anche questa è un'ipotesi modificabile.

$P_{nominale,apparecchio}$ è la potenza nominale dell'apparecchio.

Il fattore di carico esprime quindi per quanto tempo l'apparecchio rimane effettivamente acceso all'interno della finestra oraria in cui potrebbe essere acceso (a volte il fattore di carico viene definito sulle ventiquattro ore e non sulla finestra di possibile accensione). In tabella 2.7 si forniscono i valori utilizzati.

Fattori di carico	
scuole	
radio	0,70
PC	0,15
ospedali	
illuminazione giorno	1,00
illuminazione notte	0,50
attrezzatura specifica giorno	1,00
attrezzatura specifica notte	0,20
boiler	0,33
ventilatore	1,00
abitazione	
TV	0,20
radio	0,10
illuminazione	0,20
ventilatore	0,40
cooking stove	0,70

Tabella 2.7: La tabella mostra i fattori di carico utilizzati per le diverse utenze nel calcolo della domanda dovuta ai bisogni di base.

- Altre ipotesi riguardano la struttura della comunità: dimensione dei nuclei familiari, numero di posti letto negli ospedali e attrezzature presenti, illuminazione pubblica, percentuale della popolazione che frequenta la scuola e altre caratteristiche locali.

Per quanto riguarda i posti letto negli ospedali, sono stati utilizzati i dati pari alla media nazionale, forniti dalla World Bank, pari a 0.7 letti d'ospedale ogni 1000 persone in India e variabili in Africa (da 0,8 letti letti d'ospedale ogni 1000 persone in Sudan a 6,3 letti d'ospedale ogni 1000 persone in Etiopia) [69].

Per l'illuminazione pubblica è stato utilizzato il valore di 0.1 kWh al giorno per persona [49].

Per stimare la dimensione media del nucleo familiare e la percentuale di popolazione che frequenta la scuola, sono stati utilizzati i dati forniti da Gapminder [37], che fornisce la percentuale di popolazione che frequenta la scuola in ogni Paese. Da questo dato è possibile passare da un consumo nelle scuole in kWh/studente a un consumo in kWh/abitante, ed è anche possibile stimare la dimensione dei nuclei familiari.

- Acqua potabile

Si ipotizza un pozzo comune dove viene resa disponibile l'acqua potabile per tutto il villaggio. Per rendere l'acqua potabile si ipotizza di utilizzare un impianto ad osmosi che consuma $1 \text{ kWh}/m^3$ [51]. Le pompe utilizzate per prelevare l'acqua dalla falda e l'impianto ad osmosi generano un carico elettrico programmabile, grazie alla possibilità di installare un serbatoio dell'acqua. Per il calcolo dell'energia necessaria al pompaggio si utilizza lo stesso metodo che si utilizza per calcolare l'energia necessaria all'irrigazione, poichè si tratta dello stesso tipo di carico, e si ipotizza un consumo di acqua giornaliero a persona pari a 50 litri.

Il carico dovuto ai bisogni di base fa parte del carico non programmabile ad eccezione del carico legato all'acqua potabile.

In figura 2.6 e 2.7 si mostrano due esempi di curva di domanda per persona (carico non programmabile).

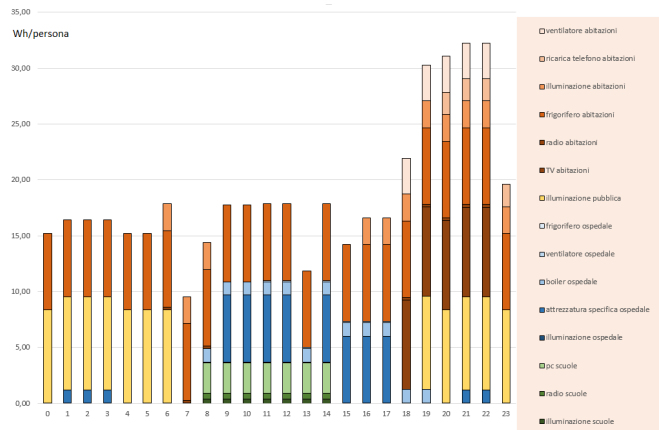


Figura 2.6: Curva di domanda dovuta ai bisogni di base.

Grazie alle ipotesi precedenti si ottiene una curva di domanda non programmabile in kWh/P e un valore di carico non programmabile in $kWh/giorno/P$. Nota la dimensione del villaggio e la densità di popolazione, è possibile ottenere

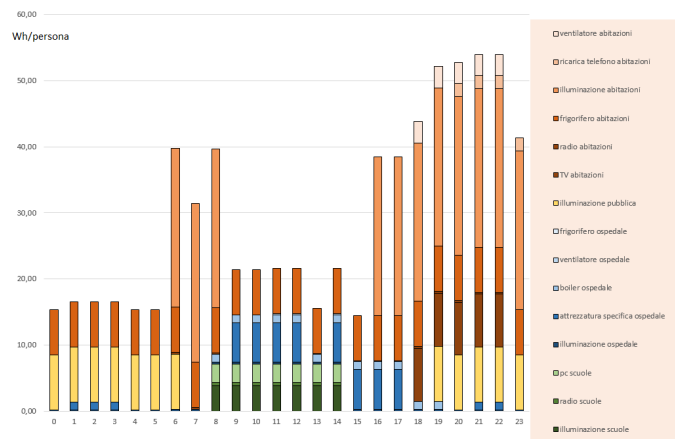


Figura 2.7: Curva di carico dovuta ai bisogni di base con lampadine che consumano 100 W. Confrontando questa curva con quella in figura 2.6 si può apprezzare l'influenza che l'efficienza energetica delle utenza ha sulla curva di domanda.

un valore per ogni ora in kWh/h , che rappresenta il carico totale non programmabile dovuto ai bisogni di base, e un valore in $kWh/giorno$, che rappresenta il carico totale programmabile.

Agricoltura

Per il calcolo del carico richiesto dall'irrigazione si utilizza l'approccio illustrato nel capitolo relativo alla descrizione della domanda con i dati estratti dai dataset illustrato nel capitolo precedente. Si ottiene un risultato in $kWh/mese/ha$ necessari all'irrigazione.

Nota la dimensione del villaggio, l'area coltivata e la popolazione, è possibile ottenere un risultato in $kWh/mese$ o in $kWh/mese/P$.

La dimensione del villaggio è un dato che dipende dal progetto. La popolazione può essere ricavata dal dataset GPWv3 di densità di popolazione [23].

L'area coltivata è nota dal dataset GAEZ ver 3.0.

Per calcolare il fabbisogno di elettricità per l'irrigazione si può ipotizzare che la situazione attuale rimanga invariata, e quindi che siano irrigati solo i terreni che lo sono già, o, per aumentare la produzione di beni senza aumentare l'area coltivata totale (e quindi disboscare), si può ipotizzare che tutta l'area attualmente coltivata diventi irrigata.

Si ipotizza inoltre di sostituire i metodi attuali con irrigazione a goccia, poichè essa permette di risparmiare molta acqua e quindi di diminuire lo stress sulla falda.

Usi produttivi

Per il calcolo del consumo energetico dovuto alla lavorazione dei prodotti dell'agricoltura, si prendono in considerazione quelle colture che, come spiegato nel capitolo precedente, necessitano di lavorazione, ovvero cereali, semi oleosi e verdure.

E' nota dai dataset GAEZ l'area coltivata per ogni tipo di coltura e la produttività dei terreni irrigati e non. Poiché si è ipotizzato di irrigare tutta l'area attualmente coltivata, si utilizza sempre la produttività relativa ai terreni irrigati. Più dettagli riguardo questo passaggio vengono spiegati nel capitolo sulle risorse.

Noto il consumo dei macchinari utilizzati in $kWh/t/gg$ e ipotizzato un fattore di carico, si ottengono delle curve di domanda in kWh/h , che costituiscono un carico non programmabile, analogamente ai bisogni di base.

Nel capitolo 5 è possibile vedere una serie di curve di carico in diversi villaggi.

Capitolo 3

Risorse

Oltre alla conoscenza della domanda di energia, per il dimensionamento di una minirete è fondamentale conoscere la disponibilità delle risorse locali, per poter calcolare la potenza prodotta dai generatori alimentati da fonti rinnovabili.

E' necessario quindi conoscere le condizioni climatiche del luogo di interesse.

In particolare è necessario raccogliere dati:

- Sulla radiazione solare per i pannelli fotovoltaici
- Sulla velocità del vento per le turbine eoliche
- Sulla disponibilità di biomassa per i generatori a biomassa.

I dati che riguardano la radiazione solare e la velocità del vento vengono resi disponibili da NASA SSE (Surface meteorology and Solar Energy), che mette a disposizione dataset relativi a insolazione e meteorologia, basati su rilevazioni, su griglie di 1 grado x 1 grado.

I dati all'interno di una singola cella sono mediati sull'intera area della cella. La risoluzione di questi dataset è peggiore rispetto a quella dei dataset utilizzati per la stima della domanda, ma questo è giustificabile dal fatto che si tratta di grandezze meno variabili delle precedenti.

In ogni caso, i dataset non devono sostituire eventuali dati acquisiti sul posto. L'obiettivo dei dataset è quello di dare informazioni in caso di mancanza di dati locali, e di confermare la qualità di dati locali eventualmente presenti.

Utilizzando i dataset è possibile ottenere una stima del potenziale rinnovabile di ogni area sulla terra. Questa stima può essere abbastanza accurata per studi di fattibilità preliminari di nuovi progetti basati su energie rinnovabili. Sono presenti anche dataset che forniscono la variabilità dei dati raccolti, sottoforma di minimo e massimo di una serie di parametri.

Di seguito si spiega quali dei dataset messi a disposizione da NASA SSE sono stati utilizzati nel presente lavoro.

3.1 Radiazione solare

Per conoscere la potenza prodotta dai pannelli fotovoltaici sono stati utilizzati i seguenti dataset:

- Radiazione solare globale su superficie orizzontale H $\left[\frac{kWh}{m^2 \text{giorno}} \right]$
- Radiazione diffusa su superficie orizzontale H_d $\left[\frac{kWh}{m^2 \text{giorno}} \right]$
- Radiazione normale diretta DNR $\left[\frac{kWh}{m^2 \text{giorno}} \right]$
- Coseno dello zenit solare (media giornaliera) $\cos(\vartheta_{zh})$

La relazione tra le grandezze precedenti è la seguente:

$$DNR = \frac{H - H_d}{\cos(\vartheta_{zh})}$$

- Radiazione solare globale su superfici inclinate verso l'equatore $\left[\frac{kWh}{m^2 \text{giorno}} \right]$, che viene calcolata dai dati precedenti con il metodo RETScreen Isotropic Diffuse Method [68]. Il dato è disponibile per inclinazioni di 0° , latitudine- 15° , latitudine, latitudine+ 15° , 90° e l'angolo ottimo. L'angolo ottimo fornisce la massima radiazione solare sfruttabile.
- Radiazione solare a intervalli di 3 ore $\left[\frac{kWh}{m^2} \right]$. Da questo dataset è possibile ottenere il profilo giornaliero di radiazione solare (anche per le superfici inclinate) e quindi è possibile conoscere la potenza prodotta dai pannelli fotovoltaici ora per ora.

3.2 Velocità del vento

Per conoscere la potenza prodotta dalle turbine eoliche sono stati utilizzati i seguenti dataset:

- Velocità del vento a 50m, media giornaliera $\left[\frac{m}{s}\right]$
- Velocità del vento a intervalli di 3 ore $\left[\frac{m}{s}\right]$. Grazie a questo dataset è possibile calcolare la potenza prodotta dalle turbine eoliche ora per ora.

3.3 Biomassa

La disponibilità di biomassa è un dato più difficile da ottenere, e non presente tra i dataset di NASA SSE. Per la trattazione di questo problema si è fatto riferimento a [47].

Per poter valutare la sostenibilità delle abitudini di consumo presenti e la fattibilità di introdurre tecnologie moderne basate sull'uso della biomassa, è necessario definire una stima delle risorse e della possibilità di utilizzarle a scopi energetici. Nel presente lavoro si stima la biomassa disponibile in forma di residui, poiché questo viene considerato un prerequisito per la fattibilità. I residui possono essere classificati in:

- Residui legnosi che vengono generati dalla gestione di **piantagioni perenni** come il cocco e la palma da olio.
- **Residui agricoli** generati dalla produzione agricola.
- **Residui forestali**.

I residui che vengono calcolati in questo modo sono i residui 'lordi', generati in teoria. In pratica non tutti questi residui sono disponibili, a causa dell'utilizzo per scopi non energetici o per il fatto che non sono recuperabili.

3.3.1 Piantagioni perenni

Piantagioni perenni generano grandi quantità di residui legnosi da attività di potatura e rinnovazione.

Si possono utilizzare due metodi per calcolare la quantità di residui generati.

- Il primo metodo è basato sull'*area* occupata dalle piantagioni. Il metodo assume che le piantagioni crescano con una densità standard. Questa è spesso un'ipotesi forte. Inoltre, il tipo di gestione, la varietà di piantagione e altri fattori possono risultare in grandi differenze nella quantità di residui generati da una certa area.
- Il secondo metodo consiste nell'utilizzare il *rapporto produzione-residuo* (RPR residue to product ratio). Con questo metodo la quantità di residui

viene calcolata a partire dai prodotti utili della piantagione utilizzando un valore medio di RPR per ogni tipo di coltura. Questo metodo permette di calcolare la quantità di residui in sistemi in cui vengono coltivate più di una piantagione nell'arco di un anno. Tuttavia una piantagione potrebbe essere caratterizzata da più di un valore di RPR al variare dell'anno, della varietà, dal clima, dalla fertilità del suolo e da pratiche di coltivazione.

Le piantagioni perenni principali che vengono considerate per il calcolo della biomassa disponibile, sono il cacao, il cocco, la palma da olio e l'albero della gomma.

Nel presente lavoro si utilizza il metodo basato sull'RPR, utilizzando i coefficienti forniti in 3.1. Per i dati di produttività si utilizza il dataset di Global Agro-Ecological Zones (GAEZ) versione 3.0, in cui vengono forniti i valori di produttività di ogni piantagione in $t_{prodottoutile}/ha$, in aree irrigate e non, con una risoluzione di 5 arc-min, che permette di avere dati specifici alla zona di interesse.

3.3.2 Residui agricoli

L'agricoltura è una attività fondamentale in tutti i paesi in via di sviluppo. Oltre al prodotto utile vengono generati ogni anno grandi quantità di residui che sono una importante fonte di energia sia per scopi domestici sia per scopi industriali.

Le colture principali che vengono considerate nel calcolo della biomassa disponibile, sono il mais, il riso e altri cereali, la manioca, le arachidi, la soia, la canna da zucchero, la iuta e il cotone.

Anche in questo caso può essere utilizzato o il metodo basato sull'area coltivata o quello basato sul RPR.

I coefficienti RPR utilizzati vengono raccolti in tabella 3.1 e i valori di produttività vengono ottenuti dal dataset GAEZ 3.0.

E' importante fare una distinzione tra residui generati sul campo e residui generati durante le lavorazioni. La ragione è che nel secondo caso i residui sono probabilmente concentrati in un luogo specifico, e questo rende il loro utilizzo come fonte di energia più semplice. Nel primo caso, invece, potrebbero trovarsi sparsi su larghe aree e la raccolta potrebbe essere impegnativa.

Esempi di residui che rimangono spesso sul campo sono paglia, gambi e foglie.

I residui vengono utilizzati per molti scopi che spesso sono diversi con la località di cui ci si occupa. Oltre ad essere utilizzati come combustibile, essi

possono essere utilizzati come mangime, fertilizzante, materia prima e altri scopi.

E' difficile conoscere la quantità di residui utilizzati per altri scopi, a causa della natura sparsa della generazione, della stagionalità e delle differenze in contesti locali.

Si può eseguire una stima dei residui che sono disponibili per l'uso energetico attraverso l'uso di un coefficiente, ipotizzato o basato su dati reali. I dati raccolti da [47] indicano che una grande quantità dei residui prodotti non vengono utilizzati e sono quindi disponibili per scopi energetici. Nel presente lavoro si assume che il 60% dei residui disponibili vengano utilizzati per altri scopi.

Spesso si assume che i residui vengano sprecati, e che quindi non abbiano un costo associato; tuttavia, in pratica, se il loro utilizzo aumenterà assumeranno sicuramente un valore monetario. Anche senza un valore monetario, i residui possono essere utilizzati per vari scopi, e vengono quindi divisi tra la comunità. Provare ad utilizzare residui senza offrire nessun compenso monetario può portare a problemi sociali.

Il costo da associare ai residui agricoli è composto dal costo di raccolta sommato al costo di trasporto.

[36] esegue una stima dei costi dei residui delle principali colture. Il costo di raccolta medio è pari a 12-20 \$/ton mentre il costo di trasporto, che dipende dalla densità del residuo, è intorno ai 2 \$/ton più 0,1 \$/ton/miglia.

Anche la stagionalità dei residui dovrebbe essere presa in considerazione, poiché spesso si hanno grandi quantità disponibili subito dopo il raccolto e si ha meno disponibilità il resto dell'anno. Tuttavia, in mancanza di dati raccolti a livello locale non è possibile considerare questo fattore, a meno di non fare assunzioni che possano rappresentare una situazione verosimile.

Nel presente lavoro si ipotizza che sia possibile conservare i residui lungo tutto l'arco dell'anno e quindi si ricava ricavare una disponibilità di biomassa giornaliera.

3.3.3 Residui forestali

Questo tipo di residui è più complicato da valutare. Mentre la disponibilità di residui derivanti da piantagioni (perenni o erbacee) è legata alla presenza di una attività preesistente (l'agricoltura), la presenza di residui forestali prevede l'esistenza di una attività di gestione della foresta che molto probabilmente non è preesistente nei paesi di cui si occupa questo studio (la presenza di una attività

di gestione della foresta può essere legata a motivi ambientali, ovvero di tutela del territorio o industriali, o per produrre legna con altri scopi).

Il problema dell'utilizzo della biomassa non commerciale come combustibile domestico è ben noto nell'ambito della cooperazione. Oltre ai problemi sociali legati alla salute degli utilizzatori e al tempo che il recupero della legna richiede, vi è anche il problema legato al fatto che la raccolta della legna non viene coordinata in modo tale da rendere l'attività sostenibile dal punto di vista ambientale, il che porta ad un problema di deforestazione.

I problemi sociali e di gestione non sono oggetto di studio del presente lavoro. L'obiettivo è quello di effettuare una stima dei potenziali residui forestali che sarebbero disponibile se ci fosse una attività di gestione delle foreste.

La legna prelevata dalle foreste può derivare da

- Assottigliamento delle foreste.

Le foreste giovani spesso diventano troppo dense, e assottigiarle aiuta gli alberi a crescere meglio. Questo processo può avvenire manualmente o automaticamente (in questo caso bisogna tener conto dell'energia spesa per questa attività).

- Nel caso in cui il legno venga utilizzato per altre attività, esistono dei residui legati all'attività di abbattimento finale (residui lasciati sul campo dopo l'abbattimento, radici e monconi o eccessi di produzione)

La stima del materiale legnoso annualmente prelevabile, in m^3/ha , è molto complessa, perché dipende da una serie di fattori locali tra cui le pratiche esistenti e la crescita media annua. Non è possibile eseguire una stima corretta, proprio a causa della mancanza delle attività di gestione nelle zone di interesse. Una stima approssimativa viene eseguita utilizzando il metodo proposto da [9].

Il calcolo della disponibilità di biomasse legnose richiede la conoscenza di tre elementi:

1. **Produttività annua potenziale sostenibile** ovvero la quota parte di biomassa legnosa prodotta nel territorio in esame che può essere utilizzata in modo sostenibile, ovvero entro i limiti di naturale rinnovabilità della risorsa. La quantificazione di tale aspetto richiede la conoscenza dei valori di incremento legnoso attribuibili alle differenti specie dominanti nell'area esaminata. A partire da questo dato e utilizzando alcune semplici assunzioni è possibile ottenere una stima della produttività annua potenziale sostenibile nel territorio esaminato ($t_{sostanzasecca}/ettaro/anno$).

un valore accettabile della produttività annua potenziale sostenibile nel caso in esame, e quindi per per foreste naturali, è pari a 2-3 t/ha/anno (ad un costo di 40-60 euro/ton) [57].

2. **Produttività annua potenziale sostenibile al netto delle limitazioni** di biomassa legnosa per fini energetici; non tutta la produttività annua potenziale sostenibile è effettivamente ritraibile dal bosco e dunque trasformabile in energia; in un'ottica di sostenibilità ambientale delle utilizzazioni forestali è opportuno introdurre restrizioni al prelievo rispetto al potenziale massimo. Pertanto la disponibilità netta di biomassa legnosa può ridursi anche sensibilmente rispetto alla produttività potenziale sostenibile (si assume una riduzione del 50%).
3. **Consumi di biomassa legnosa per uso domestico.** Come anche per i residui agricoli, è necessario conoscere i quantitativi eventualmente già destinati a impieghi energetici o altro. Per l'utilizzo come combustibile domestico si utilizza il metodo già illustrato, mentre si ipotizza che il 40% della produttività annua potenziale sostenibile al netto delle limitazioni sia utilizzata per altri scopi.

Per concludere, dai dati raccolti ed elaborati risulta che una grande quantità di residui rimangono inutilizzati. Tuttavia questa affermazione si basa su dati che possono essere considerati incompleti, perché molto generali. E' necessario raccogliere maggiori informazioni sulla disponibilità e sull'utilizzo dei residui a livello locale, dato che molte variabili influenzano il risultato .

Non bisogna, inoltre, perdere di vista le implicazioni a livello sociale, come l'utilizzo dei combustibili come combustibile domestico, fertilizzante o altri scopi. Bisognerebbe condurre studi riguardo gli effetti nell'utilizzo dei residui per scopi diversi da quelli attuali, per esempio sulla degradazione del terreno, sulla generazione di reddito e sulle comunità locali: promuovere l'utilizzo dei residui per applicazioni energetiche non solo darà un valore ai residui, ma potrebbe deprivare una parte della popolazione (spesso la parte più povera) dei combustibili per scaldare e cucinare.

Nel presente lavoro si tiene conto dell'utilizzo dei residui come combustibile domestico. Ovviamente, non avendo dati locali, non è possibile eseguire stime precise. Tuttavia, ipotizzando la tecnologia utilizzata per cucinare e per scaldare l'ambiente, e noto il consumo di combustibile associato a tale tecnologia, è possibile eseguire una stima verosimile. E' possibile anche eseguire un confronto tra le diverse tecnologie utilizzate e verificarne la fattibilità.

Nel presente studio, si confrontano tra loro tre diversi scenari:

- La tecnologia utilizzata è quella del **tre-pietre**.

Questo scenario è lo scenario peggiore, dal punto di vista economico, sociale e ambientale. Il combustibile utilizzato è la legna, e il rendimento della tecnologia è molto basso. Si stima che il consumo di legna giornaliero sia pari a circa $6,7\text{kg/giorno/nucleofamiliare}$ [56]. A partire da questo dato è possibile stimare la quantità di legna utilizzata all'anno dall'intero villaggio. Confrontando questo dato con quello dei residui legnosi disponibili si può capire se l'utilizzo di questo metodo sia fattibile almeno dal punto di vista ambientale o meno.

- La tecnologia utilizzata è quella della (**rocket stove**).

Questa stufa utilizza sempre legna come combustibile, ma con un processo di combustione più efficiente, e permette quindi di risparmiare legna (oltre a diminuire gli effetti negativi sulla salute). Il consumo stimato è di $5,4\text{kg/giorno/nucleofamiliare}$ [56]. E' possibile anche in questo caso verificare la sostenibilità della soluzione e confrontarla con quella dello scenario precedente.

- La tecnologia utilizzata è quella delle **sawdust/rice husk stoves**, ovvero stufe che utilizzano residui legnosi o agricoli come combustibile.

Si stima che il consumo sia pari a $2,3\text{kg/giorno/nucleofamiliare}$ [10]. Anche in questo caso è possibile stimare il consumo di combustibile e confrontarlo con la disponibilità, e confrontare questa soluzione con le due precedenti.

Noto lo scenario più probabile fra i tre precedenti è possibile calcolare, dei residui disponibili per scopi energetici, quanti di questi non vengono già utilizzati come combustibile domestico, e sono quindi disponibili per altri scopi energetici.

Field based residues		
crop	residue	RPR
rice	straw	1,76
wheat	straw	1,75
millet and other cereals	straw	1,75
sorghum	straw	1,25
maize	stalks	2,00
cassava	stalks	0,06
cotton	stalks	2,76
soybeans	straw+pod	3,50
jute	stalks	3,00
tobacco	stalks, etc	2,00
sugar cane	tops	0,30
cocoa	Pods	1,00

Process based residues		
crop	residue	RPR
rice	husk	0,27
maize	cob	0,27
maize	husks	0,20
coconut	shells	0,12
coconut	husks	0,42
groundnut	husks	0,48
groundnut	straw	2,30
oil palm	fibre	0,14
oil palm	shells	0,07
oil palm	bunches	0,23
sugar cane	bagasse	0,29
coffee	husk	2,10

wood residues		
agro based		t/ha/anno
cocoa tree	prunings	25,20
coconut tree	fronds	2,34
rubber tree	solid	2,59
palm oil tree	solid	2,20
palm oil tree	fronds	0,48
cocoa tree	solid	2,30

Tabella 3.1: Coefficienti utilizzati per il calcolo della biomassa derivante da residui agricoli [47]

Capitolo 4

Dimensionamento microgrid

Noti il profilo di domanda e la disponibilità di risorse, è possibile eseguire il dimensionamento della minirete.

Per farlo è necessario in primo luogo definirne la struttura, e quindi i componenti di cui è costituita, e in secondo luogo scegliere un metodo appropriato per il dimensionamento, a seconda delle proprie esigenze.

4.1 Struttura di una microgrid

Una minirete è composta da una serie di carichi, di generatori, da un sistema di accumulo e da un convertitore (figura 4.1). Di seguito si descrive come i singoli componenti si comportano e come possono essere schematizzati nei modelli per la gestione e l'ottimizzazione delle minireti.

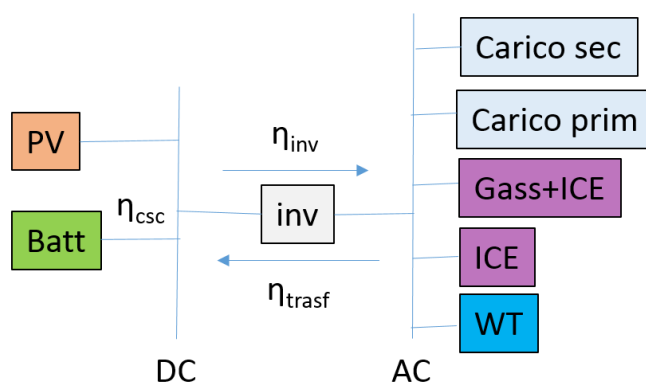


Figura 4.1: Schema generico di una minirete

4.1.1 Carichi

La domanda di energia, che è stata trattata nei capitoli precedenti, si traduce in due tipi di carichi elettrici che la minirete deve soddisfare:

- **carichi primari o non programmabili**, per i quali il consumo di energia è strettamente legato all'istante di utilizzo, come avviene ad esempio nell'illuminazione. In questo caso, quindi, il consumo di energia non è differibile nel tempo.

Per ciascun carico primario si costruisce un profilo di domanda, ovvero un andamento della potenza elettrica richiesta nel tempo.

- **carichi secondari o programmabili**, in cui il consumo di energia non è legato all'istante di utilizzo poiché l'effetto utile è disaccoppiabile dalla richiesta di energia elettrica. Questa caratteristica è tipica di tutti quei sistemi per i quali l'effetto utile è accumulabile, come ad esempio l'irrigazione. L'impianto di pompaggio richiede una certa quantità di energia elettrica, ma se l'acqua viene stoccata in serbatoi sopraelevati il momento dell'irrigazione non deve coincidere con quello del pompaggio.

4.1.2 Generatori

I generatori sono le unità che producono energia elettrica. Essi possono essere non dispacciabili e dispacciabili, e questi ultimi possono essere alimentati da fonti rinnovabili e non rinnovabili.

Generatori non dispacciabili

I generatori non dispacciabili sono quelli che si basano sull'utilizzo delle fonti rinnovabili. Permettono la produzione di elettricità con costi operativi e impatto ambientale trascurabili mentre hanno un costo di investimento piuttosto elevato. Producono elettricità quando la fonte di energia primaria è disponibile e non vengono regolati dall'unità di controllo.

Nel presente studio si considerano pannelli fotovoltaici e microturbine eoliche. L'algoritmo di gestione e ottimizzazione della minirete ha bisogno di una serie di parametri in input che descrivono il comportamento dei generatori. Questi parametri e il modo in cui vengono utilizzati vengono descritti di seguito.

Turbine eoliche Ogni turbina eolica è caratterizzata da una vita utile e da una curva di potenza. La curva di potenza è il grafico che mostra la potenza prodotta dalla turbina in funzione della velocità del vento (figura 4.2), la quale dipende dall'altezza del mozzo.

Nota la velocità del vento ad una altezza specifica (nel nostro caso la velocità del vento viene estratta dal dataset NASA SSE, che fornisce i valori a 50 m di altezza), è possibile risalire alla velocità del vento u all'altezza del mozzo h attraverso la formula

$$u = u_{rif} \left(\frac{h}{h_{rif}} \right)^\alpha$$

dove

h_{rif} è l'altezza alla quale si hanno i dati, in questo caso 50 m

u_{rif} è il dato noto

α è un coefficiente che tiene conto della scabrezza del terreno, assunto pari a 0.18.

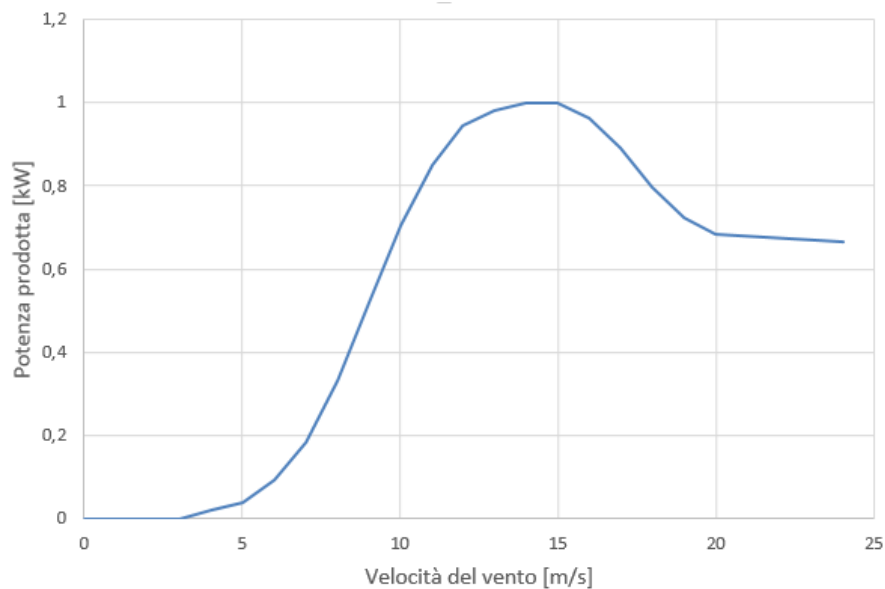


Figura 4.2: Curva di potenza di una generica turbina eolica da 1 kW. In generale, all'aumentare della potenza nominale della turbina, l'asse delle ascisse rimane invariata mentre i valori dell'asse delle ordinate vengono moltiplicati per la potenza nominale.

Pannelli fotovoltaici I pannelli fotovoltaici producono elettricità in proporzione diretta alla radiazione globale incidente. La potenza prodotta da un pannello fotovoltaico si esprime come

$$P_{PV} = \frac{I(t)}{I_{ref}} P_{nom}^{PV} \eta_{BOS}$$

dove

$I(t)$ in $\frac{W}{m^2}$ è la radiazione globale sulla superficie inclinata

I_{ref} è la radiazione di riferimento, pari a $1000 \frac{W}{m^2}$

P_{nom}^{PV} in kW è la potenza prodotta dai pannelli in condizioni di riferimento, ovvero con $I(t) = I_{ref}$ e $T = 25^\circ C$. La potenza nominale tiene conto sia dell'area sia del rendimento dei pannelli, quindi nessuno di questi due parametri compare esplicitamente nella formula.

η_{BOS} è l'efficienza di balance of system dell'impianto, generalmente intorno al 90%

La presenza dell'MPPT (maximum power point tracker, un dispositivo che si trova tra i pannelli fotovoltaici e il resto dei componenti in corrente continua, e che assicura che la tensione sia sempre corrispondente al punto di massima potenza) rende possibile disaccoppiare la tensione dei pannelli da quella del resto del sistema. Trascurando l'effetto della tensione si assume quindi che sia presente un MPPT.

Generatori dispacciabili

I generatori dispacciabili sono legati all'utilizzo di un combustibile e possono essere accesi e produrre elettricità quando richiesto. Sono fondamentali in una minirete perché permettono di compensare l'aleatorietà delle fonti rinnovabili, evitando che il carico non venga soddisfatto. Se utilizzati in modo appropriato, possono ridurre la taglia della batteria e dei generatori non dispacciabili.

Nel presente lavoro si considerano un generatore diesel e un gassificatore a biomassa accoppiato ad un motore a combustione interna. Il secondo generatore costituisce un'alternativa interessante poiché pur trattandosi di una fonte rinnovabile è dispacciabile.

Le principali caratteristiche di un generatore dispacciabile sono il suo minimo carico, il carico nominale, la vita utile, il tipo di combustibile e la curva di rendimento. In figura 4.3 si riportano le curve di rendimento dei due generatori dispacciabili utilizzati nel presente lavoro, prese dal paper [51].

Nel presente lavoro si ipotizza che il generatore Diesel sia sempre presente e che la sua taglia non sia un parametro da ottimizzare, ma un dato noto. Per questioni di sicurezza, si dimensiona il diesel in modo tale che sia in grado da solo di coprire il picco di domanda.

4.1.3 Accumulo

Per garantire un funzionamento stabile della microgrid è necessario un sistema di accumulo. La batteria permette, infatti, di evitare dissipazioni quando

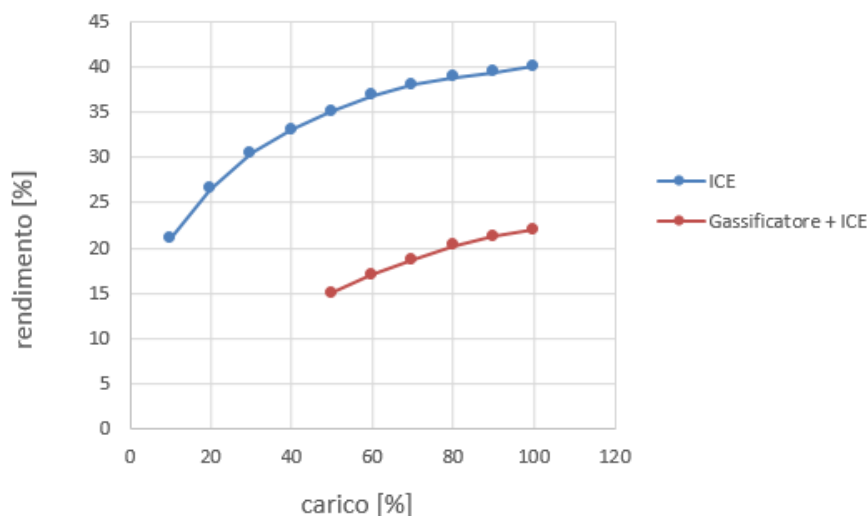


Figura 4.3: Curve di rendimento dei generatori dispacciabili. Mostrano come varia il rendimento al variare del carico e il minimo carico a cui il generatore può funzionare. La curva del gassificatore tiene conto del rendimento del processo di gassificazione e del rendimento del motore a combustione interna. [51]

la produzione da rinnovabili supera il carico, di soddisfare la domanda quando la produzione non è sufficiente e di limitare l'uso del generatore diesel quando i generatori non dispacciabili non producono elettricità.

Il sistema di accumulo è costituito da un banco di batterie in grado di accumulare elettricità in corrente continua e di renderla disponibile successivamente per l'utilizzo. Le proprietà di un banco di batteria sono l'efficienza di carica e scarica, il minimo stato di carica, la curva di vita utile e la vita utile massima.

La curva di vita utile mostra il numero di cicli di carica e scarica che la batteria può sopportare in funzione della profondità della scarica.

Il minimo stato di carica rappresenta lo stato di carica al di sotto del quale la batteria non deve essere scaricata se si vuole evitare un danneggiamento permanente.

L'efficienza di carica e scarica indica la percentuale dell'energia che entra nella batteria che può essere riutilizzata in seguito. Essa può essere considerata fissa o variabile con lo stato di carica (figura 4.4) per rappresentare meglio la realtà.

Le caratteristiche della batteria possono essere considerate costanti o variabili a seconda di fattori esterni come ad esempio la temperatura. Nel presente lavoro si considerano costanti.

In ogni istante di tempo, inoltre, la batteria è caratterizzata da una massima carica

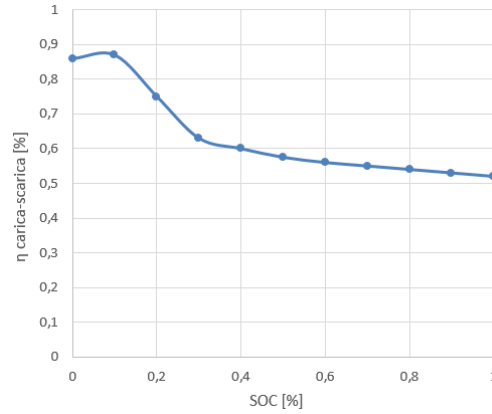


Figura 4.4: Rendimento di carica-scarica della batteria in funzione dello stato di carica

e una massima scarica, ovvero dalla quantità massima di energia che la batteria può ricevere o fornire.

Grazie alla curva di vita utile è possibile calcolare l'ammontare dei flussi energetici che la batteria è in grado di sostenere prima della sostituzione ($Q_{lifetime}$ [kWh]). Noto questo parametro è possibile valutare la vita utile della batteria come

$$VU_{batt} = \min \left(VU_{max,batt}; \frac{C_{inv,batt}}{C_{wear,batt}} \right)$$

dove

$VU_{max,batt}$ è la vita utile massima della batteria in anni

$C_{inv,batt}$ è il costo di investimento della batteria in [\$]

$C_{wear,batt}$ è il costo di usura della batteria in [\$/anno]. Tiene conto dell'invecchiamento della batteria e si calcola come

$$C_{wear,batt} = \sum c_{wear} [$/kWh] E_{batt}(t) [kWh]$$

dove $E_{batt}(t)$ [kWh] è il flusso di energia che attraversa la batteria nel timestep t e c_{wear} [\$/kWh] è il costo di usura della batteria associato al flusso di un kWh di energia. c_{wear} può essere ritenuto un valore costante pari a

$$c_{wear} = \frac{C_{inv,batt}}{Q_{lifetime} \sqrt{\eta_{roundtrip}}}$$

dove $\eta_{roundtrip}$ è il rendimento medio di carica-scarica, e dove quindi $\sqrt{\eta_{roundtrip}}$ rappresenta il rendimento medio di scarica della batteria, oppure può essere considerato variabile con lo stato di carica della batteria, per rappresentare meglio la realtà, attraverso un weighting factor f_{SOC} (figura 4.5):

$$c_{wear} = \frac{C_{inv,batt} f_{SOC}(t)}{Q_{lifetime} \sqrt{\eta_{roundtrip}}}$$

In questo modo è possibile tener conto della perdita di vita utile dovuta al funzionamento in condizioni non ottimali.

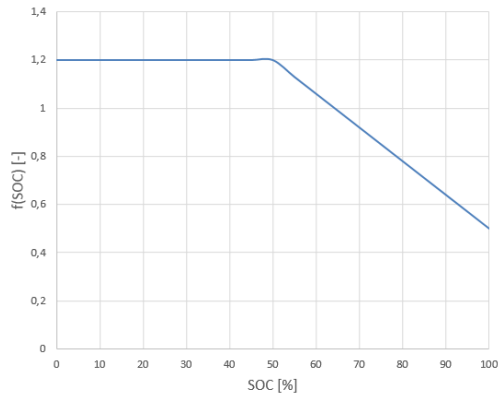


Figura 4.5: Weighting factor della batteria in funzione dello stato di carica. Il weighting factor della batteria tiene conto del fatto che l'usura aumenta se si lavora in condizioni non ottimali. Esso è stato considerato pari a $f_{SOC} = \min [1, 2; -1, 4 SOC(t - 1) + 1, 9]$ [72]

4.1.4 Convertitore

Il convertitore è un dispositivo che trasforma l'elettricità in corrente continua in elettricità in corrente alternata attraverso un processo chiamato inversione, e viceversa attraverso un processo chiamato rettificazione.

Il convertitore è caratterizzato da due rendimenti: quello dell'inverter e quello del rettificatore.

4.2 Dimensionamento della microgrid

Dimensionare una microgrid significa trovare la migliore combinazione di generatori dispacciabili e non, e del sistema di accumulo.

Per trovare la combinazione migliore si divide il problema in due step: il livello esterno (**ottimizzazione**) consiste nel confrontare diverse combinazioni e selezionare la migliore a seconda di un parametro fissato, solitamente il Levelized Cost of Electricity (LCOE). Il livello interno (**simulazione**) prevede di simulare il funzionamento della microgrid per un certo periodo di tempo. La simulazione permette di calcolare il parametro obiettivo secondo il quale si seleziona la combinazione migliore.

E' inoltre possibile aggiungere un terzo step, ancora più esterno, (**analisi di sensibilità**) che consiste nell'effettuare una serie di ottimizzazioni al variare di alcuni parametri in ingresso. Questo step è importante per tener conto dell'incertezza presente nelle variabili in input.

Simulazione Il punto di ottimo tecnico-economico di una microgrid dipende da come essa viene gestita. La chiave per stabilire i costi operativi di una microgrid, che sono una parte rilevante dei costi totali del sistema, è simularne il funzionamento lungo un certo periodo di tempo. Nel processo di simulazione si simula l'operazione della microgrid per un periodo di tempo definendo la gestione di tutte le unità programmabili (carichi e generatori). In particolare si determina

- Come una particolare **configurazione** del sistema (una **combinazione** di componenti e taglie specifici, e una **strategia operativa** che definisce come questi componenti lavorano insieme) si comporterebbe per ogni timestep (l'intervallo di tempo che costituisce l'unità di tempo minima in cui è diviso l'intervallo di simulazione).
- La fattibilità tecnica, ovvero la capacità di soddisfare adeguatamente i carichi e i vincoli imposti. Nel presente lavoro si ipotizza di dimensionare il generatore diesel in modo tale che da solo sia in grado di soddisfare il carico. Non esiste quindi un caso in cui la configurazione non sia fattibile, ovvero non sia in grado di soddisfare i carichi, a meno di non aggiungere dei vincoli riguardo ad esempio una minima percentuale di energia che deve essere prodotta da fonti rinnovabili.
- Il costo lungo il ciclo di vita, ovvero il costo totale di installazione e il costo operativo lungo la vita utile.

Si è detto che una configurazione prevede una combinazione di taglie e una strategia operativa. Infatti, sistemi che contengono sia una batteria che un generatore dispacciabile richiedono la presenza di una strategia di dispacciamento, ovvero una serie di regole che stabiliscono come il sistema gestisce questi componenti.

Il timestep utilizzato e la strategia di dispacciamento scelta determinano la differenza tra i diversi metodi che si utilizzano per eseguire la simulazione.

Ottimizzazione Il processo di ottimizzazione consiste nel determinare la configurazione del sistema migliore possibile. Per confrontare i sistemi tra loro si utilizza un parametro che viene calcolato durante il processo di simulazione (solitamente l'LCOE -Levelized Cost of Electricity- o il NPC -Net Present Cost-).

La configurazione ottima sarà caratterizzata da

- la taglia e la quantità di ciascun componente
- la strategia di dispacciamento

Analisi di sensibilità L'influenza di una serie di assunzioni può essere molto rilevante e influenzare molto i risultati della simulazione in termini di costi e quindi di design ottimo della minirete (ottimizzazione). Il processo di analisi di sensibilità consiste nell'effettuare diversi processi di ottimizzazione al variare di alcune assunzioni in input. Essa rivela quanto i risultati dell'ottimizzazione sono sensibili al variare delle variabili in input su cui il programmatore non ha controllo. Alcune variabili in input che possono essere oggetto di un'analisi di sensibilità, (**variabili di sensibilità**) sono il prezzo del combustibile, il tasso di interesse e il carico. Ogni combinazione di variabili di sensibilità costituisce un **caso di sensibilità** per cui si effettua un processo di ottimizzazione. Lo scopo dell'analisi di sensibilità è quello di trattare l'incertezza di alcune variabili su cui l'utente non ha controllo e di determinare quali tecnologie e quali combinazioni di tecnologie sono migliori al variare delle condizioni esterne.

L'ottimizzazione permette di trovare il valore ottimo di variabili su cui il progettista ha il controllo, come la taglia e la quantità dei componenti. L'analisi di sensibilità permette di valutare gli effetti del cambiamento di variabili sulle quali il progettista non ha controllo, come la velocità del vento o il futuro prezzo del combustibile.

Lo step più complicato è quello di simulazione, perchè necessita di uno strumento che consideri tutte le informazioni sui dati climatici, sui bisogni della comunità e sui vincoli tecnici dei generatori. Una mancanza di accuratezza nella risoluzione di questo step o l'utilizzo di assunzioni semplificate, influenza direttamente anche lo step di ottimizzazione, portando al design di una microgrid lontano dall'ottimo.

Questi tre step possono essere affrontati seguendo diversi approcci. Gli step di ottimizzazione e di analisi di sensitività sono meno critici: lo step di analisi di sensitività viene eseguito sempre secondo un approccio euristico e lo step di ottimizzazione secondo un approccio euristico o secondo un algoritmo di ottimizzazione.

Per quanto riguarda lo step di simulazione, attualmente esistono due stati dell'arte: uno è basato sull'utilizzo di strategie euristiche (l'esempio più conosciuto è costituito da HOMER, il software commerciale più utilizzato in questo ambito), l'altro su un effettivo algoritmo di ottimizzazione (si fa riferimento al metodo rolling-horizon degli articoli [52], [53], [51]).

Nel presente lavoro si confronta con i due precedenti approcci una strategia euristica che cerca di mantenere la semplicità dell'approccio di HOMER, superandone alcuni limiti, e avvicinandosi maggiormente ai risultati ottenuti nel secondo approccio.

Analisi economica L'analisi economica gioca un ruolo fondamentale negli step di simulazione e ottimizzazione: Per confrontare i sistemi tra loro si utilizza un parametro economico che viene calcolato durante il processo di simulazione (solitamente l'LCOE o il NPC) che deve tener conto dei costi capitali e operativi.

I costi totali annuali per il sistema considerato, fissata una certa strategia di dispacciamento, sono pari a

$$C_{tot,y} = C_{inv,y} + C_{O\&M,y} + C_{fuel,y}$$

dove

- $C_{inv,y}$ misura il costo di investimento sostenuto per ogni componente del sistema, distribuito sul singolo anno. Per quantificare l'investimento per il singolo componente, sono state raccolte informazioni da vari costruttori presenti sul mercato. In particolare, per quei componenti che beneficiano di economie di scala è possibile risalire ai costi effettivi partendo dal costo C_{rif} relativo ad una certa taglia di riferimento P_{rif} . Da questi valori si risale al costo C_{inv} per il componente di taglia P utilizzando la seguente equazione

$$C_{inv} = C_{rif} \left(\frac{P}{P_{rif}} \right)^k$$

dove k è un fattore di scala inferiore all'unità, tanto più piccolo quanto più marcata è l'economia di scala per il componente considerato.

I costi d'investimento di ciascun componente possono essere trasformati in costi annuali con la seguente equazione

$$C_{inv,y} = C_{inv} \frac{(1-i)^{VU_j} \cdot i}{(1-i)^{VU_j}}$$

dove con i si è indicato il tasso di sconto, mentre VU corrisponde alla vita utile del componente considerato, fissata per ogni componenti con l'eccezione della batteria, la cui vita utile viene calcolata come spiegato del capitolo 4.1.3.

- $C_{O\&M,y}$ rappresenta i costi fissi di gestione e manutenzione del sistema ("operation and maintenance cost"). Essi vengono calcolati come percentuale del costo di investimento.
- $C_{fuel,y}$ è legato al consumo di combustibile, ed è quindi strettamente dipendente dalla strategia di gestione adottata.

Per calcolare l'LCOE si dividono i costi totali per la domanda totale soddisfatta, ovvero:

$$LCOE \left[\frac{\$}{kWh} \right] = \frac{C_{tot,y} \left[\frac{\$}{yr} \right]}{L_{tot,y} \left[\frac{MWh}{yr} \right]}$$

4.2.1 HOMER

HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) è il software commerciale più utilizzato in questo campo di ricerca. Esso è stato sviluppato da NREL nel 1995 per assistere nel design di sistemi di microgenerazione e per facilitare il confronto di tecnologie di generazione. Esso permette di simulare il funzionamento di varie configurazioni di una microgrid e di calcolare i costi totali di installazione e operativi per ognuna di esse, in modo da poter trovare la combinazione migliore dal punto di vista economico.

HOMER esegue i tre step illustrati precedentemente che permettono di dimensionare una microgrid: simulazione, ottimizzazione e analisi di sensibilità. Per tutti e tre gli step esso utilizza logiche euristiche, che permettono di diminuire la complessità e il tempo computazionale, rendendo più pratica l'analisi.

Simulazione HOMER effettua la simulazione lungo un arco di tempo di un anno attraverso timestep di un'ora.

Il timestep di un'ora è considerato un compromesso tra la fattibilità dei tempi computazionali e la possibilità di considerare variazioni nel carico e fluttuazioni nella disponibilità di risorse rinnovabili.

Homer esegue inoltre la simulazione solo per un anno, assumendo che tutti i parametri rimangano costanti lungo la vita utile del progetto. Cambiamenti come la crescita del carico o il cambiamento del costo del combustibile possono essere analizzati attraverso l'analisi di sensibilità.

Il parametro che HOMER utilizza per confrontare tra loro economicamente le varie strategie e configurazioni è il costo lungo il ciclo di vita.

Per quanto riguarda la strategia di dispacciamento, HOMER utilizza due diversi tipi di strategie euristiche, Load Following e Cycle Charging. Esse sono uno strumento semplice ed efficace per la gestione di una microgrid, anche se presentano limiti soprattutto quando si trattano sistemi complessi. La strategia di dispacciamento viene scelta a priori e viene seguita per tutto il periodo di funzionamento. Oltre a confrontare le varie combinazioni tra loro, è quindi possibile confrontare anche le due diverse strategie di dispacciamento a pari combinazione e scegliere la configurazione migliore.

Nella strategia LF ogni volta che un generatore viene acceso, produce solo la potenza necessaria a coprire la domanda. Esso non carica mai le batterie, che vengono caricate solo dalle fonti rinnovabili e che hanno quindi una vita utile maggiore. Tuttavia il generatore lavora spesso a carico parziale, e quindi con bassi rendimenti, aumentando la quantità di combustibile utilizzato e quindi i costi operativi. La strategia LF ottimizza quindi l'utilizzo della batteria mentre il diesel lavora in condizioni svantaggiose, spesso ai carichi parziali e con un elevato numero di accensioni.

Nella strategia CC ogni volta che un generatore viene acceso lavora a carico nominale, e carica la batteria con l'elettricità in eccesso. Il generatore resta acceso finché la batteria non raggiunge uno stato di carica fissato (set point SP). Il generatore funziona così in modo più efficiente, riducendo i costi operativi, tuttavia la batteria va incontro a frequenti cicli di carica e scarica, che portano a una minore vita utile e ad un conseguente aumento dei costi di sostituzione. La strategia CC ottimizza quindi l'utilizzo del diesel che lavora sempre con il rendimento migliore possibile e il cui numero di accensioni viene limitato dallo stato di carica fissato della batteria, mentre quest'ultima va incontro a una serie di cicli di carica e scarica che ne aumentano l'usura e ne diminuiscono la vita utile.

In ogni timestep HOMER calcola la potenza prodotta da rinnovabili e la confronta con il carico.

Se la potenza da rinnovabili eccede il carico, decide cosa fare dell'energia in eccesso (caricare la batteria, seguire il carico programmabile, buttarla via), viceversa decide in che modo coprire il resto del carico (scaricare la batteria, usando un generatore programmabile). Alla fine della simulazione HOMER verifica se i limiti imposti inizialmente sono soddisfatti (alcuni limiti possono essere la percentuale di energia prodotta da rinnovabili, le ore annuali massime

di funzionamento del generatore) e calcola il costo totale lungo il ciclo di vita o Net Present Cost (NPC). Esso include il costo capitale iniziale dei componenti del sistema, i costi di sostituzione dei componenti e i costi di manutenzione e del combustibile. Un altro parametro che viene calcolato è la vita utile della batteria in base all'utilizzo che viene fatto. Esso influisce sul Net Present Cost.

Ottimizzazione Per HOMER la soluzione ottima è quella a cui corrisponde il minore Net Present Cost. HOMER permette al modellatore di inserire tutte le possibili taglie e quantità dei componenti ed esegue lo step di simulazione per ciascuna combinazione possibile, utilizzando entrambe le strategie di dispacciamento. Alla fine esso scarta le configurazioni che non rispettano i vincoli imposti dall'utente o che non sono fattibili e ordina le altre configurazioni in base al NPC.

Analisi di sensibilità HOMER permette al modellatore di inserire tutte le possibili variabili di sensibilità ed effettua un processo di ottimizzazione per ogni loro combinazione.

Modello

Per modello si intende il modo in cui HOMER schematizza e gestisce i carichi, le risorse disponibili, i componenti e la strategia di dispacciamento. Di seguito si descrivono i carichi e la strategia di dispacciamento, mentre le risorse disponibili e i componenti sono stati già trattati nei capitoli precedenti.

Carichi Nei capitoli precedenti è già stata spiegata nel dettaglio l'importanza della determinazione della domanda di energia: servire il carico è la ragione dell'esistenza di una microgrid.

Di seguito si approfondisce il modo in cui HOMER gestisce ogni tipologia di carico. Il carico viene classificato secondo la metodologia illustrata nei capitoli precedenti, ovvero viene diviso in:

- carico **non programmabile**, che deve essere soddisfatto secondo un certo programma fissato
- carico **programmabile**, che può essere soddisfatto in qualsiasi momento all'interno di un certo periodo di tempo.

Carico non programmabile

Il carico primario è la domanda di elettricità che il sistema deve soddisfare secondo un certo programma fissato. Se in un certo timestep il carico non viene

soddisfatto, si parla di *'unmet load'*. Alla fine della simulazione HOMER calcola il totale del carico insoddisfatto, che può costituire un vincolo da rispettare.

Facendo riferimento al capitolo relativo al calcolo della domanda, il carico primario è costituito da

- Domanda legata a tutti i bisogni di base ad eccezione dell'acqua potabile
- Domanda legata agli usi produttivi.

Il carico è in genere in corrente alternata.

Carico programmabile

Il carico programmabile è la domanda di elettricità che può essere soddisfatta in qualunque momento all'interno di un determinato periodo di tempo. I carichi programmabili sono spesso caratterizzati dalla possibilità di accumulo del bene, che permette una certa flessibilità. La presenza di carichi programmabili è vantaggiosa in sistemi caratterizzati dalla presenza di molte fonti aleatorie, perchè permettono di sfruttare al meglio queste fonti quando presenti, evitando dissipazioni e diminuendo l'utilizzo della batteria.

Facendo riferimento al capitolo relativo al calcolo della domanda, il carico programmabile è costituito da

- Domanda legata all'irrigazione
- Domanda legata al consumo di acqua potabile.

Gestione del carico programmabile

Per gestire il carico programmabile è necessario creare un modello che rappresenti verosimilmente la realtà. HOMER utilizza il **modello del serbatoio**. Il carico programmabile ha a disposizione un serbatoio che si svuota secondo una certa legge e che viene riempito dall'eccesso di rinnovabili (o dal generatore dispacciabile che lavora al minimo).

La dimensione del serbatoio è un parametro fissato. Se per esempio si considera l'irrigazione, si dimensiona il serbatoio in base alla richiesta di acqua giornaliera, tenendo conto del margine di sicurezza desiderato, ovvero da quanti giorni si desidera avere coperti in caso di mancanza di elettricità.

Per stabilire la legge con cui si svuota il serbatoio, si ipotizza un andamento giornaliero verosimile del carico programmabile. Si può anche ipotizzare che il serbatoio si svuoti a ritmo costante.

Il serbatoio del carico programmabile viene riempito solo quando la produzione di rinnovabili è maggiore del carico (o quando il diesel lavora al minimo e produce potenza in eccesso). Viene fissato un livello minimo di sicurezza al di sotto del quale il serbatoio non può svuotarsi e quando questo livello viene raggiunto il carico programmabile viene trattato come carico non programmabile, e soddisfatto quindi dal diesel o dalla batteria. Il serbatoio rimane al minimo finché non si ha di nuovo eccesso di rinnovabili.

Strategia di dispacciamento Nel processo di simulazione, HOMER deve prendere decisioni riguardo il comportamento dei componenti ora per ora.

Il principio su cui si basa l'algoritmo di gestione della rete è il principio di conservazione dell'energia, che deve essere rispettato in ogni timestep.

In ogni timestep deve essere rispettato il seguente bilancio:

$$P_{wind}(t) + P_{PV}(t) + P_{gen}(t) + P_{batt}(t) - P_{load}(t) - P_{def}(t) - P_{dumped}(t) = 0$$

dove

$P_{wind}(t)$ = potenza prodotta dalle turbine eoliche

$P_{PV}(t)$ = potenza prodotta dai pannelli fotovoltaici

$P_{gen}(t)$ = potenza prodotta dal generatore Diesel

$P_{batt}(t)$ = flusso entrante o uscente dalla batteria, positiva se entrante, negativa se uscente

$P_{load}(t)$ = carico non programmabile

$P_{def}(t)$ = carico programmabile

$P_{dumped}(t)$ = potenza dissipata dal sistema quando si ha un eccesso di produzione da rinnovabili rispetto alla domanda e alla capacità di accumulo.

I componenti non dispacciabili sono difficili da modellare, tuttavia sono semplici da trattare per quanto riguarda la logica di gestione. Infatti essi producono sempre in base alla disponibilità di risorse. È possibile stimarne la potenza prodotta a partire dai dati a disposizione sulle grandezze ambientali, quali la velocità del vento per le turbine eoliche e la radiazione solare per l'impianto fotovoltaico.

Le risorse dispacciabili sono più difficili da gestire, perché danno luogo a una serie di possibili soluzioni tra cui scegliere.

Per ogni timestep l' algoritmo di HOMER procede in questo ordine:

per prima cosa calcola il carico netto (Net Load NL), ovvero la differenza tra la domanda e la potenza prodotta da fonti rinnovabili:

$$NL(t) = P_{load}(t) - P_{PV}(t) \cdot \eta_{inv} - P_{wind}(t)$$

Se il carico netto è negativo si ha un eccesso di rinnovabili che viene utilizzato per caricare la batteria o per caricare il serbatoio del carico programmabile (la scelta tra queste due possibilità viene effettuata in base al bus su cui si ha eccesso di produzione). Se si ha ancora energia in eccesso essa viene dissipata.

Se il carico netto è positivo, bisogna decidere se accendere il Diesel o scaricare la batteria.

Il principio fondamentale che HOMER segue è quello della minimizzazione dei costi. HOMER rappresenta economicamente ogni fonte energetica dispatchabile con un costo fisso in dollari all'ora e uno marginale in dollari al kWh. Questi costi rappresentano il costo totale di produzione dell' energia con una certa fonte in quell'ora. Per ogni ora HOMER sceglie il generatore o la combinazione di generatori che in quel timestep comportano il minor costo.

I costi del diesel nel timestep i vengono calcolati come:

$$C_{gen_i} \left[\frac{\$}{kWh} \right] = \frac{C_{gen, fixed} \left[\frac{\$}{h} \right]}{P_{gen_i} [kW]} + C_{gen, mar_i} \left[\frac{\$}{kWh} \right]$$

dove

- i costi fissi del generatore $C_{gen, fixed}$ rappresentano il costo all'ora dato dal tenere il generatore acceso senza produrre elettricità, e si calcolano come

$$C_{gen, fixed} \left[\frac{\$}{h} \right] = C_{O\&M} \left[\frac{\$}{h} \right] + \frac{C_{rep, gen} [\$]}{VU[h]}$$

dove

$C_{O\&M}$ sono i costi di manutenzione fissi.

$C_{rep, gen}$ sono i costi di sostituzione del generatore, spesso pari ai costi di investimento, a meno che il generatore non sia già presente all'inizio del progetto.

VU è la vita utile del generatore.

- i costi marginali C_{gen,mar_i} sono i costi aggiuntivi per kWh di elettricità prodotta, e si calcolano come

$$C_{gen,mar_i} \left[\frac{\$}{kWh} \right] = \frac{C_{fuel} \left[\frac{\$}{L} \right] \cdot 3.6 \left[\frac{MJ}{kWh} \right]}{\eta_{gen_i} \cdot \rho_{fuel} \left[\frac{kg}{L} \right] \cdot PCI_{fuel} \left[\frac{MJ}{kg} \right]}$$

I costi della batteria nel timestep i si calcolano come

$$C_{bat_i} \left[\frac{\$}{kWh} \right] = C_{bw} \left[\frac{\$}{kWh} \right] + C_{bei} \left[\frac{\$}{kWh} \right]$$

dove

- i costi di usura della batteria C_{bw} sono costanti e pari a (come già illustrato nel capitolo riguardante la struttura della microgrid)

$$C_{bw} \left[\frac{\$}{kWh} \right] = \frac{C_{rep,batt} [\$]}{N_{batt} Q_{lifetime} [kWh] \sqrt{\eta_{rt}}}$$

dove

$C_{rep,batt}$ sono i costi di sostituzione della batteria, spesso pari ai costi di investimento

N_{batt} è il numero delle batterie

$Q_{lifetime}$ è l'energia che può entrare nella batteria lungo tutto l'arco della vita utile (lifetime throughput)

η_{rt} è il rendimento di roundtrip della batteria, ovvero il prodotto del rendimento di carica e scarica

HOMER non tiene conto dell'influenza dello stato di carica della batteria sull'usura e sull'efficienza di carica e scarica.

- C_{bei} rappresenta il costo medio dell'energia accumulata nella batteria. Questo costo è nullo se la batteria viene caricata da fonti rinnovabili o dal diesel che lavora al minimo carico, mentre ha un valore se viene caricata appositamente dal diesel in modalità Cycle Charging, e viene calcolata come

$$C_{bei} = \frac{\sum_{t=1}^{i-1} C_{cci}}{\sum_{t=1}^{i-1} E_{cci} \eta_{rt}}$$

dove E_{cci} è la quantità di energia che carica la batteria prodotta dal diesel non al minimo carico. Essa si calcola come

$$E_{cci} = (P_{gen_i} - NL_i)\Delta t$$

e dove C_{cci} è il costo dell'energia accumulata nella batteria all'istante di tempo i , e si calcola come

$$C_{cci} = E_{cci} C_{gen,mar_i}$$

Una volta stabilito se sia più conveniente scaricare la batteria o accendere la il diesel, le scelte successive dipendono dalla strategia di dispacciamento che si sta seguendo.

Nelle ore in cui il Diesel è acceso, resta da stabilire a quale carico debba funzionare e quindi se oltre a soddisfare il carico netto debba anche caricare la batteria, ed è qui che entrano in gioco le strategie di dispacciamento.

Non è infatti possibile determinare il costo che comporta caricare la batteria, che dipende da quello che succederà nelle ore successive (se l'energia prodotta dal diesel e stoccata verrà utilizzata o se comporterà uno spreco di energia in futuro a causa della saturazione della batteria). Per questo motivo non è possibile utilizzare un approccio simile al precedente, ovvero scegliere la soluzione che comporta il costo minore nel timestep preso in considerazione.

HOMER non cerca una strategia di carica della batteria ottima, ma applica due strategie diverse per poi stabilire quale delle due è la migliore. La strategia di dispacciamento non influenza le decisioni su quale generatore dispacciabile utilizzare (batteria o diesel). Solo dopo che queste decisioni vengono prese in base al costo ora per ora, entrano in gioco le strategie di dispacciamento che stabiliscono come le fonti dispacciabili scelte debbano funzionare. Le due strategie utilizzate da HOMER sono la Load Following e la Cycle Charging.

Load following

Quando si utilizza la strategia *Load following*, il generatore produce solo abbastanza potenza per servire il carico, e non carica mai la batteria.

- Se scaricare la batteria risulta più conveniente, essa soddisfa il carico in base ai propri vincoli, ovvero fino al massimo al suo stato di carica minimo. Se la batteria raggiunge il SOC_{min} e resta ancora del carico da soddisfare, questo viene coperto con il Diesel. Se il carico che la batteria non è in grado di soddisfare è maggiore del minimo carico del diesel, esso viene soddisfatto dal diesel che non produce potenza in eccesso. Se

invece il carico che resta da soddisfare è minore del minimo carico del diesel, si utilizza quest'ultimo al minimo carico e la batteria si scarica fino a soddisfare il resto del carico, e quindi non fino al SOC_{min} .

- Se invece è conveniente accendere il diesel, esso viene acceso o al minimo carico o a quel carico che permette di soddisfare la domanda. Nel primo caso può esserci della potenza in eccesso che carica prima il serbatoio del carico programmabile (perché sia il generatore diesel sia il carico programmabile si trovano sul bus AC) e poi la batteria, nel secondo caso non si ha potenza in eccesso.

Cicle Charging

Con la strategia *Cycle Charging*, ogni volta che il generatore Diesel è acceso, funziona al carico nominale, e con la potenza in eccesso rispetto al carico netto carica la batteria.

Per quest'ultima strategia è possibile fissare un parametro di controllo chiamato *setpoint*: una volta che il generatore si accende e inizia a caricare la batteria, continua a farlo finché essa non raggiunge il setpoint, dopodiché HOMER può scegliere di servire il carico scaricando la batteria (se il costo in quel timestep è minore rispetto all'uso del diesel). Questa strategia (del setpoint) serve ad evitare situazioni in cui la batteria continua ad andare incontro a cicli di carica e scarica vicino al minimo stato di carica, situazione molto sfavorevole per la vita utile della batteria.

Per ogni timestep:

- Se scaricare la batteria risulta più conveniente rispetto al diesel ed essa si trova al di sopra del SOC_{min} , non è detto che si scelga di soddisfare il carico utilizzando la batteria. E' necessario, infatti, che valgano le seguenti condizioni:
 - La batteria si trova al di sopra del $SOC_{setpoint}$ oppure si trova al di sotto del $SOC_{setpoint}$ e il diesel all'istante precedente è spento
 - La batteria è in grado di coprire da sola tutto il carico netto.
- Se risulta conveniente accendere il diesel o se una delle precedenti condizioni non è verificata, si accende il diesel al carico nominale.

Per capire meglio la logica illustrata si può pensare a un semplice sistema PV-Diesel-batterie.

I pannelli fotovoltaici producono una certa potenza in base alla disponibilità di fonte solare. Se in una certa ora la potenza prodotta dal PV supera la domanda,

l'energia in eccesso viene utilizzata per caricare la batteria, o viene buttata se la batteria è piena.

Se invece la potenza prodotta dal PV non è abbastanza per soddisfare il carico, bisogna decidere se scaricare la batteria o se utilizzare il generatore diesel. Se entrambi sono in grado di fornire la potenza necessaria, HOMER decide di utilizzare la soluzione che in quell'ora costa di meno. Se la soluzione più conveniente consiste nello scaricare la batteria, e la batteria è in grado di soddisfare il carico, HOMER utilizza questa soluzione. Altrimenti viene acceso il diesel, al carico nominale se si sta seguendo la strategia CC, solo per coprire il carico netto se si sta seguendo la strategia LF.

Per riassumere, ogni ora, quando la potenza da rinnovabili non è abbastanza per coprire il carico, ci sono due decisioni da prendere:

- Quale fonte dispacciabile utilizzare (Diesel o batteria)
Questa decisione viene presa da HOMER in base al costo (fisso più marginale) nell'ora considerata.
- Se il diesel è acceso, bisogna decidere se esso debba funzionare a carico nominale o a carico parziale.
Questa decisione viene presa in base alla strategia di dispacciamento.

Gestione dei flussi tra AC e DC bus HOMER deve effettuare una decisione separata riguardo come allocare l'elettricità introdotta nel sistema.

La presenza di un bus di corrente continua e uno di corrente alternata complica le decisioni riguardo come allocare l'elettricità in eccesso (da rinnovabili o dal diesel che lavora al minimo carico). Una volta che il carico non programmabile è stato soddisfatto, la potenza in eccesso può caricare la batteria o riempire il serbatoio del carico programmabile. Batteria e serbatoio del carico programmabile sono quindi analoghi a serbatoi, il primo collegato al bus di corrente continua e il secondo a quello di corrente alternata. HOMER segue la seguente catena di priorità per allocare l'elettricità prodotta su un bus:

- Soddisfare il carico primario sullo stesso bus
- Soddisfare il carico primario sul bus opposto
- Riempire il serbatoio sullo stesso bus
- Riempire il serbatoio sul bus opposto
- Buttare l'elettricità in eccesso

Questa strategia permette di minimizzare i flussi attraverso l'inverter, e quindi le dissipazioni dovute alla presenza di questo componente.

4.2.2 MILP

Come visto, HOMER è uno strumento semplice e valido per il dimensionamento di una microgrid, tuttavia è caratterizzato da una serie di limiti.

Il codice è basato, infatti, su una serie di assunzioni e approssimazioni che influenzano molto la soluzione finale in termini di design ottimo e di LCOE (Levelized cost of Electricity) e il cui peso aumenta all'aumentare della complessità del sistema. I limiti principali sono la mancanza di una serie di vincoli tecnici sui componenti e la presenza di solo due strategie di dispacciamento che definiscono a priori il comportamento delle unità programmabili.

Questi limiti vengono superati da metodi più avanzati basati su strategie rolling-horizon che includono un problema MILP (Mixed Integer Linear Programming) da risolvere. Grazie a questi metodi è possibile

- determinare il design e il funzionamento della microgrid che portano ai minori costi operativi
- tener conto delle previsioni di produzione e consumo di unità non dispacciabili
- tener conto del funzionamento realistico di ogni componente
- utilizzare una strategia di dispacciamento flessibile.

Modello

Carichi Anche in questo caso i carichi vengono distinti in carico non programmabile, che deve essere soddisfatto in ogni istante di tempo e la cui time schedule non può essere modificata, e in carico programmabile, che può essere soddisfatto entro un certo orizzonte di tempo.

Il carico programmabile viene gestito, come per HOMER, con il modello del serbatoio.

Strategia di dispacciamento

Simulazione Mentre nelle strategie di dispacciamento utilizzate da HOMER le decisioni vengono prese basandosi esclusivamente sui valori della domanda di energia e dello stato di carica della batteria relativi al time-step corrente, la strategia rolling-horizon tiene conto anche delle previsioni di produzione e di consumo di energia nelle ore successive. Questo rende la strategia più flessibile e più previdente.

L'approccio utilizza una strategia rolling-horizon che include la risoluzione di un problema MILP (Mixed Integer Linear Programming) di unit commitment.

Il comportamento ottimo di ogni componente (generatori dispacciabili, carichi programmabili e batterie) viene ottenuto minimizzando i costi operativi totali entro un certo orizzonte di tempo (T_h), considerando i vincoli operativi di ogni componente (ad esempio il minimo numero di ore di funzionamento e il massimo numero di accensioni al giorno.).

Per definire in modo appropriato il comportamento dei componenti dispacciabili, sono necessarie le previsioni di domanda di energia (carico non programmabile) e di produzione di energia dai generatori non dispacciabili entro tutto l'orizzonte di tempo.

La funzione obiettivo che deve essere minimizzata comprende un termine di penalità proporzionale al carico non soddisfatto e un termine pari ai costi operativi effettivi. Questi ultimi includono il consumo di combustibile, i costi di manutenzione dei componenti, i costi di start-up per i generatori e i costi di usura della batteria.

Il problema viene formulato come MILP utilizzando il linguaggio AMPL, e risolto con Gurobi.

L'approccio rolling-horizon permette di diminuire gli errori nella gestione dovuti alle incertezze di previsione. All'inizio di ogni timestep il problema viene risolto per ottenere il miglior comportamento dei generatori dispacciabili nelle successive ore T_h . I risultati dell'ottimizzazione vengono seguiti soltanto durante il primo time-step, dopo il quale le previsioni vengono aggiornate, il problema viene risolto nuovamente e il comportamento di ogni componente durante l'orizzonte di tempo T_h riottimizzato (figura 4.6). In questo modo il comportamento della minirete è sempre basato sulle previsioni più recenti e accurate e l'impatto dell'errore di previsione è ridotto.

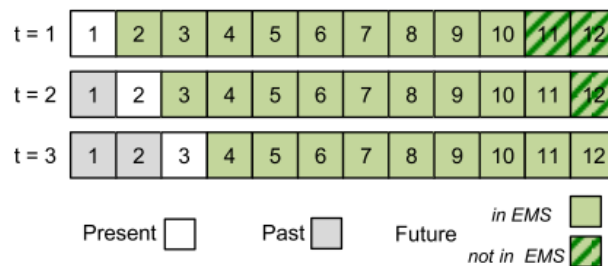


Figura 4.6: Esempio di approccio rolling-horizon con $T_h = 10h$ [53]

Grazie all'utilizzo appropriato di generatori dispacciabili e carichi programmabili, è possibile minimizzare i flussi alla e dalla batteria, minimizzandone l'usura e minimizzando le dissipazioni di energia dovute al processo di carica e scarica.

Problema La risoluzione del problema determina per ogni timestep t nell'intero orizzonte di tempo T_h il comportamento di ogni unità programmabile e il livello per ogni bene accumulabile, minimizzando i costi operativi totali e rispettando i vincoli tecnici.

Le informazioni richieste sono:

- Le condizioni iniziali dei sistemi di accumulo e delle unità programmabili
- La produzione e il consumo di ogni bene da parte delle unità non programmabili.
- Le curve di rendimento, le penalità di start-up, i vincoli tecnici di ogni unità programmabile
- Le proprietà del sistema di accumulo ogni bene.
- La penalità per il carico non soddisfatto

La differenza tra la produzione e il consumo da parte di unità non programmabili costituisce il bilancio del bene, l'informazione di partenza per stabilire il comportamento delle unità programmabili. Per i beni senza accumulo, il bilancio di produzione e consumo deve essere assicurato in ogni time-step utilizzando le unità programmabili. Se è presente un sistema di accumulo, l'eccesso di produzione in un certo time-step può essere accumulato e usato in futuro, altrimenti il bene accumulato può essere utilizzato per soddisfare la domanda.

Il termine di penalità è una funzione del carico non soddisfatto. In base al valore della penalità, che dipende dalla priorità che viene attribuita al carico, il sistema può decidere di soddisfare solo parte della domanda se questa scelta evita un grande aumento dei costi operativi.

I costi variabili costituiscono la funzione obiettivo da minimizzare:

$$FO = \sum_{t \in T_h} \sum_{i \in U} [c_{fuel,i}(t) + c_{O\&M,i}(t) + c_{start-up,i}(t)] + c_{wear}(t) + \sum_{t \in T_h} \mu_t \pi$$

dove

T_h è l'orizzonte temporale che comprende tutti i time-step t .

U è l'insieme delle unità programmabili i .

$C_{fuel,i}(t)$ è il costo del combustibile dell'unità programmabile i nel timestep t
 $C_{O\&M,i}(t)$ è il costo di manutenzione dell'unità programmabile i nel time-step t
 $C_{start-up,i}(t)$ è il costo di start-up dell'unità programmabile i nel time-step t
 $C_{wear}(t)$ è il costo di usura della batteria, calcolato come descritto nel paragrafo riguardante il sistema di accumulo.

$\sum_{t \in T_h} \mu_t \pi$ rappresenta il termine di penalità nel time-step t per ogni bene g , dove

$\mu_{t,g}$ è il carico non soddisfatto del bene g nel time-step t e π_g è la penalità associata alla domanda non soddisfatta del bene g .

Per simulazioni lungo un periodo di tempo breve viene incluso anche un costo di penalità dovuto alla differenza tra il livello di carica della batteria all'inizio e alla fine della simulazione. Questo termine risulta trascurabile se l'orizzonte di tempo è pari a un anno.

La funzione obiettivo contiene solo costi, tuttavia il bilancio energetico e i vincoli tecnici delle unità vengono considerati implicitamente attraverso una serie di vincoli.

I vincoli da rispettare in ogni time-step t sono i seguenti:

- Il bilancio tra produzione e consumo in ogni time-step per ogni bene
- La massima capacità di accumulo e la massima quantità di bene che può essere resa disponibile dai sistemi di accumulo
- Le curve di consumo e produzione, il massimo e il minimo carico di tutte le unità
- Le rampe delle unità programmabili
- Il minimo numero di ore di funzionamento di una unità una volta che è stata accesa
- Per le unità che possono consumare e produrre lo stesso bene (come l'inverter bidirezionale), l'impossibilità di produrre e consumare lo stesso bene contemporaneamente
- La riserva operativa necessaria in sistemi con un'alta penetrazione di rinnovabili

La strategia rolling-horizon richiede tempi computazionali molto maggiori rispetto alle strategie euristiche. Per questo motivo non si esegue la simulazione per un intero anno, ma solo per un breve periodo (ad esempio 15 giorni), diviso a sua volta in periodi in modo da rappresentare realisticamente l'intero anno. In questo modo si ottiene un compromesso tra una buona rappresentazione dell'anno (e quindi delle fluttuazioni della domanda e della disponibilità di risorse rinnovabili) e un tempo computazionale relativamente basso.

I costi operativi lungo l'arco dell'intero anno, tuttavia, devono tener conto della disponibilità dei componenti. I generatori a biomassa (in questo caso il gassificatore) non saranno disponibili per un certo numero di giorni a causa della manutenzione programmata o di guasti non previsti. In questi giorni il generatore diesel viene usato al posto del generatore a biomassa. Il costo

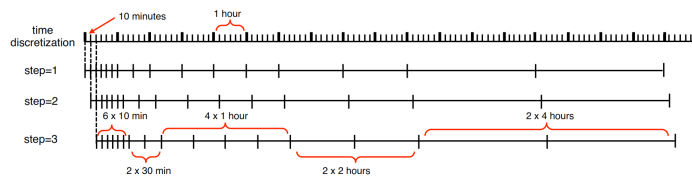


Figura 4.7: Spiegazione dell'utilizzo del time-step variabile nella strategia rolling-horizon

operativo addizionale viene valutato simulando la stessa configurazione del sistema (taglia di PV, batteria e turbina eolica) e assumendo che il generatore a biomassa non sia disponibile. Si assume una disponibilità del gassificatore pari a 90%.

Il time-step utilizzato nella maggior parte degli studi in letteratura è pari a un'ora ([52], [53]). Tuttavia, nel presente lavoro, il confronto tra i risultati delle diverse strategie viene fatto rispetto ai risultati ottenuti in [51], dove si utilizza un time-step di 10 minuti. Grazie al time-step ridotto si riesce a tener conto di eventi rapidi, come fluttuazioni più veloci di carichi e risorse rinnovabili, e rampe e start-up dei componenti più lenti come i gassificatori, ottenendo uno scenario più realistico.

Questo porta tuttavia ad un aumento della complessità del problema e dei tempi computazionali. Per questa ragione in [51] viene utilizzato un time-step variabile: il time-step viene progressivamente aumentato da 10 minuti a 4 ore coprendo un intervallo di tempo di 18 ore con 16 time-step, mantenendo uno sforzo computazionale limitato. In questo modo il futuro più prossimo viene descritto con alta accuratezza, mentre le previsioni più lontane sono meno accurate e vengono tenute in considerazione in maniera aggregata. In figura 4.7 si vede la schematizzazione della strategia rolling-horizon con time-step fisso e variabile.

Ottimizzazione Lo step di ottimizzazione viene effettuato, anche in questo caso, in maniera euristica, ovvero eseguendo la simulazione di diverse combinazioni di generatori e sistemi di accumulo, e confrontando i costi sulla base di un funzionamento di un anno. La strategia euristica permette di descrivere bene l'influenza di differenti variabili sul risultato finale.

Il parametro che viene utilizzato per confrontare tra loro le varie configurazioni è il LCOE. Esso rappresenta il costo medio per kWh di elettricità utile prodotta, e include i costi operativi e di investimento. Esso viene ottenuto utilizzando il metodo dei cash flow per tutta la vita del progetto. Per l'anno j -esimo, il cash flow CF include:

$$CF_j = \sum_{i \in U} [C_{inv,i} + C_{O\&M,i}] + C_{opex}$$

dove

$C_{inv,i}$ sono i costi di investimento del componente i nell'anno j

$C_{O\&M,i}$ sono i costi di manutenzione fissi del componente i nell'anno j

C_{opex} sono i costi operativi calcolati dalla simulazione.

Si assume che i costi operativi siano costanti durante l'intera vita utile del progetto. Non si considera quindi il decadimento di prestazione dei componenti e l'eventuale cambio della domanda, del prezzo del combustibile e dei costi di manutenzione. Per tener conto di queste eventualità è possibile effettuare un'analisi di sensibilità.

Analisi di sensibilità Anche lo step di analisi di sensibilità viene effettuato secondo una strategia euristica, ovvero eseguendo l'ottimizzazione per ogni combinazione di variabili di sensibilità.

In questo tipo di approccio, anche l'accuratezza delle previsioni può diventare una variabile di sensibilità (nell'approccio euristico di HOMER le previsioni non vengono considerate nel prendere le decisioni, e quindi non influenzano il risultato). Maggiore è l'errore nelle previsioni, minore è l'accuratezza della soluzione trovata e quindi maggiore è l'LCOE. Tuttavia, grazie alla strategia rolling-horizon, che aggiorna le previsioni ad ogni time-step rimediando alle inaccuranze dei time-step precedenti, si riesce a diminuire l'influenza dell'errore nelle previsioni sulla strategia di dispacciamento.

Confronto Il metodo illustrato costituisce la procedura migliore per il design e per la gestione di una minirete isolata, portando a due principali vantaggi:

- riduzione del LCOE grazie alla scelta delle taglie ottime dei componenti e alla gestione ottimale dei componenti dispacciabili.

L'utilizzo delle previsioni che riguardano le unità non programmabili nel prendere le decisioni sulle unità programmabili, permette uno sfruttamento migliore delle fonti rinnovabili e un'usura limitata della batteria. Il vantaggio è ancora maggiore se si considerano i costi di start-up dei componenti dispacciabili.

- capacità di gestire sistemi complessi.

La strategia è inoltre molto flessibile, perchè qualsiasi componente può essere aggiunto includendo vincoli sul funzionamento reale.

Nessuna strategia euristica è in grado di gestire un sistema così complesso, quindi questi sistemi non vengono presi in considerazione nel presente lavoro.

Alla luce delle precedenti considerazioni, la strategia illustrata può essere utilizzata principalmente per due scopi:

- sostituire l'utilizzo di approcci euristici per determinare il comportamento ottimo di unità programmabili in minireti esistenti.

Questo permette una riduzione dei costi operativi e l'usura dei componenti, e diminuisce il carico non soddisfatto e lo spreco di energia da fonti rinnovabili grazie all'utilizzo delle previsioni.

- design di nuove minireti, con lo scopo di trovare le taglie di generatori e batterie che portano al minor LCOE.

Nell'articolo [53] è stato eseguito un confronto tra i risultati ottenuti con la strategia MILP e con la strategia euristica di HOMER. Senza considerare i costi di start-up la strategia MILP raggiunge una riduzione di costo di circa il 10 % rispetto alla strategia euristica più efficace (LF). Considerando i costi di start-up si riesce a risparmiare fino al 13%, poiché la strategia LF non minimizza in alcun modo le accensioni dei componenti dispacciabili.

4.2.3 Euristicica modificata

Si vuole adesso analizzare una strategia euristica in cui si cerca di mantenere la semplicità della strategia HOMER, eseguendo alcune modifiche in modo tale da superare alcuni dei limiti precedentemente descritti e da avvicinarsi ai risultati ottenuti con la strategia MILP.

Le modifiche alla logica euristica di HOMER sono state effettuate solo per lo step di simulazione, mentre lo step di ottimizzazione e di analisi di sensibilità vengono effettuati seguendo lo stesso metodo delle strategie HOMER e MILP, ovvero eseguendo la simulazione per tutte le combinazioni possibili di componenti e taglie.

Modello

Carichi I carichi vengono gestiti seguendo lo stesso approccio di HOMER: si hanno un carico programmabile, che viene soddisfatto in ogni istante di tempo, e uno non programmabile, che viene gestito con il modello del serbatoio con legge di svuotamento fissa e determinata a priori.

La differenza rispetto alla strategia MILP si ha sia nell'ottimizzazione dell'andamento giornaliero del carico programmabile, sia per quanto riguarda la possibilità aggiuntiva di non soddisfare il carico quando questo comporta un aumento di costi molto elevato.

Strategia di dispacciamento

Simulazione La strategia euristica modificata (EM) risulta più semplice se è presente un solo generatore dispacciabile (diesel), e si complica con la presenza di un secondo generatore dispacciabile (generatore a biomassa)

Senza generatore a biomassa Anche questa strategia si basa sul principio di conservazione dell'energia, che deve essere rispettato in ogni time-step.

Le decisioni prese in ogni time-step partono sempre dal calcolo del carico netto (NL):

$$NL(t) = P_{load}(t) - P_{PV}(t) \cdot \eta_{inv} - P_{wind}(t)$$

Se il carico netto è negativo si ha eccesso di potenza da fonti rinnovabili, e la strategia segue la stessa logica di quella di HOMER: la potenza in eccesso viene utilizzata per caricare la batteria o il serbatoio del carico programmabile (la scelta tra queste due possibilità viene effettuata secondo la logica di gestione dei bus AC e DC). Se si ha ancora energia in eccesso essa viene dissipata.

Se il carico netto è positivo, bisogna decidere

- Se scaricare la batteria o accendere il Diesel
- Nel caso in cui si opti per la seconda opzione, il carico del diesel.

Scelta tra batteria e diesel.

Come illustrato precedentemente, la strategia HOMER, in ogni time-step, valuta i costi operativi che comporterebbe utilizzare il generatore diesel e scaricare la batteria, e sceglie la soluzione con i costi minori.

E' stata effettuata un' analisi dei costi in $\$/kW_{prodotta}$ dal diesel e dalla batteria (in questo caso per prodotto si intende reso disponibile attraverso il processo di scarica) in funzione della potenza prodotta.

I costi del diesel sono stati calcolati come spiegato nel capitolo dedicato a HOMER, utilizzando la curva di rendimento della figura 4.3:

$$C_{gen_i} \left[\frac{\$}{kWh} \right] = \frac{C_{gen, fixed}(P_{gen_i})}{P_{gen_i} [kW]} + \frac{C_{fuel} \cdot 3.6}{\eta_{gen_i}(P_{gen_i}) \cdot \rho_{fuel} \cdot PCI_{fuel}} \left[\frac{\$}{kWh} \right]$$

Dall'equazione si deduce che i costi fissi non dipendono dalla potenza generata (dal carico), e che i costi marginali diminuiscono all'aumentare della potenza generata grazie all'aumento del rendimento.

I costi della batteria vengono calcolati come spiegato nel capitolo dedicato ai sistemi di accumulo, senza però tener conto del weighting factor, che dipende dallo stato di carica della batteria, di cui non si può tener conto in questa analisi (questa scelta equivale a tenere costante lo stato di carica della batteria in corrispondenza di un weighting factor pari a 1. L'ipotesi non cambia i risultati ottenuti poichè anche nel caso peggiore, ovvero con weighting factor pari a 1,2, i risultati ottenuti sono gli stessi).

Il risultato ottenuto viene illustrato in figura 4.12, in cui si vede che la batteria risulta sempre conveniente rispetto al diesel.

Il risultato può cambiare nel caso in cui il costo del combustibile diminuisca molto (il grafico si riferisce a un costo del combustibile di 1 \$/L) o nel caso in cui il costo di usura della batteria in $\$/kWh$ risulti costare almeno il doppio rispetto a quella considerata (questo può succedere in caso di batterie con costo di investimento molto elevato, con basso $Q_{lifetime}$ o con basso rendimento di carica-scarica.).

In base a questa analisi, se per ogni time-step si confrontassero i costi della batteria e del diesel per scegliere la strategia più conveniente economicamente,

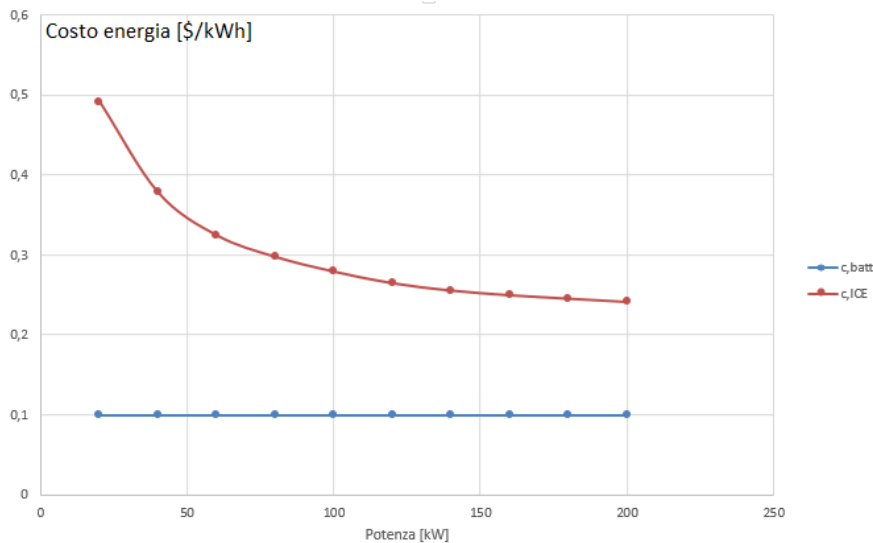


Figura 4.8: La figura mostra l'andamento del costo in [\$/kW] prodotto dal diesel e dalla batteria, in funzione della potenza prodotta in kW. La mancanza di intersezione mostra come la batteria, quando disponibile, sia sempre conveniente.

si utilizzerebbe sempre la batteria quando è in grado di servire il carico da sola, e il diesel quando la batteria è vicina al minimo stato di carica.

La strategia euristica modificata (EM) impone esattamente questo comportamento, evitando di effettuare l'analisi economica in ogni time-step.

Esistono time-step in cui è conveniente scaricare la batteria, che però è in grado di soddisfare solo parte del carico. La strategia HOMER in questi time-step usa la batteria e il diesel in maniera combinata. Tuttavia questo è svantaggioso sia per il diesel, che lavora a un carico basso, sia per la batteria, che lavora a un SOC basso (HOMER non tiene conto dell'aumento dell'usura della batteria al variare del SOC, mentre l'EM lo fa utilizzando il weighting factor di figura 4.5). La strategia EM evita che si verifichi questa situazione, imponendo che venga utilizzata o la batteria o il diesel, e mai entrambi contemporaneamente.

In [53] viene eseguita un'analisi sul fatto che la strategia MILP e la strategia CC (grazie al setpoint) riescono a limitare il numero di startup del diesel, a differenza della LF che si rivela essere la strategia che comporta il maggior numero di start-up.

La strategia LF, infatti, si rivela sempre essere la strategia migliore se non si tiene conto dei costi di startup; tenendo conto dei costi di accensione, invece, può succedere che la strategia CC sia più conveniente.

Nella strategia EM si cerca di limitare il numero degli start-up anche quando si lavora con una strategia equivalente alla LF di HOMER.

Per farlo si utilizza la strategia del set-point allo stesso modo in cui si utilizza

nella strategia CC: se il diesel è acceso all'istante (t-1) e il SOC della batteria è minore del $SOC_{set\ point}$, all'istante t si utilizza ancora il diesel indipendentemente dalla capacità della batteria di soddisfare il carico da sola. La strategia ha due limiti principali:

- E' in grado di limitare gli start-up del diesel (e quindi si differenzia dalla LF) quando questo si trova a lavorare al minimo carico, perché solo in questo caso è presente potenza in eccesso che carica la batteria.
- E' in grado di limitare gli start-up del diesel (e quindi si differenzia dalla LF) se non c'è nessun carico programmabile o se il carico programmabile è piccolo o è dotato di un serbatoio piccolo. Infatti il diesel produce potenza in AC e l'eccesso va prima nel serbatoio in AC del carico programmabile.

La strategia, che riesce a limitare gli start-up del diesel solo in particolari condizioni, si trova quindi in una situazione intermedia tra la strategia HOMER, che non li limita mai, e la strategia MILP che li limita sempre.

Nonostante i due limiti, l'utilizzo di questo parametro abbinato a una strategia equivalente alla LF di HOMER permette di ottenere dei vantaggi in termini di diminuzione degli start-up del diesel. La strategia permette, inoltre, di ottenere altri due vantaggi: mantiene la batteria ad un SOC medio più elevato, e rende i processi di carica e scarica della batteria più regolari (figura 4.9).

La figura 4.9 mostra il confronto tra una strategia LF (HOMER) e una strategia EM equivalente alla LF con set-point pari a 0.7. Si considera, per semplicità, un sistema composto solo da PV, diesel e batterie. L'assenza del carico programmabile rende evidente l'effetto della strategia sulla limitazione degli start-up quando il diesel lavora al minimo carico.

Strategie di dispacciamento

Come spiegato nel capitolo precedente, HOMER utilizza due strategie euristiche fissate, la Load Following e la Cycle Charging.

La strategia LF prevede una penalizzazione del diesel, che lavora spesso a carico parziale, mentre la batteria non va incontro a un eccessivo numero di cicli di carica-scarica profondi. Tuttavia, la batteria esegue spesso cicli di carica-scarica poco profondi in corrispondenza del livello minimo di SOC, e il diesel lavora con un elevato numero di startup (figura 4.9).

La strategia CC prevede una penalizzazione della batteria, che va incontro a frequenti cicli di carica e scarica, mentre il diesel lavora sempre a carico nominale. Il rischio nell'utilizzare questa strategia sta nel fatto che può succedere che la batteria venga caricata dal diesel prima di un picco di rinnovabili (il modello

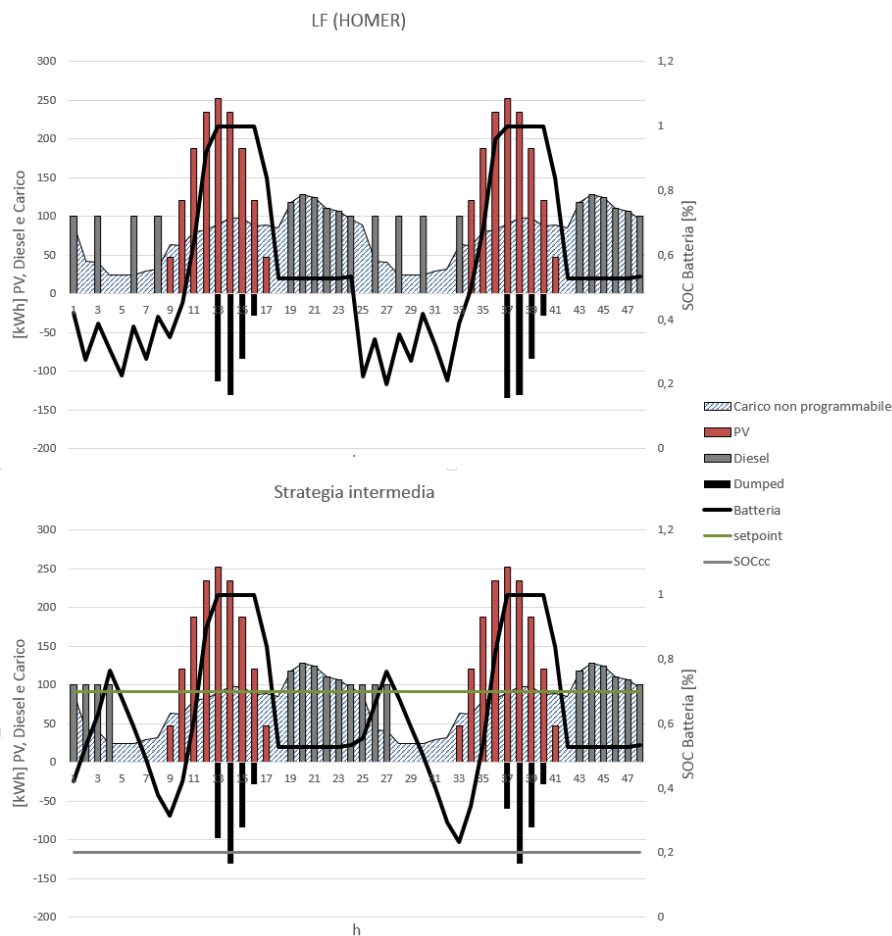


Figura 4.9: In figura si vede come la strategia EM(LF), con un $SOC_{setpoint}$ pari a 0.7, sia in grado di limitare gli startup del diesel quando esso si trova a lavorare al minimo carico, di mantenere la batteria ad un SOC medio più elevato, e di rendere gli andamenti di carica e scarica della batteria più regolari.

non si basa infatti su previsioni, a differenza della strategia MILP), e che quindi molta energia venga buttata. Un esempio della situazione appena descritta viene mostrato in figura 4.10.

L'euristica modificata utilizza una strategia intermedia tra le due appena descritte: Quando la batteria si trova al di sotto di un certo SOC (SOC_{CC}), il generatore si comporta in modo equivalente alla strategia CC, ovvero lavora a carico nominale e carica la batteria. Quando la batteria ha un SOC maggiore del SOC_{CC} , il diesel si comporta in modo equivalente alla strategia LF, ovvero non carica la batteria. In questo modo non si rischia che la batteria venga riempita quando si trova al di sopra di un certo SOC, evitando situazioni come quelle in figura 4.10.

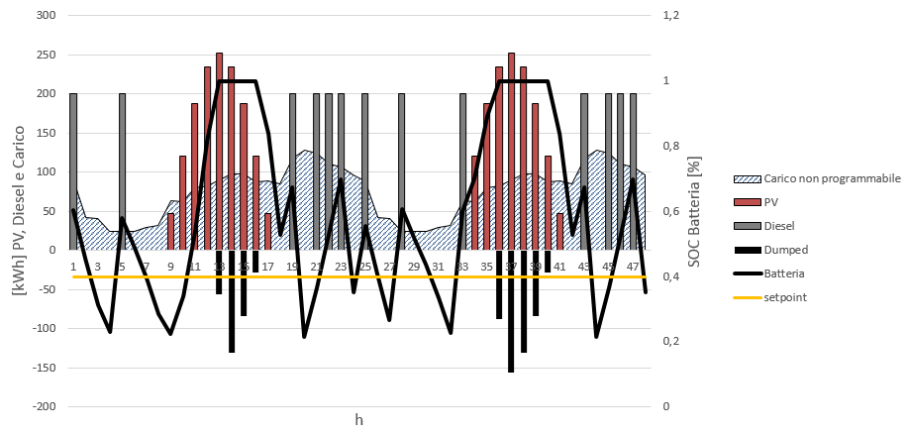


Figura 4.10: Nella figura si vede come la strategia CC(HOMER) possa portare a situazioni sfavorevoli in cui la batteria viene caricata subito prima di un picco di rinnovabili, e come questo porti a uno spreco successivo di energia.

La strategia intermedia prevede quindi un parametro aggiuntivo da ottimizzare, il SOC_{CC} .

Ricapitolando, i vantaggi legati all'utilizzo di una strategia intermedia tra la LF(HOMER) e la CC(HOMER):

- diminuisce, rispetto alla strategia CC(HOMER), il rischio che il diesel carichi le batterie subito prima di un picco di rinnovabili, e quindi il rischio di sprechi evitabili di energia;
- la batteria lavora in condizioni più favorevoli, con meno cicli di carica-scarica profondi rispetto alla strategia CC(HOMER) e meno cicli di carica-scarica poco profondi rispetto alla strategia LF(HOMER);
- diminuiscono i momenti in cui il diesel lavora al minimo carico rispetto alla strategia LF(HOMER), perché se la batteria si trova al di sotto del SOC_{CC} il diesel viene acceso al carico nominale;
- all'aumentare del SOC_{CC} la strategia diventa sempre più efficiente nel limitare il numero di start-up del diesel (con la strategia basata sul $SOC_{setpoint}$), poiché aumentano i momenti in cui il generatore produce potenza in eccesso.

Tra tutte le possibili strategie intermedie, sono comprese anche delle strategie identiche a quelle di HOMER: la LF si ha per $SOC_{CC} = SOC_{min}$ e $SOC_{setpoint} = SOC_{min}$; la CC si ha per $SOC_{CC} = SOC_{max}$, con $SOC_{setpoint}$ da ottimizzare.

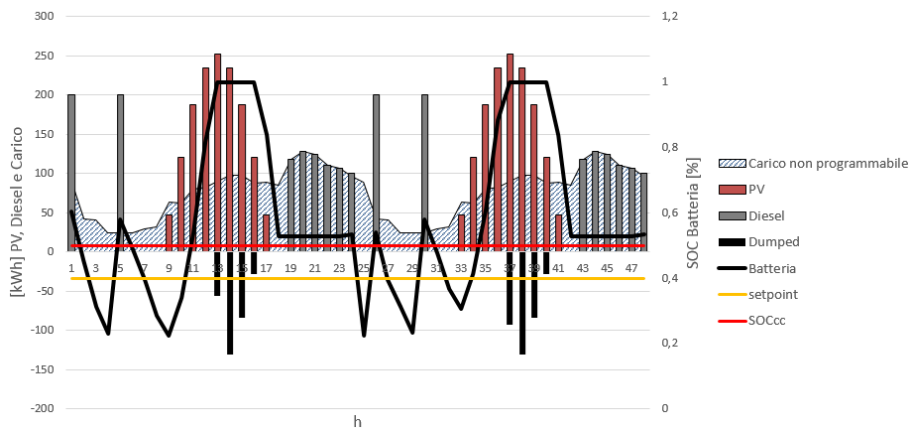


Figura 4.11: In figura si vede come una strategia intermedia riesca a evitare che il diesel carichi la batteria subito prima di un picco di rinnovabili, che la batteria subisca troppi cicli di carica e scarica, che il diesel lavori spesso al minimo carico e che il diesel sia sottoposto a molti start-up. Da confrontare con la figura 4.10 e 4.9

Con generatore a biomassa Nel paragrafo precedente è stata effettuata un'analisi dei costi in $\$/kW_{prodotto}$ dal diesel e dalla batteria in funzione della potenza prodotta e si è giunti alla conclusione che è sempre conveniente scaricare la batteria.

Con l'aggiunta di un generatore a biomassa è necessario effettuare un'ulteriore analisi dei costi, tenendo conto anche del generatore a biomassa.

Il generatore a biomassa che si analizza è il gassificatore abbinato al motore a combustione interna con la curva di rendimento di figura 4.3. Eseguendo l'analisi come nel paragrafo precedente (con i costi del gassificatore calcolati analogamente a quelli del diesel) si ottiene il grafico di figura 4.12.

Esiste un valore di potenza, che dipende dalla taglia del generatore a biomassa, oltre la quale è vantaggioso utilizzare il generatore a biomassa rispetto alla batteria. L'euristica modificata, in presenza di un generatore a biomassa, controlla in ogni time-step se sia più conveniente scaricare la batteria o utilizzare il generatore a biomassa (tenendo conto anche dei costi di start-up di quest'ultimo). Il diesel viene acceso solo quando strettamente necessario per soddisfare il carico, perché costituisce sempre la soluzione meno conveniente.

La presenza di due generatori dispacciabili porta ad avere due SOC_{CC} da ottimizzare, uno relativo al generatore a biomassa e uno relativo al diesel. Poiché la biomassa è poco costosa, ci si aspetta che il SOC_{CC} della biomassa sia alto; al contrario ci si aspetta un SOC_{CC} relativo al diesel basso.

Per concludere, in presenza di un generatore a biomassa, i parametri che definiscono la strategia di dispacciamento (e quindi da ottimizzare) in presenza di un generatore aggiuntivo, sono 3: $SOC_{CC_{diesel}}$, $SOC_{CC_{gassificatore}}$ e $SOC_{setpoint}$.

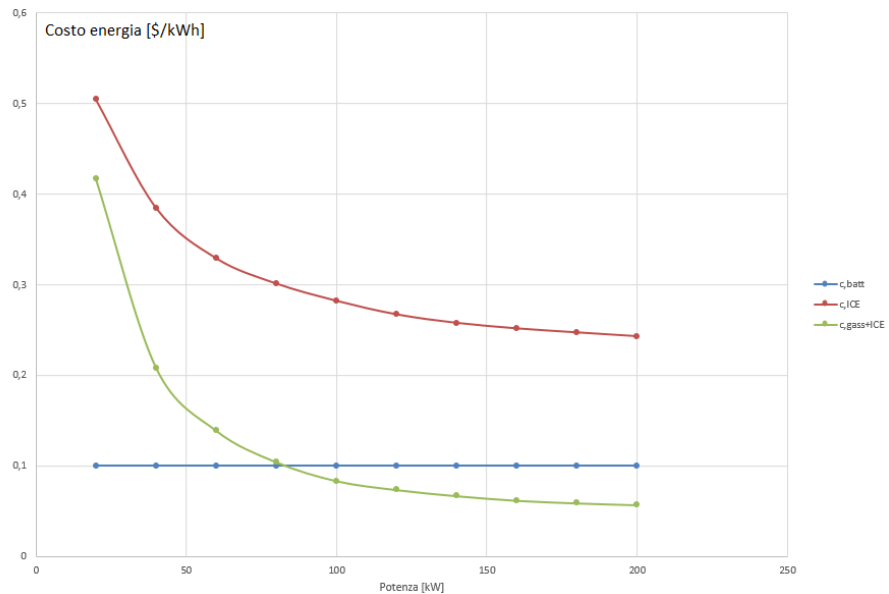


Figura 4.12: Il grafico mostra i costi in $\$/kWh_{prodotta}$ al variare della potenza prodotta, per diesel batteria e gassificatore a biomassa. Si vede come il diesel sia sempre vantaggioso, mentre esiste una potenza (in questo caso 80 kW) oltre la quale risulta conveniente utilizzare il gassificatore. Questa potenza dipende dalla taglia del gassificatore. I costi dei generatori non tengono conto dello startup, che viene aggiunto nell'euristica.

Per trovare la strategia di dispacciamento ottima, si utilizza un approccio euristico, ovvero si fanno variare i tre parametri da ottimizzare dal valore minimo (0) al valore massimo (1) con passo a piacere.

L'aumento di complessità dovuto alla presenza di un generatore dispacciabile aggiuntivo è immediato. Esso porta anche ad un aumento dei tempi computazionali necessari all'ottimizzazione della strategia di dispacciamento. Per migliorare la situazione è possibile non effettuare la simulazione per l'intero anno ma solo per un periodo rappresentativo, analogamente alla strategia MILP.

Ottimizzazione Lo step di ottimizzazione viene effettuato seguendo un approccio euristico, ovvero eseguendo la simulazione per ogni configurazione.

Il risultato fornito dallo step di ottimizzazione è del tipo mostrato in figura 4.13. Come si può vedere, nell'intorno dell'ottimo le taglie dei componenti non hanno una grande influenza sull'LCOE. Questo rende possibile ottenere buoni risultati anche utilizzando una certa discretizzazione nella ricerca dell'ottimo.

Analisi di sensibilità Lo step di analisi di sensibilità viene effettuato in modo euristico, ovvero eseguendo l'ottimizzazione per ogni combinazione di variabili

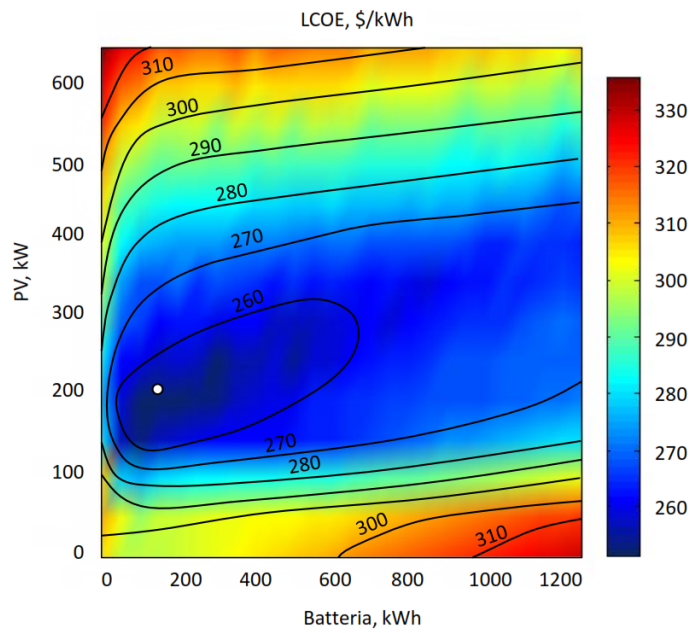


Figura 4.13: Risultato dell'ottimizzazione eseguita con il metodo EM

di sensibilità.

4.3 Test-case

Per verificare la validità della strategia intermedia illustrata nel capitolo precedente, è stato scelto un caso di studio da risolvere utilizzando le tre strategie introdotte.

Il caso di studio è quello considerato nell'articolo [51], che contiene tutti i dati relativi al carico, ai generatori (figura 4.3) e alla disponibilità di fonti rinnovabili, oltre ai risultati delle simulazioni ottenuti con la strategia MILP.

Il caso analizzato nell'articolo oggetto di studio è un villaggio rurale di 2000 abitanti nello stato del Bihar in India.

L'anno viene diviso in tre periodi rappresentativi: la stagione monsonica, con alta temperatura, abbondanti precipitazioni e bassa produzione da solare; l'inverno, con basse temperature, clima secco e media produzione da solare; le stagioni pre-monsoonica e post-monsoonica con alte temperature, basse precipitazioni e il massimo potenziale di produzione da fonte solare.

I dati climatici hanno un'influenza elevata sulla fattibilità dei generatori basati sulle fonti rinnovabili aleatorie.

Poiché il potenziale di produzione da eolico è molto basso, le turbine eoliche non sono state prese in considerazione.

4.3.1 Architettura microgrid

La struttura della micro-grid viene mostrata in figura 4.1.

Essa è costituita da due sottosistemi: il bus in corrente alternata, connesso col generatore diesel e con i carichi, e il bus in corrente continua connesso con la batteria e con i pannelli solari. I due bus comunicano attraverso l'inverter.

Le caratteristiche del generatore diesel e della batteria sono illustrate in figura 4.3 e in figura 4.4. L'inverter e il trasformatore hanno entrambi un'efficienza pari a 94%.

Si analizza poi la possibilità di aggiungere un generatore dispacciabile a biomassa: un gassificatore accoppiato a un motore a combustione interna che operano come una singola unità (perché si ipotizza che il syngas non possa essere stoccato), collegato col bus in corrente alternata, e la cui curva di rendimento è rappresentata in figura 4.3.

4.3.2 Ottimo PV-Diesel-Batterie

Il primo confronto consiste nel trovare la configurazione e la strategia di dispacciamento ottime per un sistema PV-Diesel-Batterie.

Il generatore diesel ha una taglia pari a 200 kW, perché deve essere in grado da solo di coprire il picco di domanda. La taglia del PV è stata fatta variare da 0

a 400 kW e la batteria da 0 a 500 kWh entrambe con un passo discreto di 50 kW.

L'ottimo trovato dalla strategia MILP è costituito da una batteria di 400 kWh e pannelli solari di 250 kW, con un LCOE di 231,1 \$/MWh.

Utilizzando la strategia EM si trova l'ottimo in corrispondenza della stessa configurazione, con una strategia che prevede un $SOC_{CC} = 0,3$ e $SOC_{set\ point} = 0,7$ e con un LCOE pari a 248,6 \$/MWh.

Utilizzando la logica di HOMER, si ottiene che la strategia più vantaggiosa è la LF, che porta ad un ottimo in corrispondenza di una batteria di 300 kWh e di pannelli di 250 kW, con un LCOE pari a 254,8 \$/MWh. La strategia CC (con setpoint ottimizzato che risulta pari a 0,7) risulta sconveniente e porta ad un ottimo ancora più lontano dai precedenti, in corrispondenza di una batteria di 100 kWh e di pannelli solari di 250 kW con un LCOE di 269,3 \$/MWh.

La strategia di HOMER, quindi, trova una batteria ottima diversa rispetto a quella trovata dalle strategie MILP ed EM, mentre tutte le strategie trovano l'ottimo per la stessa taglia di pannelli solari.

Per confrontare l'efficacia delle strategie di gestione è interessante effettuare un confronto a parità di taglie.

Con PV pari a 250 kW e batteria pari a 400 kWh (quindi in corrispondenza dell'ottimo trovato dalle strategie MILP ed EM), la strategia LF(HOMER) ottiene un LCOE di 257,2.

La strategia MILP ottenere un risparmio del 11,3% rispetto alla strategia LF(HOMER) e del 7,5% rispetto all'EM. EM risparmia il 3,5% rispetto a LF(HOMER). (Figura 4.14)

Lo stesso tipo di confronto è stato eseguito per una serie di combinazioni di taglie di batteria e diesel, come mostrato nel grafico in figura 4.15.

La strategia EM ha sempre LCOE intermedi tra la strategia LF (HOMER) e la strategia MILP.

Dai grafici è possibile notare anche come l'LCOE delle strategie MILP e EM abbia lo stesso andamento al variare delle taglie. Le strategie trovano, infatti, l'ottimo in corrispondenza della stessa configurazione. La logica LF, invece, ha un andamento diverso, con un ottimo in corrispondenza di taglie diverse.

Il grafico 4.16 mostra l'andamento dell'LCOE al variare della taglia del PV con batteria fissata in corrispondenza della taglia ottima (400 kWh), per le strategie:

- HOMER Cycle charging con $SOC_{set\ point} = 0,4$;
- HOMER Cycle charging con $SOC_{set\ point} = 0,6$;
- HOMER Cycle charging con $SOC_{set\ point} = 0,8$;

- HOMER Load following;
- Euristica modificata (EM);

Dal grafico 4.16 si possono trarre una serie di conclusioni:

1. almeno per quanto riguarda questo caso di studio, la strategia più conveniente tra quelle di HOMER è sempre la LF;
2. la strategia EM riesce sempre ad ottenere un miglioramento rispetto alla logica LF di HOMER;
3. Gli ottimi delle strategie LF e EM non coincidono.

4.3.3 Ottimo PV-Diesel-Batterie-Gassificatore

Si esegue ora un confronto analogo al precedente, con l'aggiunta di un generatore a biomassa (gassificatore abbinato a un motore a combustione interna).

Il confronto viene eseguito per una serie di combinazioni di taglie di PV, batteria e gassificatore.

I risultati vengono mostrati in figura 4.17 e 4.18.

La strategia adottata da HOMER prevede un funzionamento in CC per il generatore a biomassa e un funzionamento in LF per il diesel.

La strategia EM prevede un $SOC_{CC_{diesel}}$ pari a 0.2, un $SOC_{CC_{gassificatore}}$ pari a 0.5 e un $SOC_{setpoint}$ pari a 0.5.

In questo caso la strategia MILP ottiene miglioramenti più consistenti rispetto alle altre due strategie a causa dell'aumento della complessità del sistema. La strategia EM riesce a ridurre i costi rispetto alla strategia di HOMER, ma il miglioramento non è evidente come nel caso precedente.

Questo conferma che le strategie euristiche sono strumenti validi per sistemi non troppo complessi, ovvero con il minor numero possibile di generatori dispacciabili, mentre la strategia MILP diventa sempre più interessante all'aumentare della complessità del sistema. La logica EM risulta comunque più affidabile nella ricerca dell'ottimo, che coincide con quello della logica MILP, a differenza di quello di HOMER che si discosta.

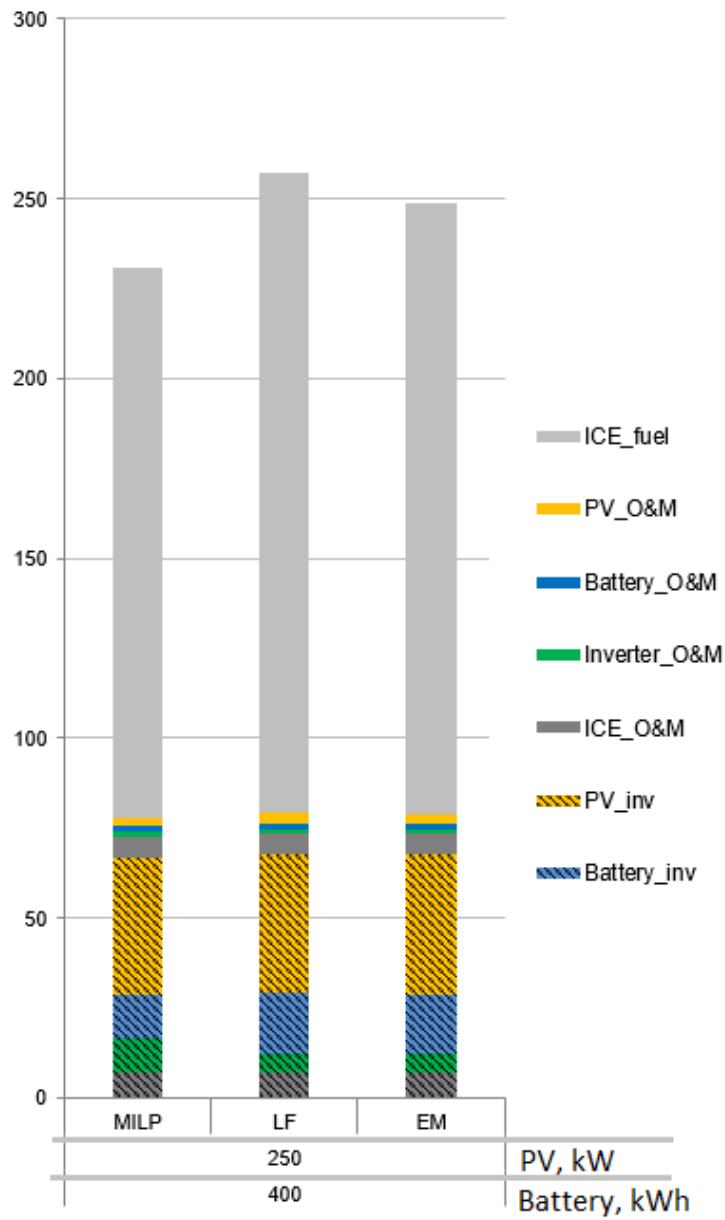
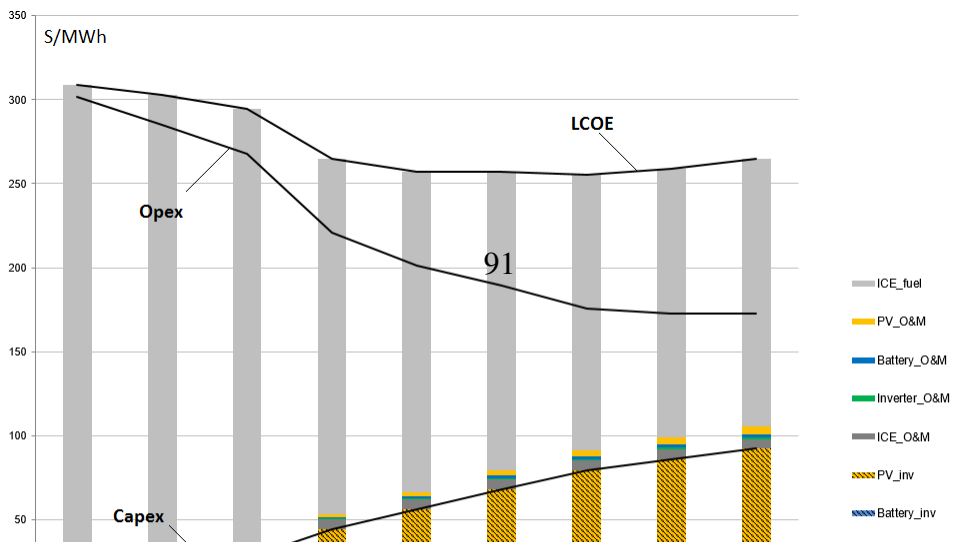
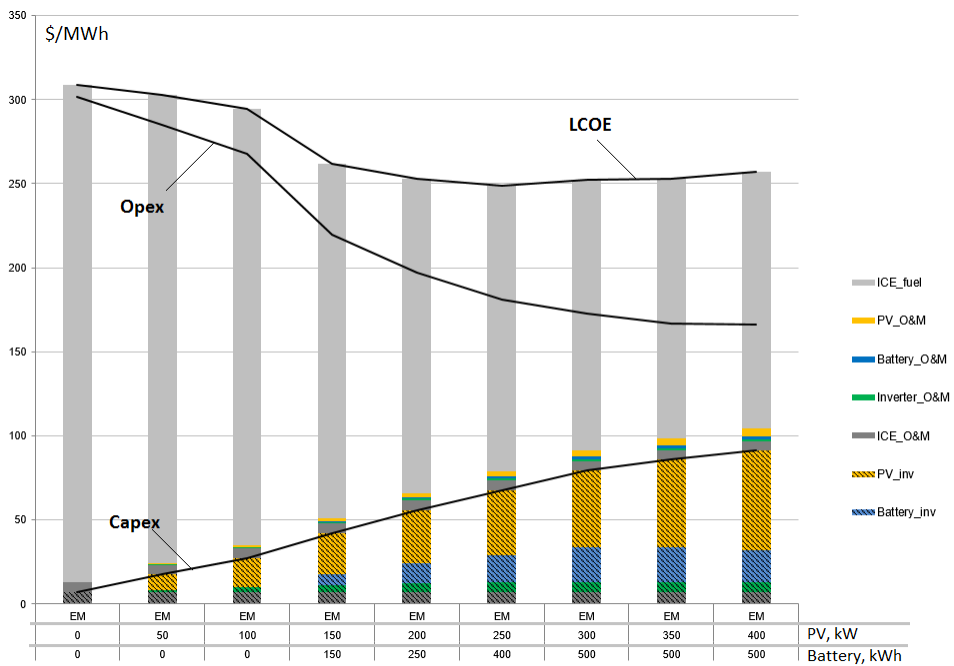
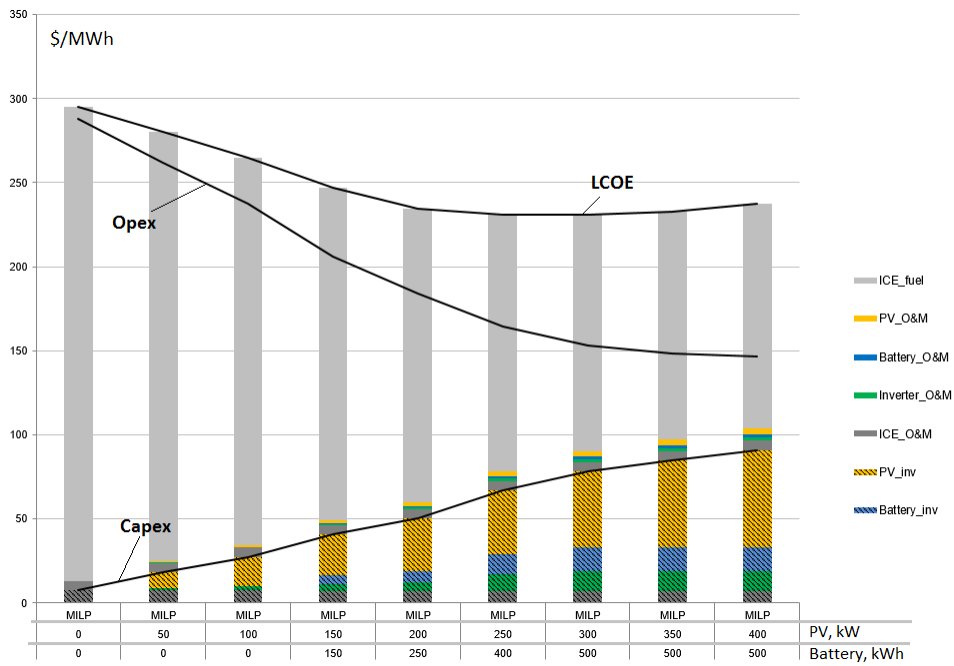


Figura 4.14: Confronto delle strategie di dispacciamento (MILP, LF e euristica modificata), in corrispondenza del'ottimo trovato dalla strategia MILP e EM



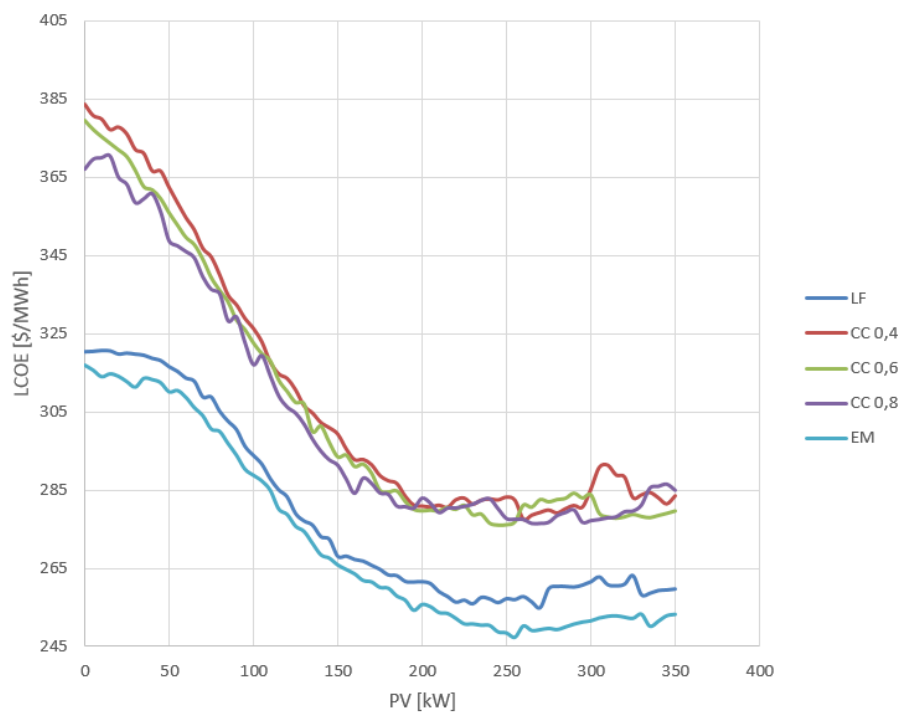


Figura 4.16: Confronto tra le strategie HOMER e EM con taglia della batteria fissata: il grafico mostra come varia l'LCOE per una taglia della batteria fissata (pari alla taglia ottima, 400 kWh), al variare della taglia del PV, per le strategie CC 0,4, CC 0,6, CC 0,8, LF, EM.

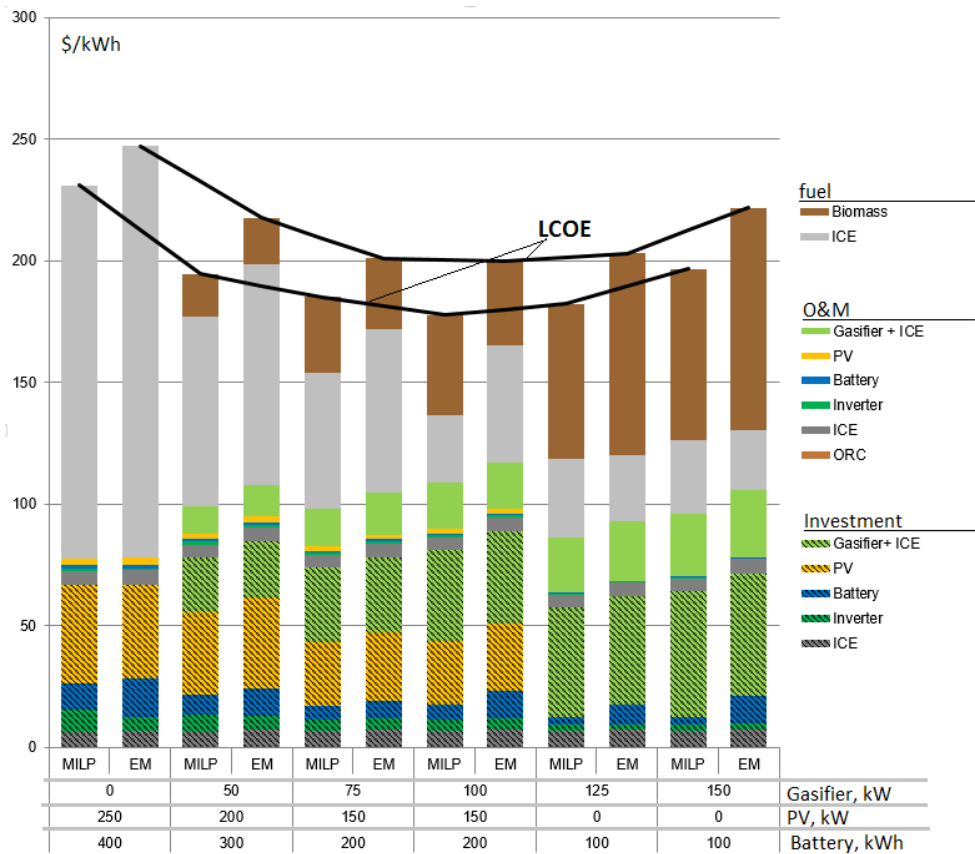


Figura 4.17: Il grafico mostra il confronto fra la strategia MILP e la strategia EM in presenza di un gassificatore a biomassa abbinato a un motore a combustione interna. L'andamento dell'LCOE è lo stesso, con l'ottimo coincidente ma con prestazioni peggiori per l'EM.

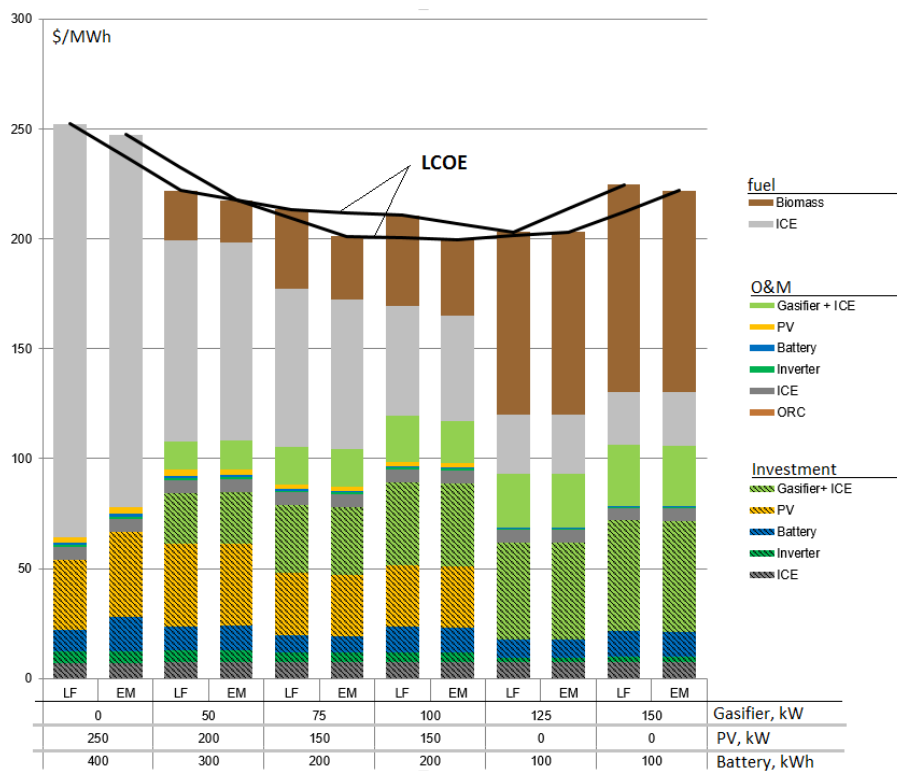


Figura 4.18: Il grafico mostra il confronto fra la strategia LF e la strategia EM in presenza di un gassificatore a biomassa abbinato a un motore a combustione interna. Le due strategie ottengono due ottimi diversi. L'LCOE della strategia EM è sempre minore rispetto a quello della strategia LF.

Capitolo 5

Casi di studio

Si vuole ora effettuare una serie di analisi di sensibilità per capire l'influenza che alcune variabili esterne hanno sul dimensionamento ottimo di una minirete e per verificare ulteriormente il funzionamento della strategia EM illustrata nel capitolo 4.2.3.

Si cercherà di rendere le conclusioni derivanti dalle analisi di sensibilità il più generali possibili, in modo che questa discussione possa costituire anche una linea guida in casi reali.

Si esegue quindi il dimensionamento della minirete per una serie di villaggi realistici, il cui carico viene stimato utilizzando il programma descritto nel capitolo 2, per testare la validità delle conclusioni derivanti dall'analisi di sensibilità.

5.1 Analisi di sensibilità

L'analisi di sensibilità si esegue prendendo come punto di partenza il primo caso di studio illustrato nel capitolo 5.2, e modificando alcune variabili esterne.

5.1.1 Costo della biomassa

Il costo della biomassa derivante dai residui che sono disponibili nell'area di cui ci si occupa, è stato calcolato come spiegato nel capitolo 3.3.

Nelle analisi precedenti è stato ipotizzato di poter utilizzare solo la biomassa disponibile nell'area di interesse. In realtà è possibile allontanarsi dalla zona in cui ci si trova e recuperare della biomassa aggiuntiva. Tuttavia questo comporta

- l'aumento dei costi di trasporto
- la possibilità di privare le comunità circostanti di un bene necessario. Per tener conto di questo fattore si associa un costo aggiuntivo alla biomassa derivante dall'area circostante.

Per tener conto di questi due effetti si utilizza un costo della biomassa che dipende dalla quantità complessivamente utilizzata.

Finchè i residui derivano dall'area di interesse, in cui il costo di trasporto è trascurabile, si considera un costo della biomassa costante. Quando si supera la quantità di biomassa disponibile nell'area di competenza, il costo della biomassa aumenta.

Si vuole ora analizzare l'effetto che ha il costo della biomassa aggiuntiva sulla taglia ottima del gassificatore. Si esegue quindi un'analisi di sensibilità sulla pendenza della curva dei costi della biomassa. In figura 5.1 si vedono le diverse curve che sono state utilizzate nell'analisi.

I risultati dell'analisi sono illustrati in figura 5.4. Al diminuire della pendenza della curva dei costi, aumenta la taglia ottima del gassificatore, diminuiscono le taglie del PV e della batteria e diminuisce l'LCOE in modo molto marcato.

Anche la percentuale di energia prodotta da fonti rinnovabili aumenta sensibilmente, e diminuisce l'energia dissipata.

Questi andamenti sono dovuti all'introduzione di una fonte rinnovabile dispacciabile e poco costosa. L'analisi conferma quindi l'importanza e la convenienza dell'utilizzo della biomassa come fonte rinnovabile dispacciabile.

Analizzando più nel dettaglio il caso con pendenza nulla, ovvero con costo della biomassa costante, si vede che la taglia ottima del gassificatore è pari a 80 kW, e la biomassa consumata pari a 31153 tonnellate, da confrontare con le 8437 tonnellate disponibili nell'area di interesse. Questo equivale ad un'area di 12 km², ovvero un'area circa tripla rispetto all'area di competenza, con un

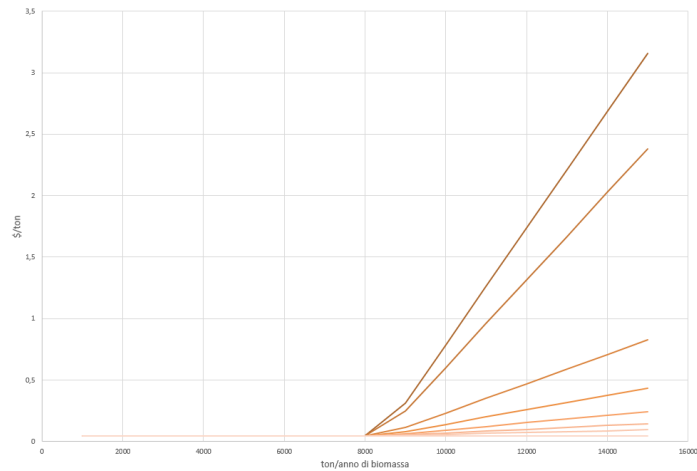


Figura 5.1: Il grafico rappresenta le diverse curve di costo della biomassa che sono state usate nell'analisi di sensibilità

raggio circa doppio. L'ipotesi che i costi non aumentino in modo sostanziale se si utilizzano anche i residui presenti in questa area risulta quindi accettabile.

5.1.2 Densità di popolazione

Si esegue un'analisi di sensibilità per analizzare l'effetto del cambiamento della densità di popolazione sul risultato dell'ottimizzazione e sul comportamento della minirete.

Al variare della densità di popolazione si hanno due effetti:

- in primo luogo, mantenendo costante il rapporto tra area coltivata e area totale, varia il rapporto tra la popolazione e l'area coltivata. Al variare di questo rapporto si hanno i seguenti effetti:

- All'aumentare del rapporto tra popolazione e area coltivata, aumenta il rapporto tra carico non programmabile e programmabile. Infatti il carico non programmabile è proporzionale alla popolazione, mentre il carico programmabile è legato all'area coltivata.

Il rapporto varia con un andamento non esattamente lineare a causa del carico non programmabile legato agli usi produttivi, e quindi all'area coltivata, e al carico programmabile legato all'acqua potabile, che dipende dalla popolazione. Questi effetti sono trascurabili rispetto a quelli precedentemente descritti, quindi l'aumentare del rapporto tra carico non programmabile e programmabile è evidentemente crescente con la densità di popolazione, come mostrato in figura 5.2.

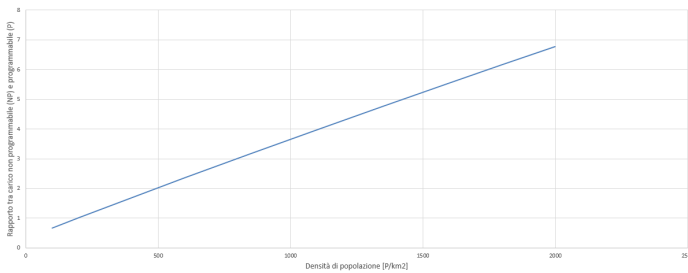


Figura 5.2: Andamento del rapporto tra carico non programmabile e programmabile al variare della densità di popolazione

L'aumento del carico programmabile rispetto al carico non programmabile, ha benefici sull'LCOE e sulla possibilità di utilizzare fonti rinnovabili.

Poiché il serbatoio legato al carico non programmabile ha dimensioni che dipendono dall'entità del carico stesso, all'aumentare del carico programmabile aumenta la dimensione del serbatoio. Avere un sistema di accumulo più grande rende possibile aumentare la potenza prodotta da fonti rinnovabili e diminuire la potenza dissipata.

- All'aumentare del rapporto tra popolazione e area coltivata, aumenta anche la disponibilità di biomassa da residui agricoli.

Per densità di popolazione molto basse, infatti, la configurazione ottima contiene un gassificatore a biomassa.

- in secondo luogo, mantenendo costante il rapporto tra area occupata da foreste e area totale, varia il rapporto tra la popolazione e l'area occupata da foreste. Al variare di questo rapporto aumenta la disponibilità di biomassa legnosa, e quindi la taglia del generatore a biomassa ottimo.

In particolare, a partire da densità di popolazione molto basse, la taglia del gassificatore diminuisce fino alla densità di 1350 abitanti per km^2 dove diventa sconveniente adottare un generatore a biomassa.

L'analisi viene effettuata per due diversi scenari:

- Nel primo scenario si ipotizza di non utilizzare la biomassa disponibile dalle foreste ma solo quella derivante dai residui agricoli
- Nel secondo scenario si ipotizza di avere a disposizione sia la biomassa derivante dai residui agricoli, sia quella legata alle foreste.

Le taglie del generatore a biomassa ottimo sono ovviamente maggiori in questo scenario, e la presenza del gassificatore nella configurazione ottima rimane fino a densità di popolazione maggiori.

Le taglie dei generatori alimentati dalle altre fonti rinnovabili sono invece minori, proprio grazie alla maggior quantità di energia prodotta dal gassificatore.

Per questa analisi si ipotizza di avere a disposizione solo la biomassa presente nella zona di interesse, ovvero si utilizza la curva in figura 5.1 di pendenza infinita. Se si utilizzasse una pendenza minore, le conclusioni dell'analisi sarebbero le stesse, con taglie del gassificatore maggiori e con la presenza del gassificatore fino a densità di popolazione maggiori.

Di seguito si illustrano più nel dettaglio i risultati dell'analisi.

L'analisi è stata effettuata variando la densità di popolazione e mantenendo costante la domanda totale di energia, in modo tale che le taglie dei componenti siano confrontabili.

E' evidente come un elevato carico programmabile e la disponibilità di biomassa da residui forestali portino ad avere benefici per quanto riguarda l'LCOE e la percentuale di potenza derivante da fonti rinnovabili.

In figura 5.5 si vede che all'aumentare della densità di popolazione, le taglie di PV e batteria diminuiscono, perché la presenza di un serbatoio di dimensioni minori penalizza la produzione di potenza da fonti rinnovabili. Il gassificatore è presente solo per una densità di popolazione pari a 100 abitanti per km^2 , ed è di dimensioni molto ridotte. In figura 5.5 si vede l'influenza sull'LCOE: il costo dell'energia prodotta aumenta all'aumentare della densità di popolazione, ma non in modo sostanziale.

Se si considera anche la presenza della biomassa forestale (figura 5.6), si nota la presenza di un trend diverso per basse densità di popolazione: all'aumentare della densità di popolazione diminuisce la taglia del gassificatore perché diminuisce la disponibilità della risorsa, e quindi aumenta la taglia di PV e batteria fino al punto in cui il serbatoio del carico secondario non raggiunge dimensioni troppo piccole, penalizzando la produzione da fonti rinnovabili. L'LCOE in questo caso diminuisce in modo molto drastico al diminuire della densità di popolazione, grazie alla presenza della biomassa.

Si nota inoltre come, all'aumentare della disponibilità di biomassa, la strategia di dispacciamento per il gassificatore tenda ad avere un SOC_{CC} sempre più alto, ovvero ad essere sempre più simile a una strategia CC.

I due scenari coincidono dopo una densità di 1350 abitanti/ km^2 , ovvero da quando il gassificatore non è più conveniente nemmeno nello scenario in cui si considera la presenza delle foreste.

5.1.3 Velocità del vento

Il caso base è caratterizzato da una velocità media annuale di 3,25 m/s. In questo caso non è vantaggiosa la presenza di una turbina eolica tra i generatori della minirete. Si esegue un'analisi di sensibilità sulla velocità del vento, per capire il minimo valore di velocità media annuale in cui è conveniente aggiungere le turbine eoliche e per capire quanto questo può essere vantaggioso in termini di LCOE. L'analisi viene effettuata per il primo scenario illustrato nel capitolo 5.1.2, ovvero in caso di assenza di residui forestali.

Risulta conveniente aggiungere una turbina eolica per una velocità media maggiore di 7 m/s. All'aumentare della velocità si vede come non sia più conveniente utilizzare pannelli solari, e come l'LCOE diminuisca drasticamente, con una diminuzione dei costi variabili e un aumento dei costi di investimento. L'aumento repentino della taglia della turbina all'aumentare della velocità del vento media è dovuto al profilo di velocità del vento giornaliero nella località analizzata, mostrato in figura 5.3. Un profilo più variabile darà luogo ad un andamento più graduale delle taglie della turbina e dell'energia prodotta da eolico.

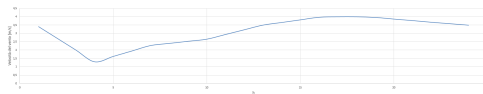


Figura 5.3: Profilo orario della velocità del vento nella località di interesse

5.1.4 Rapporto tra area coltivata e area forestale

L'ultima analisi di sensibilità effettuata riguarda il rapporto tra l'area coltivata e l'area occupata da foreste.

Questa analisi mette insieme l'effetto dovuto al cambiamento del rapporto tra carico programmabile e non, e l'effetto del cambiamento di disponibilità dei residui forestali e agricoli.

Anche questa analisi viene effettuata a pari carico totale.

La figura 5.8 mostra come la disponibilità di biomassa proveniente da residui forestali sia più vantaggiosa rispetto alla presenza di un carico programmabile elevato.

Si nota inoltre come, all'aumentare della disponibilità di biomassa, la strategia di dispacciamento per il gassificatore tenda ad avere un SOC_{CC} sempre più alto, ovvero ad essere sempre più simile a una strategia CC.

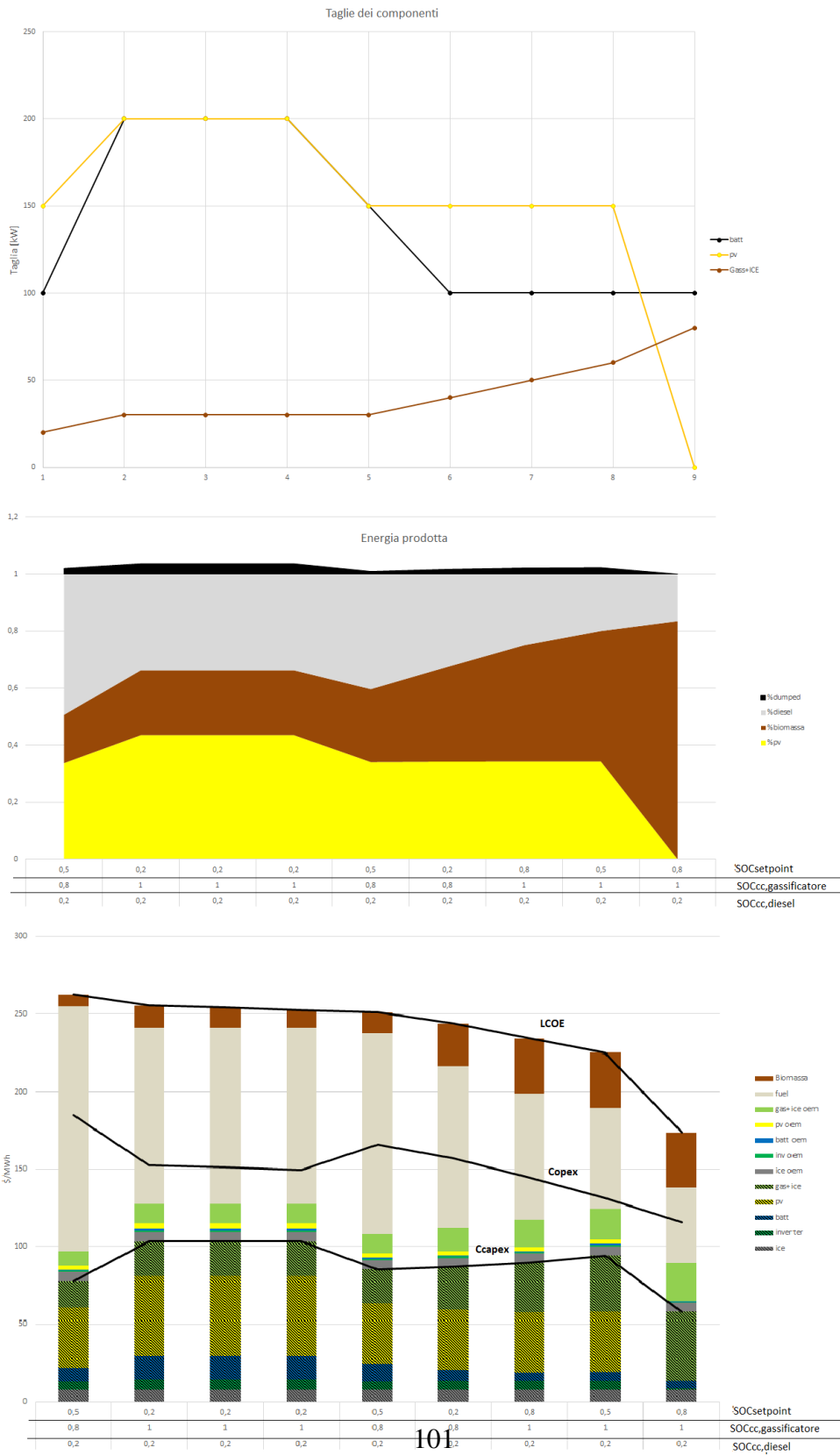


Figura 5.4: Analisi di sensibilità sul costo della biomassa

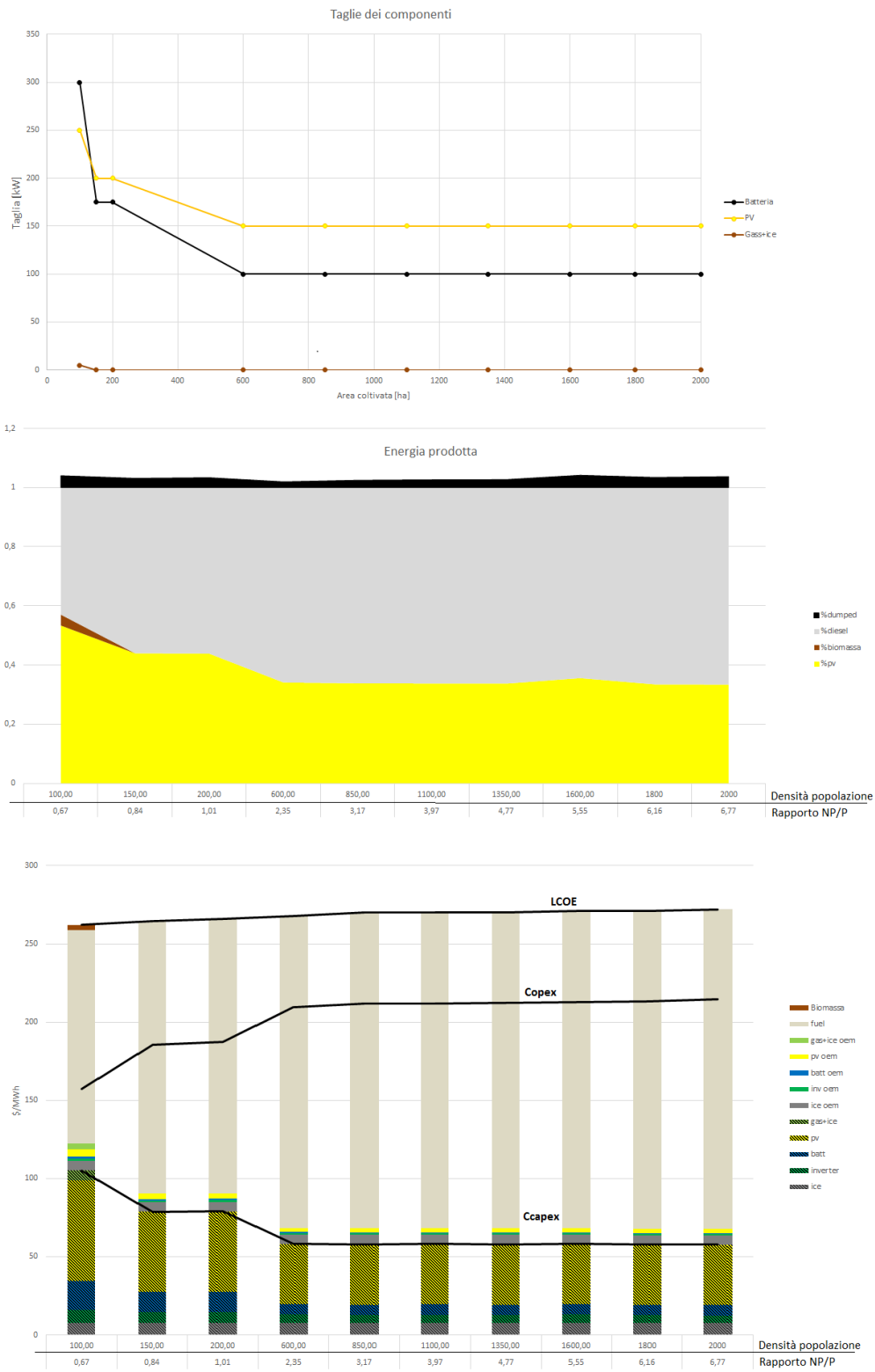
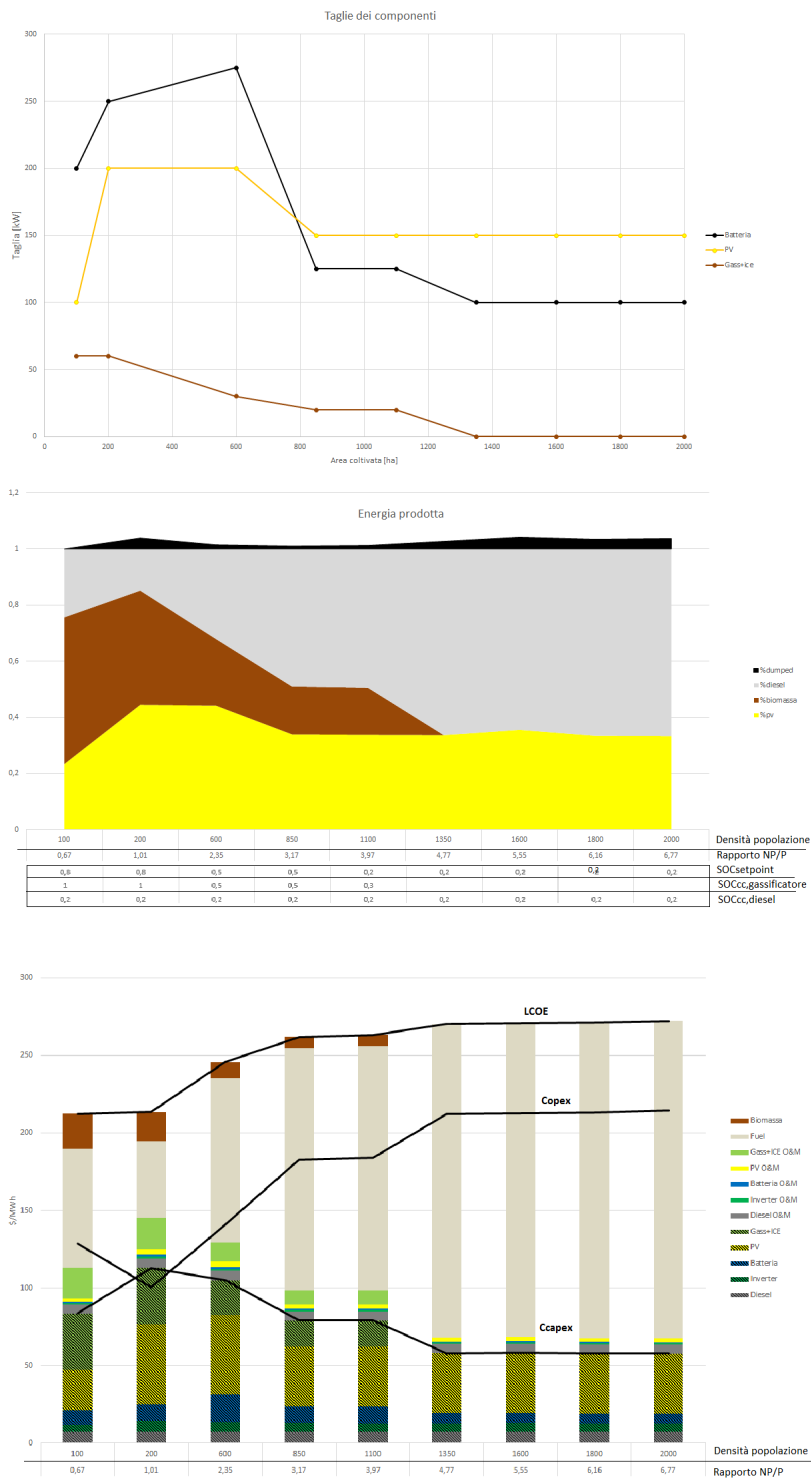


Figura 5.5: Analisi di sensibilità sulla densità di popolazione, senza foreste



103

Figura 5.6: Analisi di sensibilità sulla densità di popolazione, con foreste



104
 Figura 5.7: Analisi di sensibilità sulla velocità del vento

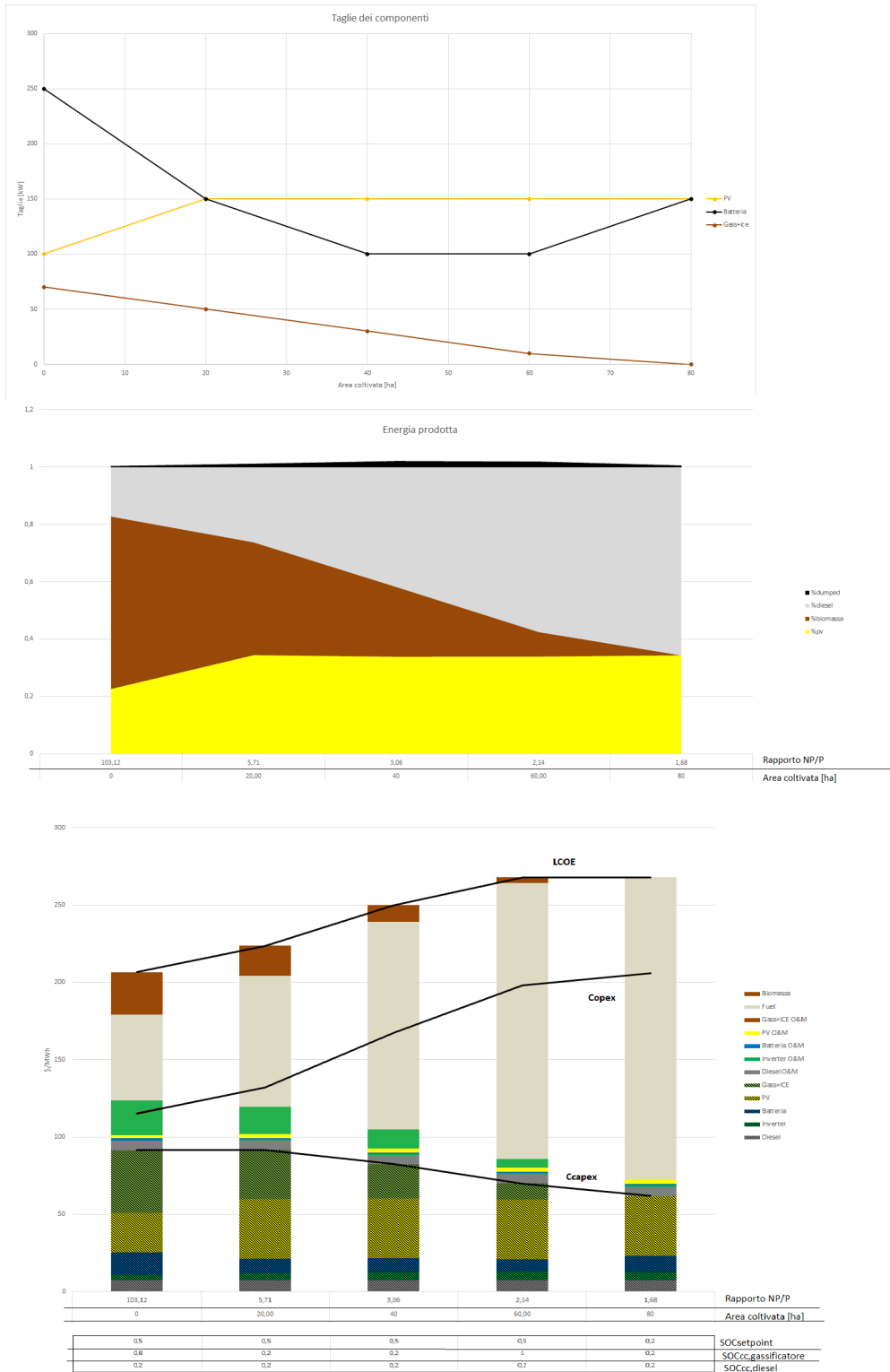


Figura 5.8: Analisi di sensibilità sul rapporto tra area coltivata e forestale

5.2 Dimensionamento per tre casi realistici

Si vuole ora eseguire il dimensionamento della minirete per tre villaggi realistici che si trovano in India, in zone con basso tasso di elettrificazione (figura 5.9).

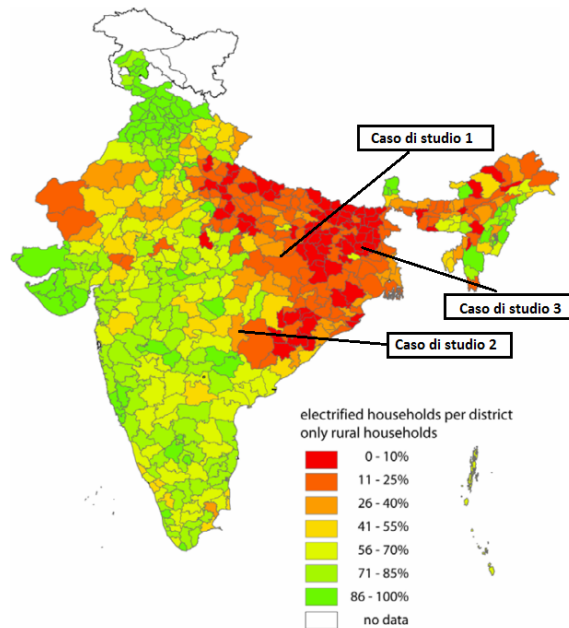


Figura 5.9: In figura si vede il tasso di elettrificazione rurale in India, e la scelta dei tre casi di studio [46]

5.2.1 Primo caso di studio

Il primo villaggio si trova ad una latitudine di $23,73^{\circ}\text{N}$ e ad una longitudine di $82,02^{\circ}\text{E}$.

In tabella 5.1 si riassumono le caratteristiche del villaggio.

In figura 5.10 si mostra l'andamento orario del carico non programmabile, e in figura 5.11 il carico annuale diviso in carico programmabile e non programmabile.

Il villaggio è caratterizzato da un equilibrio tra area coltivata e area occupata da foreste, ed ha una bassa velocità del vento e una bassa densità di popolazione.

In tabella 5.2 si mostrano i risultati dell'ottimizzazione.

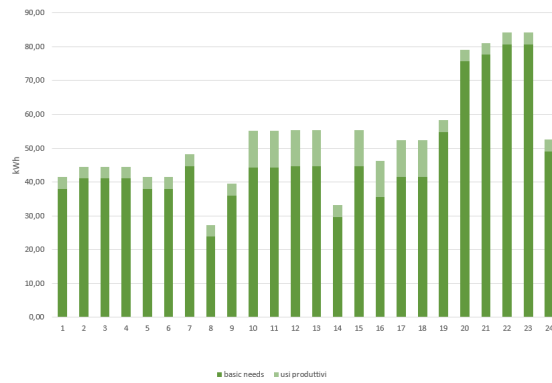


Figura 5.10: Carico non programmabile del primo caso di studio

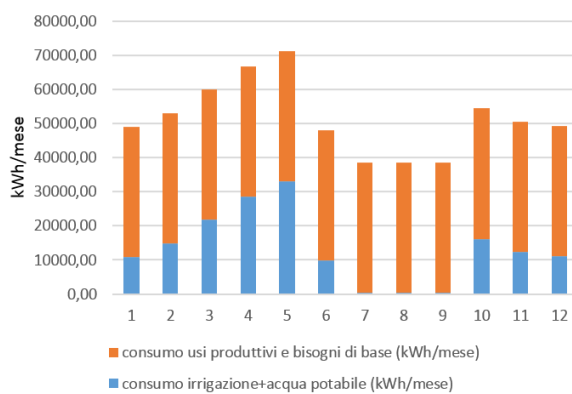


Figura 5.11: Carico annuale totale del primo caso di studio

densità popolazione [P/km ²]	759
ettari coltivati (ha/km ²)	44
ettari di foresta (ha/km ²)	46,00
velocità media del vento annuale [m/s]	3,25
Radiazione globale media annuale [kWh/m ² /giorno]	4,72

Tabella 5.1: Caratteristiche del primo caso di studio. La radiazione solare si riferisce a pannelli inclinati dell'angolo ottimo, pari a 23°

5.2.2 Secondo caso di studio

Il secondo caso di studio è un villaggio che si trova alla latitudine di 19,22°N e alla longitudine di 78,89°E.

In tabella 5.3 si riassumono le caratteristiche del villaggio.

In figura 5.12 si mostra l'andamento orario del carico non programmabile, e in figura 5.13 il carico annuale diviso in carico programmabile e non programmabile.

Il villaggio è caratterizzato da poca area irrigata, infatti si nota in figura 5.13 la prevalenza del carico non programmabile rispetto a quello programmabile, e da molta area occupata da foreste. Ha una bassa velocità del vento e una densità di popolazione piuttosto elevata.

In tabella 5.4 si mostrano i risultati dell'ottimizzazione. La quasi mancanza di un carico programmabile si riflette sulle dimensioni della batteria, che sono maggiori rispetto al primo caso di studio. Inoltre, nonostante l'aumento della disponibilità di biomassa, la taglia del gassificatore rimane costante, a causa dell'aumento della densità di popolazione.

Taglie		
Diesel	kW	150
Batteria	kWh	100
PV	kW	150
Inverter	kWh	144
WT	kW	0
Gass+ICE	kW	20

LCOE	\$/MWh	262,9213
Diesel	\$/MWh	7,5
Inverter	\$/MWh	5,5
Batteria	\$/MWh	9,0
PV	\$/MWh	38,6
Gass+ICE	\$/MWh	16,8
WT	\$/MWh	0,0
Diesel O&M	\$/MWh	6,0
Inverter O&M	\$/MWh	0,9
Batteria O&M	\$/MWh	0,6
PV O&M	\$/MWh	2,7
Gass+ICE O&M	\$/MWh	9,3
WT O&M	\$/MWh	0,0
Fuel	\$/MWh	158,6
Biomassa	\$/MWh	7,4

Energia prodotta		
PV	%	0,337
WT	%	0,000
Diesel	%	0,493
Dumped	%	0,019
Biomassa	%	0,169

Tabella 5.2: La tabella contiene i valori di taglie, LCOE e energia prodotta dai vari componenti per il primo caso di studio.

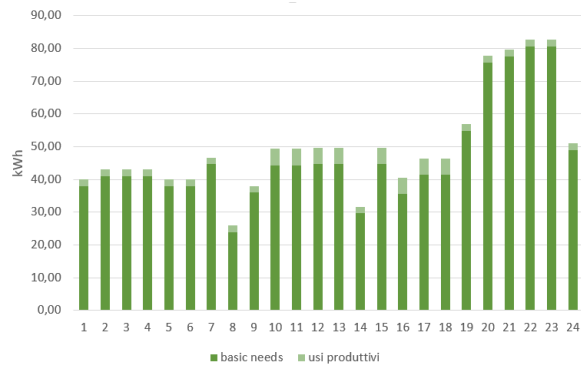


Figura 5.12: Carico non programmabile del secondo caso di studio

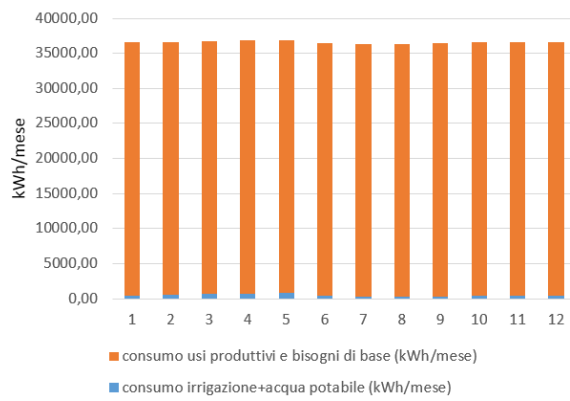


Figura 5.13: Carico annuale totale del secondo caso di studio

densità popolazione [P/km2]	1406
ettari coltivati (ha/km2)	0,83
ettari di foresta (ha/km2)	94,88871
velocità media del vento annuale [m/s]	3,11
Radiazione globale media annuale [kWh/m2/giorno]	5,46

Tabella 5.3: Caratteristiche del secondo caso di studio. La radiazione solare si riferisce a pannelli inclinati dell'angolo ottimo, pari a 19°.

5.2.3 Terzo caso di studio

Il terzo caso di studio è un villaggio che si trova alla latitudine di 24,61°N e alla longitudine di 87,71°E.

In tabella 5.5 si riassumono le caratteristiche del villaggio.

In figura 5.14 si mostra l'andamento orario del carico non programmabile, e in figura 5.15 il carico annuale diviso in carico programmabile e non programmabile.

Il villaggio è caratterizzato da molta area irrigata, infatti si nota in figura 5.15 la prevalenza del carico programmabile rispetto a quello non programmabile, e da poca area occupata da foreste. Ha una velocità del vento più alta rispetto ai casi precedenti e una densità di popolazione molto bassa, che rende ancora maggiore il rapporto tra il carico programmabile e quello non programmabile.

In tabella 5.6 si mostrano i risultati dell'ottimizzazione. La presenza di un elevato carico programmabile si riflette sull'elevata percentuale di energia da fonti rinnovabili e sul basso LCOE. La velocità del vento non è abbastanza elevata da rendere vantaggiosa la presenza di una turbina eolica, e i residui agricoli non sono sufficienti a rendere conveniente l'utilizzo di un gassificatore, nonostante l'elevata area coltivata e la bassa densità di popolazione.

Taglie		
Diesel	kW	150
Batteria	kWh	200
PV	kW	100
Inverter	kWh	90
WT	kW	0
Gass+ICE	kW	20

LCOE	\$/MWh	295,3262
Diesel	\$/MWh	10,5
Inverter	\$/MWh	5,1
Batteria	\$/MWh	28,1
PV	\$/MWh	36,2
Gass+ICE	\$/MWh	23,7
WT	\$/MWh	0,0
Diesel O&M	\$/MWh	8,4
Inverter O&M	\$/MWh	0,8
Batteria O&M	\$/MWh	1,6
PV O&M	\$/MWh	2,5
Gass+ICE O&M	\$/MWh	13,1
WT O&M	\$/MWh	0,0
Fuel	\$/MWh	157,5
Biomassa	\$/MWh	7,8

Energia prodotta		
PV	%	0,344
WT	%	0,000
Diesel	%	0,428
Dumped	%	0,014
Biomassa	%	0,228

Tabella 5.4: La tabella contiene i valori di taglie, LCOE e energia prodotta dai vari componenti per il secondo caso di studio.

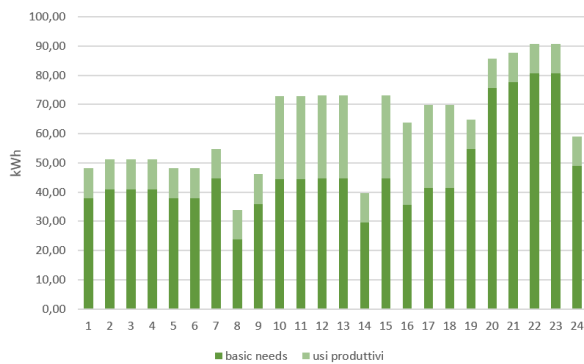


Figura 5.14: Carico non programmabile del terzo caso di studio

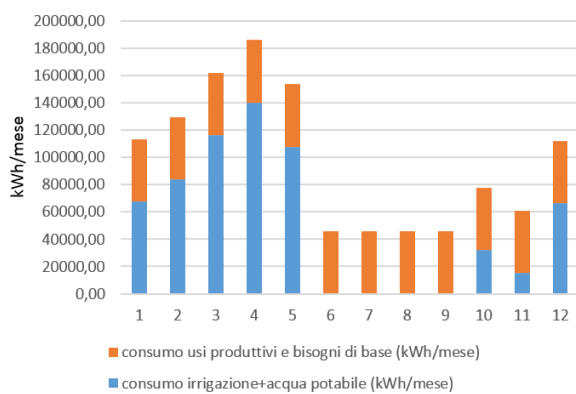


Figura 5.15: Carico annuale totale del terzo caso di studio

densità popolazione [P/km2]	250
ettari coltivati (ha/km2)	85
ettari di foresta (ha/km2)	1,42
velocità media del vento annuale [m/s]	5,98
Radiazione globale media annuale [kWh/m2/giorno]	5,45

Tabella 5.5: Caratteristiche del terzo caso di studio. La radiazione solare si riferisce a pannelli inclinati dell'angolo ottimo, pari a 19°.

Taglie		
Diesel	kW	150
Batteria	kWh	100
PV	kW	350
Inverter	kWh	410
WT	kW	0
Gass+ICE	kW	0

LCOE	\$/MWh	216,0953
Diesel	\$/MWh	3,9
Inverter	\$/MWh	7,4
Batteria	\$/MWh	2,5
PV	\$/MWh	47,3
Gass+ICE	\$/MWh	0,0
WT	\$/MWh	0,0
Diesel O&M	\$/MWh	3,1
Inverter O&M	\$/MWh	1,2
Batteria O&M	\$/MWh	0,3
PV O&M	\$/MWh	3,3
Gass+ICE O&M	\$/MWh	
WT O&M	\$/MWh	0,0
Fuel	\$/MWh	147,1
Biomassa	\$/MWh	0,0

Energia prodotta		
PV	%	0,462
WT	%	0,000
Diesel	%	0,538
Dumped	%	0,081
Biomassa	%	0,000

Tabella 5.6: La tabella contiene i valori di taglie, LCOE e energia prodotta dai vari componenti per il terzo caso di studio.

Conclusioni

Nel presente lavoro è stato sviluppato un programma che, a partire da una serie di dataset globali, è in grado di calcolare una stima accurata della domanda di energia in contesti rurali in paesi in via di sviluppo, e la disponibilità di risorse nel luogo di interesse.

E' stata ideata, inoltre, una strategia euristica in grado di simulare il comportamento di una minirete e di ottimizzare le taglie dei componenti che la compongono. Questa strategia è stata testata confrontandola con due metodologie esistenti: la strategia utilizzata da HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) e la metodologia presentata negli articoli [53], [52] e [51]. La strategia sviluppata nel presente lavoro ottiene risultati intermedi tra le due precedenti, rivelandosi un metodo valido per il dimensionamento di minireti ibride isolate.

Infine, è stata eseguita un'analisi di sensibilità, utilizzando per il dimensionamento la strategia euristica elaborata e come dati in input quelli calcolati dal programma precedentemente descritto. L'analisi ha dimostrato l'importanza dell'utilizzo della biomassa come fonte energetica in questi contesti, legata alla dispacciabilità della fonte e alla capacità di ridurre sensibilmente i costi dell'energia prodotta.

Bibliografia

- [1] a.a. El-Sebaili, F.S. Al-Hazmi, a.a. Al-Ghamdi, and S.J. Yaghmour. Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia. *Applied Energy*, 87(2):568–576, 2010.
- [2] Hafzullah Aksoy, Z Fuat Toprak, Ali Aytok, and N Erdem Ünal. Stochastic generation of hourly mean wind speed data. *Renewable Energy*, 29(14):2111–2131, 2004.
- [3] Kari Alanne and Arto Saari. Distributed energy generation and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(6):539–558, 2006.
- [4] RG Allen, LS Pereira, D Raes, and M Smith. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. 1998.
- [5] Alliance for Rural Electrification. Hybrid Mini-Grids for Rural Electrification: Lessons Learned. 2011.
- [6] a.M. MacDonald, H.C. Bonsor, B.E. Ó Dochartaigh, and R.G. Taylor. Quantitative maps of groundwater resources in Africa. 024009, 2012.
- [7] Peter Asmus and Mackinnon Lawrence. Executive Summary: Microgrid Deployment Tracker 2Q15. 2015.
- [8] Jessica Bagnoli and Corine N. Businge. Gestione ottimizzata di una micro-rete ibrida isolata a servizio di villaggi rurali, 2015.
- [9] a Barbati, P Corona, M V Chiriaco, and L Portoghesi. Indici di produttività boschiva, rilievo indici di relazione tra produzioni forestali e biomassa residuale associata, analisi del mercato della biomassa forestale in Italia. 2009.
- [10] R S Bello, T A Adegbulugbe, and M A Onilude. Characterization of Three Conventional Cookstoves in South Eastern Nigeria. 17(2):122–129, 2015.

- [11] C Brouwer and M Heibloem. Irrigation water management: irrigation water needs. 1986.
- [12] C Brouwer and JPM Hoevenaars. Irrigation Water Management Training Manual no. 6-Scheme Irrigation Water Needs and Supply. 1992.
- [13] C Brouwer, K Prins, and M Heibloem. Irrigation water management: irrigation scheduling. 1989.
- [14] Roland Brouwer and Mário Paulo Falcão. Wood fuel consumption in Maputo, Mozambique. *Biomass and Bioenergy*, 27(3):233–245, 2004.
- [15] Sarah C. Brechbill, Wallace E. Tyner, and Klein E. Ileleji. The Economics of Biomass collection and transportation and its supply to indiana cellulosic and electric utility facilities. 2011.
- [16] Ali Naci Celik. Energy output estimation for small-scale wind power generators using Weibull-representative wind data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(5):693–707, 2003.
- [17] Central Ground Water Board. Ground Water Scenario in Major Cities of India, August 2013. 2011.
- [18] Central Ground Water Board. Ground Water Scenario in Major Cities of India, January 2014. 2011.
- [19] Central Ground Water Board. Ground Water Scenario in Major Cities of India, November 2014. 2011.
- [20] Central Ground Water Board. Ground Water Scenario in Major Cities of India, premonsoon 2014. 2011.
- [21] Xiaoguang Chen. Assessment of the Potential Biomass Supply from Crop Residues in China. (April), 2015.
- [22] Emanuela Colombo, Stefano Bologna, and Diego Masera. *Renewable Energy for Unleashing Sustainable Development*, volume 23. 2013.
- [23] Columbia University and Centro Internacional de Agricultura Tropical. Center for International Earth Science Information Network (CIESIN).
- [24] EPA combined heat and power partnership. Biomass CHP Catalog. *EPA CHP Partnership*, pages 11–20, 2004.
- [25] Paul Cook. Infrastructure, rural electrification and development. *Energy for Sustainable Development*, 15(3):304–313, 2011.

- [26] Larry M. Curtis and Ted W. Tyson. Energy requirements: the drip irrigation system. *Agriculture & natural resources Agricultural Engineering*, pages 515–516.
- [27] N.G. Dastane. Effective rainfall in irrigated agriculture, 1978.
- [28] Jan Dauve and Silvio J. Flaim. Agricultural Crop Residue Collection Costs. *The effects of brief mindfulness intervention on acute pain experience: An examination of individual difference*, 1, 2015.
- [29] J. Dixon, A. Gulliver, and D. Gibbon. *Farming Systems and Poverty*. 2001.
- [30] F3centre. Residues from the forest - www.f3centre.se. (1):3–4, 2014.
- [31] FAO. *The State of Food and Agriculture*, volume 34. 1970.
- [32] FAO. *Agriculture, food and water*. 2013.
- [33] FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. GAEZ - Global Agro Ecological Zones - <http://gaez.fao.org/Main.html#>.
- [34] G. Fischer, F. Nachtergaele, S. Prieler, H.T. Van Velthuisen, L. Verelst, and D. Wiberg. GAEZ ver 3.0 Global Agro-ecological Zones Model Documentation. 2008.
- [35] Fraunhofer. <http://windmonitor.iwes.fraunhofer.de>.
- [36] Paul Gallagher, Mark Dikeman, John Fritz, Eric Wailes, Wayne Gauthier, and Hosein Shapouri. Biomass from Crop Residues: Cost and Supply Estimates. *Biomass*, (819):26, 2003.
- [37] Gapminder. <http://www.gapminder.org/>.
- [38] Vittorio Garfi, Bruno Lasserre, Gherardo Chirici, Daniela Tonti, Marco Ottaviano, Nicola Puletti, Caterina Palombo, and Marco Marchetti. Stima spazialmente definita della produttività potenziale delle risorse agro-forestali per uso energetico: il caso di studio della regione Molise. *L'Italia Forestale e Montana*, 66(4):283–292, 2011.
- [39] GIZ. Modern Energy Services for Modern Agriculture. A Review of Smallholder Farming in Developing Countries. 2011.
- [40] Seamus Hoyne and Adrian Thomas. Forest Residues: Harvesting, Storage and Fuel Value. pages 1–26, 2001.
- [41] IEA. World Energy Outlook 2010.

- [42] IEA. World Energy Outlook 2012.
- [43] IEA. World Energy Outlook 2014.
- [44] D.P. Jenkins, J. Fletcher, and D. Kane. Lifetime prediction and sizing of lead–acid batteries for microgeneration storage applications. *Renewable Power Generation, IET*, 1(1):10–16, 2007.
- [45] Daniela Jölli and Stefan Giljum. Unused biomass extraction in agriculture, forestry and fishery. (3), 2005.
- [46] Andreas Kemmler. Regional disparities in electrification of India—do geographic factors matter? *CEPE Working paper series*, 18(51), 2006.
- [47] Auke Koopmans and Jaap Koppejan. Agricultural and forest residues - Generation, utilization and availability. *Regional Consultation on Modern Applications of Biomass Energy*, (January 1997):6–10, 1997.
- [48] Tom Lambert, Paul Gilman, and Peter Lilienthal. Micropower System Modeling with Homer. *Integration of Alternative Sources of Energy*, pages 379–418, 2006.
- [49] David MacKay. Sustainable Energy - without the hot air.
- [50] Stefano Mandelli. Strategies for Access to Energy in Developing Countries: Methods and Models for Off-Grid Power System Design. 2014.
- [51] Simone Mazzola, Marco Astolfi, and Ennio Macchi. The potential role of solid biomass for rural electrification: a techno economic analysis for a hybrid microgrid in India.
- [52] Simone Mazzola, Marco Astolfi, and Ennio Macchi. Techno-Economic Optimization of a Stand-Alone Hybrid Microgrid for the Rural Electrification in Sub Saharan Africa. (May):371–376, 2015.
- [53] Simone Mazzola, Astolfi Marco, and Ennio Macchi. A Detailed Model for the Optimal Management of a Multigood Microgrid.
- [54] Navigant Research. Microgrid Deployment Tracker 2Q14. 2014.
- [55] Navigant Research. Microgrid Deployment Tracker 2Q15. (Dc), 2014.
- [56] Caroline a. Ochieng, Cathryn Tonne, and Sotiris Vardoulakis. A comparison of fuel use between a low cost, improved wood stove and traditional three-stone stove in rural Kenya. *Biomass and Bioenergy*, 58:258–266, 2013.

- [57] Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici. Le biomasse legnose. Un'indagine sulle potenzialità del settore forestale italiano nell'offerta di fonti di energia.
- [58] Practical Action. *Poor people's energy outlook 2012*. 2012.
- [59] RETScreen® International. *Clean energy project analysis: RETScreen® Engineering & cases textbook - photovoltaic project analysis*. 2004.
- [60] Victor O Sadras, Patricio Grassini, and Pasquale Steduto. Status of water use efficiency of main crops . *SOLAW Background Thematic Report - TR07*, 2013(October), 2012.
- [61] Arnab Sarkar, Sunita Singh, and Debojyoti Mitra. Wind climate modeling using Weibull and extreme value distribution. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 3(5):100–106, 2011.
- [62] Dirk Uwe Sauer and Heinz Wenzl. Comparison of different approaches for lifetime prediction of electrochemical systems—Using lead-acid batteries as example. *Journal of Power Sources*, 176(2):534–546, 2008.
- [63] William Stine and Michael Geyer. Power From The Sun.net.
- [64] T Trout and J Gartung. Energy use for microirrigation. *Proceedings of the 2002 USCID/EWRI . . .*, 2002.
- [65] UNDP. Millennium Development Goals Indicators - <http://mdgs.un.org/unsd/mdg/Data.aspx>.
- [66] UNDP. SDGs & Topics : Sustainable Development Knowledge Platform - <https://sustainabledevelopment.un.org/topics>.
- [67] UNDP. *Human Development Report 2006*. 2006.
- [68] Ch Whitlock, De Brown, and Ws Chandler. NASA surface meteorology and solar energy: methodology (release 3). *Http://Eosweb. Larc. Nasa.*, 04, 2002.
- [69] World Bank. <http://data.worldbank.org/>.
- [70] CY Xu and VP Singh. Evaluation and generalization of temperature based methods for calculating evaporation. *Hydrological processes*, 2001.
- [71] Heping Zhang and Theib Oweis. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 38(3):195–211, 1999.

- [72] Bo Zhao, Xuesong Zhang, Jian Chen, Caisheng Wang, and Li Guo. Operation optimization of standalone microgrids considering lifetime characteristics of battery energy storage system. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(4):934–943, 2013.