ROMA TRE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI

Scuola dottorale EDEMOM

XXVI Ciclo

Sistemi per il controllo delle risorse distribuite e lo storage in una SmartGrid

Candidato

Emiliano Pallotti

Matricola 14628\283

Docente Guida

Prof. Fabio Leccese

Coordinatore

Prof. Giuseppe Schirripa Spagnolo

Tesi presentata in parziale adempimento dei requisiti necessari per conseguire il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria

Aprile 2014

Tesi discussa il Maggio 2014
di fronte a una commissione esaminatrice composta da:

Prof. Gennaro Conte
Prof. Alberto Geri
Prof. Ernesto Limiti

Sistemi per il controllo delle risorse distribuite e lo storage in una Smart-Grid

Tesi di dottorato. Universitá di Roma - ROMATRE

© 2014 Emiliano Pallotti. Tutti i diritti riservati

Questa tesi è stata composta con LaTeX .

Versione: 30 aprile 2014

Il miglior scrittore sarà colui
che avrà vergogna di essere un letterato.
Friedrich Nietzsche

Valevole per ogni attività che attinge alle nostre passioni prima che ai nostri profitti...

"...migliaia, milioni di individui lavorano, producono e risparmiano nonostante tutto quello che noi possiamo inventare per molestarli, incepparli, scoraggiarli. È la vocazione naturale che li spinge; non soltanto la sete di denaro. Il gusto, l'orgoglio di vedere la propria azienda prosperare, acquistare credito, ispirare fiducia a clientele sempre più vaste, ampliare gli impianti, abbellire le sedi, costituiscono una molla di progresso altrettanto potente che il guadagno. Se così non fosse, non si spiegherebbe come ci siano imprenditori che nella propria azienda prodigano tutte le loro energie e investono tutti i loro capitali per ritrarre spesso utili di gran lunga più modesti di quelli che potrebbero sicuramente e comodamente con altri impieghi."

Luigi Einaudi

Elenco degli acronimi

AMI	**A**dvanced **M**etering **I**nfrastructure
BT	**B**assa **T**ensione
CAES	**C**ompressed **A**ir **E**nergy **S**torage
CIA	**C**onfidentiality, **I**ntegrity and **A**vailability
DER	**D**istributed **E**nergy **R**esources
DESS	**D**istributed **E**nergy **S**torage **S**ystem
DG	**D**istributed **G**eneration
DOS	**D**enial **O**f **S**ervice
DR	**D**emand **R**esponce
DSM	**D**emand **S**ide **M**anagement
EROI	**E**nergy **R**eturn **O**n energy **I**nvestment
ESOI	**E**nergy **S**tored **O**n **I**nvestment
ESP	**E**nergy **S**ervice **P**roviders
EV	**E**lectrical **V**eicule
GA	**G**enetic **A**lgorithm
HMS	**H**ome **M**anagement **S**ystem
IT	**I**nformation **T**echnology
LUEC	**L**evelized **U**nit **E**lectricity **C**ost

MAS	**M**ulti **A**gent **S**ystem
MPSO	**M**ultiobjective **P**article **S**warm **O**ptimization
MTG	**M**icro-**T**urbine a **G**as
MT	**M**edia **T**ensione
NAS	Sodium (**Na**) sulfur (**S**) battery
PAR	**P**eak to **A**verage **R**atio
PSO	**P**article **S**warm **O**ptimization
RTP	**R**eal-**T**ime **P**ricing
SCADA	**S**upervisory **C**ontrol and **D**ata **A**cquisition

Sommario

Le reti elettriche tradizionali sono state progettate per un funzionamento radiale e passivo, con completa separazione della rete passiva dell'utente dalla rete attiva dell'utility in modo da distribuire energia verso milioni di consumatori da impianti di generazione di grandi dimensione. L'efficienza di queste reti é limitata dalla necessità di installare capacità di generazione aggiuntiva per sopperire alla domanda di picco giornaliera. Le smart grid superano questa criticità prevedendo l'uso diffuso di dispositivi di storage, sorgenti di energia rinnovabile e smart meter. Il problema di disporre di una architettura distribuita di controllo efficiente dei dispositivi di accumulo di energia diventa fondamentale in una smart grid. Infatti la ricarica contemporanea di un numero troppo elevato di dispositivi di accumulo nella rete a BT e MT potrebbe sovraccaricare il sistema elettrico, con conseguenti rischi di black out e crescita dei costi di ripristino del servizio. In questo contesto si inserisce il tema di ricerca di questo dottorato sui modelli per la realizzazione di sistemi di controllo per il controllo dello storage e dei carichi pasivi in una smart grid. L'attività di ricerca condotta sotto la direzione del Prof. Del Vecchio, ha esplorato le seguenti tematiche:

1. dispositivi di storage:tecnologie di accumulo , specifiche tecniche e modellamento simulink

2. progetto e l'implementazione di uno smart agent per il controllo dello storage in una rete in BT che comprende un impianto fotovoltaico;

3. Test di verifica di correttezza delle funzionalità dello smart agent nell'ambiente di simulazione Matlab-Simulink, prendendo in considerazione una sottorete in BT e vari profili di irraggiamento solare

4. analisi della teoria dei giochi per implementare un sistema di stoccaggio ottimale in una rete estesa dotata di più nodi di generazione, accumulo e carichi programmabili.

Indice

Elenco degli acronimi **viii**

Sommario **ix**

1 L'evoluzione della rete **1**

1.1 La Smart Grid 2

1.1.1 Il modello concettuale 3

1.2 Sicurezza 5

1.2.1 Smart Grid Reference Model 6

2 Sistemi di Accumulo in una SmartGrid **9**

2.1 Funzionalità 11

2.2 Grandezze caratteristiche 14

2.3 Tecnologie di Storage 15

2.3.1 Sistemi Elettrochimici 17

2.3.2 Accumulatori a Volano 21

2.3.3 Accumulatori Idrici 23

2.3.4 Accumulatori CAES 23

2.3.5 Batteria ad alta temperatura NaS 23

2.3.6 Applicazioni nelle reti elettriche 25

2.4 Le MicroTurbine a Gas 27

3 Storage Management **31**

3.1 Scenario di riferimento 31

3.2 L'Agente controllore 33

3.3 Formulazione del modello matematico per l'ottimizzazione dello storage 37

3.3.1 Agenti di controllo dell'unita di accumulo residenziale . 38

3.3.2 Metrica per la definizione del prezzo dell'energia e la sostenibilità ambientale 39

4 Controllo dello storage nelle Smart-Grid 41

4.1 Premessa 41

4.2 Game Engineering nelle Smart-Grid 43

4.3 La Teoria dei Giochi 43

4.3.1 Classificazione dei giochi 44

4.3.2 Rappresentazione dei giochi 46

4.3.3 Equilibri 48

4.3.4 Modello del Gioco 49

4.3.5 Formulazione Matematica 51

4.4 Caratterizzazione dei sistemi multi-agente 54

4.4.1 Agenti reattivi 56

4.4.2 Architettura 56

A Ulteriori lavori di Ricerca 59

A.1 Signal Processing 59

A.1.1 Inpainting 59

A.1.2 Image processing 63

A.2 Classificazione Video Automatica 67

Indice delle Pubblicazioni 73

Bibliografia 78

Capitolo 1

L'evoluzione della rete

Negli ultimi anni, la rete elettrica è al centro di una profonda trasformazione orientata ad accrescere l'efficenza energetica, la sostenibilità ambientale e l'affidabilità del servizio offerto.
I fattori che spronano questo rinnovamento sono principalmente ma non unicamente:l'aumento del fabbisogno energetico richiesto sia dalla società civile che dai processi industriali e la necessità, richiesta dalla comunità internazionale, di mitigare l'impatto ambientale e ridurre al produzione di gas serra.
Inoltre, il graduale esaurimenti del combustibile fossile unito alla fluttuazione dei prezzi sono di incentivo alla ricerca di nuove tecnologie per la produzione di energia basata su fonti rinnovabili.
Gli Operatori del settore si trovano quindi ad affrontare numerose sfide:
- diversificazione nella generazione di Energia
- distribuzione ottimale e a basso costo
- affrontare problematiche riguardo alla riduzione di CO_2

Risulta evidente che tali sfide non possono essere confinate all'interno della attuale infrastruttura elettrica.
L'attuale rete elettrica presenta una natura intrensicamente unidirezionale. La conversione in energia elettrica avviene per lo più attraverso conversione elettrica di grandi centrali elettriche. Presenta quindi inevitabili perdite lungo le linee di trasmissione.

Al fine di soddisfare la domanda di picco (rilevabile per 5% del tempo) l'intera infrastruttura viene sfruttata per meno dell'80% della sua capacità.Inoltre, la rete risulta scarsamente rubusta in quanto per progettazione gererchica soffre in modo endemico dell'effetto domino riguardo ai guasti.

L'esigenza di rispondere a queste problematiche conduce alla formulazione della rete elettrica della prossima generazione nota come Smart Grid.

1.1 La Smart Grid

Le direttive dell'Unione europea e i modelli statunitensi sono le due principali visioni che guidano lo sviluppo delle Smart Grid. La visione dell'Unione europea è guidata principalmente da preoccupazioni ambientali e di efficenza energetica, mentre la pianificazione degli Stati Uniti per la smart grid è stata motivata principalmente dal desiderio di miglioramenti di affidabilità della rete e sicurezza.[1]
D'altro canto, i consumatori si aspettano che i servizi energetici della prossima generazione garantiscano sicurezza, trasparenza e maggiore disponibilità di energia.
In altre parole significa passare dal tradizionale sistema "mono-direzionale"

Figura 1.1

ad un nuovo sistema "bi-direzionale" e ad "obiettivi condivisi" Come con-

Figura 1.2

seguenza delle politiche internazionali (come per esempio il pacchetto clima energia 20-20-20) cresce in Italia il peso delle fonti di energia rinnovabili, soprattutto di quelle non programmabili (fotovoltaico ed eolico) e si riduce inevitabilmente l'affidabilità della rete (figura 1.3).

Da uno studio effettuato dal Prof. Vaclav Smil [2] appare evidente come, a fronte del fatto che le transizioni energetiche sono processi estremamente

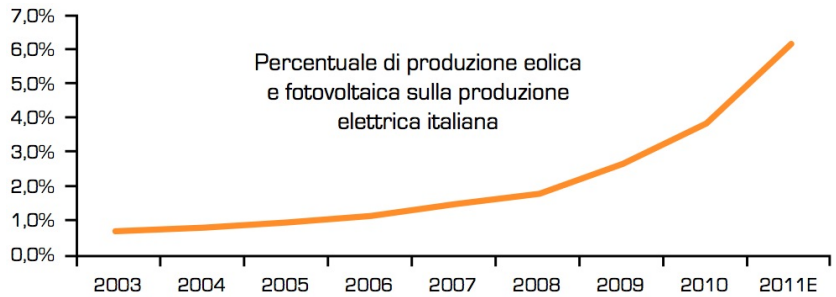


Figura 1.3

lunghi (decenni o addirittura generazioni – al gas naturale sono voluti circa 55 anni dall'inizio della sua estrazione commerciale del 1870 per raggiungere il 5% del mercato globale ed altri 55 per arrivare al 25%) e che i rendimenti delle tecnologie attuali per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili sono estremamente bassi (solo il 16-17% per il solare), l'unico modo per garantire un futuro energetico radioso e ridurre sensibilmente le emissioni di anidride carbonica è il risparmio energetico, volto ad aumentare il più possibile l'efficienza energetica e a ridurre gli sprechi. Da qui la necessità di una Smart Grid.

1.1.1 Il modello concettuale

La rete elettrica è la più grande e antica rete interconnessa del mondo. In Europa e Nord America inoltre è l'infrastruttura più alta intensità di investimenti ricevuti. Per raggiungere gli obiettivi desiderati di distribuzione di energia affidabile, efficiente e pulita, le Smart-Grid utilizzano una combinazione di diverse tecnologie [1]:

- Rete di comunicazioni bidirezionali
- Sistemi di controllo avanzati
- Componentistica hardware di nuova generazione
- Sensoristica distribuita
- Uso di applicazioni IT

Questo sistema sta subendo enormi cambiamenti passando da pochi nodi con limitata intelligenza di molti nodi finali con grandi quantità di intelligenza

artificiale. L'obiettivo è il raggiungimento di più Disponibilità - Integrità e Riservatezza della rete.

I sistemi di comunicazione e di controllo devono essere in grado di risolvere i blackout a distanza risparmiando tempo e costi. Così, la penetrazione dei punti finali intelligenti nella rete elettrica solleverà nuove questioni di sicurezza e possono diventare portali per intrusioni e attacchi malware, argomento trattato nel seguito.

Le sezioni maggiormente coinvolte in questo processo sono quelle relative alla sezione di generazione, sensoristica, e distribuzione dell'energia. Alcune tabelle riportano una serie di soluzioni tecnologiche capaci di abilitare queste funzionalità.

FUNZIONALITÀ	SOTTO-FUNZIONALITÀ	SOLUZIONE
SMART GENERATION	Comunicazione bidirezionale impianto di produzione - sistema elettrico	Smart inverter
	Automazione degli interventi di manutenzione sugli impianti di produzione	
	Gestione aggregata/dis-aggregata degli impianti di produzione	Sistemi di ottimizzazione degli asset
	Stabilizzazione della produzione da impianti (soprattutto da fonti rinnovabili)	Sistemi di storage

FUNZIONALITÀ	SOTTO-FUNZIONALITÀ	SOLUZIONE
SMART NETWORK	Automazione della raccolta, elaborazione e memorizzazione dei dati sullo stato della rete	Sistemi di controllo, automazione e sensoristica
	Ottimizzazione dei carichi della rete	Demand Response Management System (DRMS)
	Automazione della raccolta, elaborazione e memorizzazione dei dati sullo stato dei punti di prelievo	Advanced Metering Infrastructure (AMI)
	Stabilizzazione della produzione da impianti (soprattutto da fonti rinnovabili)	Sistemi di storage
FUNZIONALITÀ	**SOTTO-FUNZIONALITÀ**	**SOLUZIONE**
SMART METERING & ACTIVE DEMAND	Automazione della lettura del profilo di consumo	Advanced Metering Infrastructure (AMI)
	Comunicazione bidirezionale con la rete di distribuzione	
	Controllo automatizzato dei punti di consumo	Home Management System (HMS)
	Stabilizzazione della interazione degli impianti da fonti rinnovabili presso l'utenza (scambio sul posto)	Sistemi di storage

Figura 1.4. *Fonte: www.energystrategy.it*

1.2 Sicurezza

Diverse problematiche di sicurezza e di privacy sorgono nella distribuzione di una smart grid. Infatti, i clienti condividono ulteriori informazioni su come utilizzare l'energia esponendoli a invasione della privacy. Inoltre le reti elettriche domestiche e aziendali sono collegate ad una vasta infrastruttura informatizzata che può essere utilizzata per come veicoli di attacchi su larga scala all'infrastruttura elettrica.

La graduale introduzione dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili comporta per le reti esistenti una nuova sfida per i sistemi di trasmissione, controllo e monitoraggio. La generazione distribuita comporta un aumento dell'aleatorietà del profilo di produzione elettrica per via del suo comportamento intermittente che rende complesso e costoso un sistema di controllo centralizzato della stabilità della rete. Numerose ricerche [3–7] analizzano l'impatto della generazione distribuita sulla rete di distribuzione al fine di accrescere la stabilità della rete tramite procedure di riconfigurazione in senguito a disturbi o guasti. L'approccio suggerito [8,9] è quello di suddividere la rete in isole con un relativo grado di indipendenza energetica e implementare un sistema di controllo della qualità della rete in stretta comunicazione con i sistemi di storage, le fonti di generazione distribuita e i carichi di utenza.
In questo contesto durante al fase di disturbo i carichi e i generatori possono essere isolati dalla rete centrale fino al raggiungimento dei nuovi parametri di equilibro, protegendo quindi i carichi della rete isolata dai disservizi.
Per garantire un controllo distribuito tramite scelte strateggiche effettuate a livello locale di utenza viene utilizzata la tecnologia multi-agente. In questo contesto, ciascun componente nel sottorete può essere rappresentato come un agente autonomo, che deve essere in grado di rispondere efficacemente ai cambiamenti del sistema prendendo le corrette decisioni in coordinazione con gli altri agenti presenti nella rete [10]. Esempi di questa tecnica saranno sviluppati nel successivo capitolo 3 e nell'appendice A riguardo la teoria dei Giochi.

L'intera infrastruttura di comunicazione sarà trasformata da una rete a stella con comando centralizzato e controllo in una rete di comunicazione *peer-to-peer* dinamica: la componente di comunicazione di una rete SmartGrid è fondamentale.

Un nuovo scenario si prospetta davanti, la convergenza delle infrastrutture di comunicazione con l'energia elettrica introduce nuove sfide riguardo la sicurezza e la riservatezza dei dati. Infatti, tanto più il sistema elettrico fa affidamento su computer e reti di telecomunicazione quanto più il sistema diventa dipendente dalle politiche di sicurezza.
Ecco alcuni rischi potenziali:

- Una maggiore complessità aumenta gli errori accidentali e i potenziali aggressori
- Più interconnessioni esistono più opportunità ci presentano per compromettere il sistema
- L'incremento dei nodi intelligenti induce un maggior numero di punti di ingresso per attacchi DOS
- Nuove tecnologie possono introdurre nuove problematiche.

Con la convergenza della rete elettrica verso una infrastruttura IT si dovrano considerare le tipiche vulnerabilità di una rete IT oltre ad nuove vulnerabilità tipiche di una interazione tra due sistemi complessi.

1.2.1 Smart Grid Reference Model

I principi guida si basano sul paradigma **CIA** (Confidentiality, Integrity, e Availability). Essi si fondano sul principio di fornire il minimo dei privilegi possibile per poter eseguire le funzionalità richieste [**?**] .

Availability

La disponibilità è la risposta alla domanda perché implementare una smart grid. Le perdite di affidabilità hanno un impatto su tutti gli attori coinvolti, questo includono: i clienti, i fornitori di energia elettrica e gli istituti governativi. La sicurezza ha il compito di prevenire lgli eventi di fuori servizio dovuti a fattori umani, la ridondanza invece può mitigare le minacce di tipo ambientale. Inoltre la sicurezza doveva prevenire gli attacchi periferici attraverso specifici DoS (Denial of Service) verso le apparecchiature terminali come gli smart meter (per esempio mitigare la possibilità di un hacking non professionale tramite lo script kiddie). L'attacco alle società di servizi interessa invece la disponibilità e

fruizione di energia e sarà certamente di tipo doloso e presumibilmente eseguito per estorsione o ritorsione.

Confidentiality

Si tratta di una protezione delle informazioni la cui divulgazione è non autorizzata. E' un requisito di sicurezza lato cliente. Tale procedure sono concentrate nelle aziende di servizi ed è un obiettivo importante per gli hacker. Si tratta di una raccolta di tutti i dati relativi al cliente, le informazioni personali, dati di consumo e dati di fatturazione riservati. Questi dati non sono disponibili solo sulla rete intelligente, ma anche in applicazioni Web distribuite (si pensi ai sistemi di auto-monitoraggio o a meccanismi di configurazione remota del cliente). I dati raccolti possono rivelare molte informazioni sulle attività e i ritmi di vita di una utenza [11, 12] (figura 1.5). E' un problema tipico di sicurezza IT come per esempio la SQL injection.

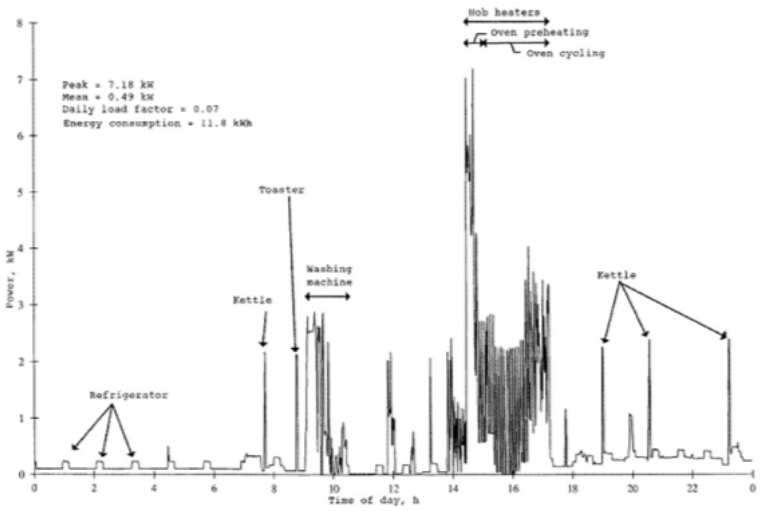


Figura 1.5. carichi di utenza

Integrity

Dal lato delle aziende di servizi un accesso non autorizzato ai dati riservati si manifesterà come un furto di servizio e la frode. Elementi coinvolti sono i smart meter. L'hacking di questo punto di accesso permetterebbe di manipolare i dati trasmessi in rete. L'obiettivo è quello di rubare un servizio attraverso

la modifica dei dati di consumo o reporting alla societò o la frode tramite la segnalazione di consumi di energia elettrica errati.

Capitolo 2

Sistemi di Accumulo in una SmartGrid

La penetrazione dell'energia elettrica negli usi finali ha avuto, negli ultimi 30 anni, una crescita costante, pur se con incrementi medi diversificati tra settore industriale e settore civile e, in quest'ultimo, ancora differenti tra residenziale e terziario. La leggera riduzione riscontrata a livello di usi finali dal gestore della rete di trasmissione nazionale per l'anno 2007 dipende sostanzialmente dalla definizione adottata, che non evidenzia questo aspetto. É prevedibile che il trend di crescita della penetrazione dell'elettricità continui anche nei prossimi anni portando ad un complessivo aumento dei consumi elettrici ed ingenerando una nuova domanda relativa alla nuove tecnologie efficienti, più sostenibili anche dal punto di vista ambientale.
Le direttive recentemente emanate dall'Unione Europea, che impongono ai paesi membri una forte riduzione del consumo energetico e delle emissioni e un incremento di generazione da fonti rinnovabili, ha favorito questa evoluzione.
La diffusione di tecnologie efficienti negli usi finali, con l'introduzione di tecnologie innovative di generazione distribuita (micro-cogenerazione), di componenti e sistemi efficienti nell'uso finale, di sistemi di accumulo e condizionamento dell'energia elettrica diventerà sempre più capillare e pervasiva nel Network Energetico. Se a queste tecnologie si unisce una gestione integrata delle reti energetiche locali, a livello di stabilimento, o di area geografica delimitata, si riesce ad intervenire contemporaneamente lato domanda (controllo dei carichi per gli usi finali) e lato offerta (produzione, ma principalmente autoconsumo) per una migliore gestione dei carichi, sia dal punto di vista tecnico, sia dal

punto di vista economico.

In questo scenario le tecnologie di accumulo di energia si trovano a svolgere una serie di funzioni strategiche: l'accumulo permette di disaccoppiare temporalmente la produzione e il consumo di energia elettrica, favorendo una maggiore penetrazione dei sistemi di generazione a fonte rinnovabile che, per la loro natura aleatoria, hanno curve di produzione non facilmente prevedibili e spesso non coincidenti con quelle del carico.
Le reti elettrica nazionale ed europea nella loro attuale configurazione non potrebbero reggere un livello molto elevato di produzione da generatori di tipo aleatorio, se non apportando una profonda trasformazione che vede, tra le altre misure, anche l'integrazione di sistemi di accumulo che svolgano funzioni di riserva per compensare le variazioni impreviste della produzione e compensare le fluttuazioni rapide della potenza generata, garantendo la continuità e la qualità della fornitura.
Lo studio e lo sviluppo di sistemi di accumulo di energia elettrica si inquadra nel più ampio tema degli apparati e dispositivi per l'evoluzione delle reti di distribuzione, contribuendo a coprire particolari esigenze come quelle legate alla presenza di sistemi di generazione discontinui, come le fonti rinnovabili o la microgenerazione, o gli utilizzi discontinui. Non sempre infatti conviene potenziare la rete di distribuzione, e l'uso di sistemi di accumulo elettrico introduce un grado di libertà in più nella gestione delle isole di produzione o di autoconsumo, contribuendo a renderne la gestione indipendente da quella della rete, anche nei casi in cui esse non siano autosufficienti.

Le tecnologie di realizzazione dei sistemi di accumulo si differenziano a seconda che si esamino sistemi centralizzati di grossa taglia, solitamente installati a livello di rete di trasmissione (impianti di pompaggio, CAES), o i sistemi di accumulo distribuiti, quali gli accumulatori elettrochimici, installati direttamente nella rete di distribuzione in prossimità dell'utenza.Ulteriori impianti sono quelli domestici in unione a sistemi di produzione da fonti rinnovabili.

In funzione dei metodi di conversione dell'energia si parla di sistemi di accumulo : ad energia potenziale (pompaggio idroelettrico), meccanico (CAES – Compressed Air Energy Storage), elettrochimico (batterie), elettromagnetico (SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage). Le tecnologie di accumulo elettrochimico si dividono in: dispositivi con elettrolita acquoso (piombo acido, nichel/cadmio, nichel/metal idruro), batterie a circolazione di elettrolita,

batterie ad alta temperatura (sodio/zolfo, sodio/cloruro di nichel), batterie ai litio-ioni.
I parametri caratteristici di questi accumulatori elettrochimici sono: il rapporto potenza nominale /energia estraibile, l'energia specifica (energia estraibile durante una scarica nominale diviso peso in kg dell'accumulatore), la potenza specifica (potenza nominale diviso peso in kg dello stesso), il rendimento energetico (energia estratta dal sistema durante una scarica ad una potenza nominale diviso energia spesa per riportare il sistema nello stato di carica iniziale), il tempo di vita, la temperatura di lavoro, il livello di sicurezza (probabilità che si verifichino dei guasti che generano situazioni di pericolo per cose o persone), il costo per ciclo.

2.1 Funzionalità

I sistemi di accumulo, nelle loro different tipologie, sono componenti che possono venire applicati sull'intera infrastruttura elettrica come evidenziato dalla figura 2.1.

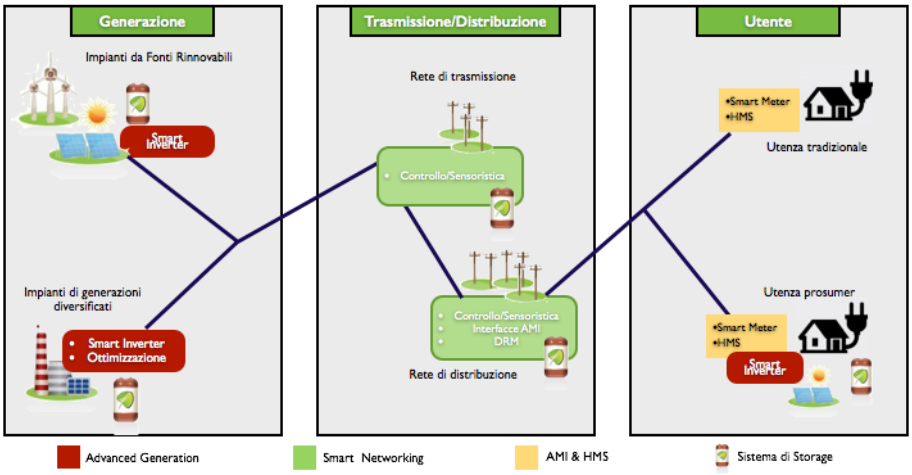


Figura 2.1. Elementi di Accumulo in una SmartGrid

L'indagine sullo stato dell'arte delle batterie al litio ha anche comportato una verifica sulla situazione di sviluppo ed applicativa dei sistemi di accumulo, già utilizzati o proposti nelle reti elettriche. Le caratteristiche principali di un sistema di accumulo riguardano essenzialmente le proprietà proprie di accumulo e quelle operative e sono: densità di energia e di potenza, efficienza energetica in carica e scarica, autoscarica, tempi di carica e scarica, comportamento

in diverse condizioni di stato di carica, vita utile (in anni e cicli), tempi di realizzazione, affidabilità, materiali utilizzati, costo e sicurezza nell'uso, nella realizzazione e nell'eventuale smaltimento. L'importanza delle caratteristiche sopra indicate è fortemente condizionata dall'applicazione e dal metodo di accumulo. Queste caratteristiche diventano criteri di valutazione in fase di progettazione e scelta del sistema di accumulo, che prevalentemente mirano a favorire gli aspetti economici ed anche ambientali del sistema individuato. L'obiettivo è quello di assicurare le funzionalità che sinteticamente vengono illustrate nella figura 2.2.

	Applicazione	*Potenza richiesta [MW]*	*Autonomia del sistema [min]*	*Modalità operative*	*Livello di tensione AC*
Generazione	riserva rapida	10 - 100	10-100	pochi interventi l'anno	MT - AT
	riserva rapida per regolazione di frequenza	10 - 100	< 10	continui cicli di carica/scarica non profondi	MT - AT
	load levelling	1 - 100	100-1000	cicli di carica e scarica giornalieri	MT - AT
T & D	regolazione di tensione	1 - 10	10-100	cicli di carica e scarica giornalieri	MT - AT
	T & D facility deferral	0.1 - 10	100	cicli di carica e scarica giornalieri	MT - AT
servizi ancillari	peak shaving	0.01 - 10	10-100	cicli di carica e scarica giornalieri	BT - MT
	accoppiamento alle fonti rinnovabili	0.01 - 100	0.001-1000	variabile a seconda dell'applicazione	variabile
	power quality	0.01 - 10	0.001-1	il sistema eroga forti potenze per tempi brevi	BT - MT

Figura 2.2. Applicazioni dei sistemi di accumulo(Rapporto CESI-Enea)

Nello specifico queste funzioni trovano applicazioni nelle:

- Reti di distribuzione: compensazione dei disturbi delle reti di distribuzione (buchi di tensione, sovra tensioni, squilibri di tensione) e regolazione di tensione in cabina primaria lungo linea, miglioramento della qualità del servizio offerto.

- Reti di Trasmissione: fornitura del servizio di riserva reattiva per la regolazione di tensione.

- Produzione da fonti rinnovabili:Integrazione delle rinnovabili, ossia l'accumulo di energia prodotta dagli impianti FER non programmabili nelle

ore a basso prezzo (carica), e la successiva emissione della stessa nelle ore a prezzo più elevato (scarica). Questo permette di ottenere un profilo di generazione complessivo più regolare e prevedibile.

- Time-shift di energia:Rendere possibile l'acquisto di energia nelle ore in cui il prezzo basso per rivenderla o direttamente utilizzata nelle ore in cui il prezzo più alto o è prevista una domanda di picco.

In questo studio ci si è interessati alle funzionalità verso l'utente finale nella sezione di rete a Bassa Tensione. Le caratteristiche ricercate sono state quindi quelle relative a:

- Funzionamento Island Mode / Load-levelling
- Accoppiamento a fonti rinnovabili
- Peak Shaving
- UPS
- Miglioramento della Power Quality

Con il termine load-levelling (livellamento del carico) ci si riferisce alla disomogenea distribuzione del carico su una rete elettrica nelle varie ore del giorno e, da altri punti di vista, anche nei vari giorni della settimana e nelle varie stagioni. Il problema del load-levelling è di pertinenza dell'utility che fornisce l'energia elettrica o che gestisce la rete elettrica, che deve necessariamente dimensionare la rete e i generatori sul picco di potenza, prevedendo quindi una certa riserva. L'utilizzo di sistemi di accumulo di energia con funzioni di load-levelling consente di migliorare lo sfruttamento della generazione di potenza esistente e può permettere in certi casi anche il differimento degli investimenti per il potenziamento della rete elettrica fornendo localmente al carico la quota di potenza e di energia che la rete elettrica non potrebbe fornire. Inoltre in presenza di generazione da fonti rinnovabili i sistemi di accumulo permettono di far fronte a variazioni impreviste della potenza generata; possono quindi essere impiegati come riserva rapida, possono contribuire alla regolazione della frequenza di rete in presenza di generatori caratterizzati da una rapida fluttuazione della potenza, in particolare generatori eolici.
In modalità islanded il sistema di accumulo rivela la sua indispensabilità per

garantire la continuità della fornitura nei periodi di mancanza di produzione da parte dei generatori.

Con il peak shaving invece si intende invece la questione, vista questa volta con gli occhi dell'utente, della disuniformità della richiesta di potenza dalla rete elettrica. L'utilizzo di un sistema di accumulo per effettuare il peak shaving permette all'utente di non dimensionare il suo impianto sul picco di potenza e di stipulare con l'ente fornitore dell'energia un contratto con una potenza massima inferiore, per lui economicamente vantaggioso. Il sistema di accumulo ha il compito di fornire l'integrazione alla potenza richiesta dai carichi al di sopra del livello massimo stabilito dagli accordi con l'ente fornitore dell'energia elettrica. Inoltre l'utente può sfruttare il sistema di peak shaving per comprare e immagazzinare energia nelle ore in cui costa di meno e rivenderla nelle ore a tariffazione più alta.

Con la power quality si deve garantire la rete di alimentazione da perturbazioni e disturbi(buchi di tensione, microinterruzioni, disturbi armonici) e di proteggere al tempo stesso la rete da disturbi dovuti a rapide variazioni della potenza richiesta. Tali azione vengono intraprese grazie ai sistemi di accumulo con specifiche caratteristiche integrati con opportuni convertitori elettronici(filtri attivi).

2.2 Grandezze caratteristiche

- Capacità
  É espressa in Ah, è la quantità di carica elettrica che può essere estratta dal sistema durante la scarica. Nella maggior parte degli accumulatori elettrochimici questo parametro non è univoco ma dipende dal valore della corrente di scarica e dalla temperatura. La capacità nominale dunque è la capacità corrispondente ad un particolare regime di scarica sufficientemente rappresentativo del regime di lavoro cui la batteria è destinata e ad una temperatura di riferimento (tipicamente 25 °C).

- Energia e Potenza specifica
  L'energia, espressa in Wh, è l'energia che il sistema fornisce durante la scarica, partendo da una condizione di piena carica fino alla scarica completa, ed è data dal prodotto della capacità per la tensione dell'accumulatore. Anche questo parametro dipende dal regime di lavoro. Per

confrontare sistemi di tipo diverso si utilizzano i parametri specifici, quali l'energia specifica e la potenza specifica, riferite al peso in kg del sistema ed espresse rispettivamente in Wh/kg e W/kg e la densità di energia e densità di potenza, riferite al volume in litri del sistema ed espresse in Wh/l e W/l. É da tener conto che mentre le grandezze gravimetriche sono univoche, le grandezze volumetriche possono dipendere dalle scelte costruttive delle diverse case produttrici.

- Rendimenti
  Il rendimento di carica/scarica, è definito come il rapporto tra l'energia scaricata e l'energia spesa per riportare il sistema di accumulo nello stato di carica iniziale.

- Durata
  Con durata di vita si intende il tempo di esercizio dell'accumulatore che ha termine quando le prestazioni del sistema degradano al di sotto dei limiti operativi (ad esempio quando la capacità si riduce di una prefissata percentuale). A seconda delle applicazioni, questo parametro può essere espresso in anni o in cicli di carica/scarica, con una profondità di scarica generalmente tra l'80 e il 90%

2.3 Tecnologie di Storage

Dopo quasi due secoli di ricerca e sviluppo l'energia elettrica continua però a essere immagazzinabile soltanto su scala relativamente modesta, anche se sono in vista innovazioni molto promettenti.
Tuttavia, l'eccezione a larga scala sono gli impianti di pompaggio costituiti da un serbatoio a quota più elevata, dove nelle ore notturne (durante le quali l'energia ha un basso prezzo) utilizzando l'energia elettrica prodotta da una centrale termica viene pompata l'acqua contenuta in un serbatoio a quota più bassa, mentre nelle ore diurne l'acqua è fatta ridiscendere a valle, dove genera energia elettrica nelle ore di punta, quando il suo valore è massimo.
Esistono molte tecnologie di accumulo dell'energia, ciascuna con le proprie caratteristiche che la rendono più o meno adatta a particolari esigenze. Tra le principali tipologie di accumulo dell'energia ci sono:

- accumulatori elettrochimici

- batteria a flusso
- celle a combustibile
- super condensatori
- Volani
- bacini idroelettrici
- Accumulatori CAES
- Batteria ad alta temperatura NaS

Accumulo	Potenza	Durata della scarica	Efficienza (%)	Vita utile, anni	Total Capital Cost (USD/kW)
CAES (100–300 MW, Underground)	15–400 MW	2–24 h	54 (Eff_{NG}=1) 76(Eff_{NG}=0.54) 88(Eff_{NG}=0.39)	35	600–750
Pompaggio acqua	250 MW >1 GW	12 h	87	30	2700–3300 Upgrade:300
Li Ione	5 MW	15 min a diverse h	90 (CC)	15	4000–5000
Piombo acido	3–20 MW	10 min a diverse h	75–80 (CC) 70–75 (CA)	4– 8	1740–2580
Sodio Zolfo, NaS	35 MW	8 h	80–85 (CC)	15	1850–2150
VRB Flow Cell	4 MW	4–8 h	75–80 (CC) 63–68 (CA)	10	7000–8200
ZnBr Flow Cell	40–100 kW, 2 MW	2–4 h	75–80 (CC) 60–70 (CA)	20	5100–5600
Volani ad alta potenza	750– 1650 kW	15 sec a 15 min	93	20	3695–4313
ZEBRA	<10 MW	Finoa 8 h	80–85 (CC)	Oltre 1500 cicli	1500–2000
Fe/Cr Flow Battery	<10 MW	2–4 h	50–65	20	200–2500
Zn/Air	20 kW– 10 MW	3–4 h	40–60	Alcune centinaia di cicli	3000–5000
SMES	1–3 MW	1–3 sec	90	>30,000 cicli	380–490
SMES di grande taglia	100 MW–200 MW	100 sec (MWh) 0.5–1h (100MWh) 5–10 hr (GWh)	90	>30,000 ciclic	700–2000
Supercondensatori	10 MW	Fino a 30 sec	90	>500,000 cicli	1500–2500

NG = gas naturale; CC = corrente continua; CA = corrente alternata

Figura 2.3. Confronto di diversi sistemi di accumulo per applicazioni in reti elettriche (Fonte: IEA)

Nei prossimi anni, assieme ad un aumento delle prestazioni si assisterà ad una caduta dei prezzi di questi sistemi e questo sarà determinante per un utilizzo su larga scala di questi sistemi per l'accumulo dell'energia. In particolare, l'accumulo di energia potrà essere sfruttato per migliorare l'efficienza complessiva della rete sfruttando al 100% tutti i nuovi sistemi di produzione

di energia da fonti rinnovabili, riducendo così i costi energetici complessivi. La liberalizzazione del mercato e la conseguente concorrenza di prezzi, così come l'aumento dei consumi di elettricità hanno giovato sia ai venditori che ai consumatori. L'accumulo di energia è l'elemento chiave per poter rendere veramente "smart" la nuova rete di distribuzione dell'energia, permettendo di sfruttare al massimo tutti i progressi tecnologici.
Affinché una certa tecnologia di accumulo dell'energia sia adatta allo scopo, deve soddisfare determinati criteri. Sono state studiate le figure di merito di ciascun criterio per ciascuna tecnologia e i risultati sono stati messi a confronto. Si riportano di seguito i criteri presi in considerazione:

- il sistema di accumulo dell'energia (ESS) deve essere adatto a richieste di alta energia, cioè deve garantire una scarica a bassa potenza per un periodo di tempo prolungato. Saranno necessari tempi di scarica di qualche ora: in questo modo sarà possibile far fronte alla fluttuazioni dei prezzi ed acquistare energia al prezzo più basso. Benché il costo aumenta all'aumentare della capacità di accumulo di energia, alta energia significa aumentare i benefici del sistema.
- Il ciclo di vita dell'ESS deve essere sufficientemente lungo da garantire un ritorno dell'investimento. Un ciclo di vita attorno a 15 anni è quello che ci si deve aspettare un sistema di accumulo dell'energia utilizzato per lo "shifting loads" [2],[3],[4].
- L'efficienza Round-trip e le perdite in stand-by del sistema sono due aspetti estremamente importanti. L'efficienza è definita come la quantità di energia elettrica rilasciata dal sistema di accumulo per unità energia elettrica immagazzinata [1]. Le perdite in stand-by rappresenta l'energia persa dall'ESS in condizioni di riposo (cioè in assenza di carica o scarica) [1].
- I costi di installazione e manutenzione. Questo comprende i costi di manutenzione e monitoraggio, nonché i costi di manodopera associati ad un sistema in condizioni di funzionamento normale.

2.3.1 Sistemi Elettrochimici

Il principio di funzionamento fa riferimento alla reazione di ossido riduzione. A seconda della coppia di elettrodi, tipo di elettrolita e caratteristiche costruttive,

si hanno diverse tipologie di accumulo, ciascuna delle quali presenta caratteristiche differenti. Le criticità maggiori di questa tecnologia sono rappresentate dal costo di investimento e dalle problematiche affidabilità e sicurezza.
Uno dei principali vantaggi di questa soluzione è costituito dai tempi di risposta: si può in pratica affermare che la domanda di energia elettrica viene soddisfatta in tempo reale.
Inoltri intrinsechi limiti capacità (tra i 20 e i 100 Wh/kg) di accumulo hanno finora reso difficile, a parte utilizzi marginali, la diffusione di veicoli elettrici; solo di recente stanno avvicinandosi a condizioni di lancio commerciale su larga scala i veicoli a due ruote (scooter elettricie autoveicoli ibridi). Anche l'efficienza e il numero di cicli (scarica/ricarica) praticabili possono influenzare la convenienza economica delle diverse soluzioni e i campi di applicazione.

Sono inoltre state, ancora marginalmente, studiate, specificatamente per le reti elettriche, ed utilizzate altre tipologie di batterie del tipo cosiddette a flusso (od anche redox a flusso, come le ZnBr, VRB e), come quelle illustrate nella Figura 2.3. Questi sistemi presentano vantaggi e limiti di natura tecnologica ed economica, che li rendono competitivi in diverse applicazioni (come chiaramente risulta dal confronto di Figura 2.3). Rispetto però alle batterie a base di litio, è possibile individuare una serie di aspetti che rendono gli altri sistemi di accumulo elettrochimico meno interessanti: le batterie convenzionali al piombo (anche nelle versioni più innovative) e quelle alcaline hanno dei limiti prestazionali o di costo, che sono all'incirca simili a quelli delle batterie più innovative come quelle ad alta temperatura e redox; di contro, i sistemi al litio hanno l'indubbio vantaggio strategico di essere un componente, adatto pernumerose applicazioni e sono, pertanto, prodotti in continua evoluzione tecnologica con notevoli prospettive di miglioramento per tutte le applicazioni e con aspettative di mercato così rilevanti, da far ritenere una rapida riduzione dei costi come un elemento certo, associato alle economie di scala attese dall'aumento della produzione previsto sia nell'elettronica di consumo che nei veicoli a trazione elettrica.

Accumulatori al Litio

Non esiste una sola batteria al litio ma moltissimi tipi diversi che differiscono tra loro per materiali elettrodici e/o elettrolitici. L'unico elemento che unisce queste batterie è lo ione portatore della carica elettrica (ione Litio, Li+).

Il litio è l'elemento avente il potenziale (E0=-3.045 V, riferito ad un elettrodo di riferimento) più negativo e quindi, accoppiandolo a un altro elemento si ottiene una elevata differenza di potenziale (il motore di una batteria) che è direttamente proporzionale all'energia di una cella.
Il litio è un metallo alcalino, terzo elemento della scala periodica, con un modesto peso atomico e una notevole reattività, caratteristiche queste che lo rendono estremamente appetibile per l'uso in accumulatori. Ciò fa anche sì che il sistema sia potenzialmente pericoloso e che tutti i materiali debbano essere manipolati in un ambiente estremamente controllato e privo di umidità, contaminanti, e agenti fisici sia durante la preparazione che nelle fasi successive di esercizio o di riciclo.
Le batterie al litio negli ultimi 15 anni hanno guadagnato elevatissime quote di mercato e in tutte le applicazioni portatili che richiedono piccoli ingombri (alta densità di energia, Wh/l) e basso peso (alta energia specifica , Wh/kg) sono sempre più utilizzate rispetto a quelle nichel-idruri metallici. Il mercato consumer, ad esempio, con gli accumulatori per telefonini, computer portatili, macchine fotografiche e videocamere utilizzano quasi esclusivamente le batterie litio-ione.
Anche in numerose applicazioni come televisori portatili, lettori musicali, videogame, apparecchiature elettromedicali e per le telecomunicazioni hanno ormai soppiantato i sistemi di accumulo tradizionali.
Più in generale si può dire che dove sono necessarie alte energie, in volume o in peso ed è essenziale avere un alto numero di cicli, la scelta non può che orientarsi verso gli accumulatori al litio: invece dove i suddetti parametri non sono indispensabili ed il costo e la sicurezza sono fattori limitanti, ci si è finora orientati verso altri sistemi. Sono in corso studi per migliorare gli accumulatori al litio soprattutto per quel che riguarda gli aspetti di sicurezza e di costo, per poter estendere il loro impiego all'immagazzinamento di energia per applicazioni che necessitano di potenza e affidabilità, come i veicoli elettrici e le reti di distribuzione di energia per il taglio dei picchi e il livellamento di carico.
Le batterie al litio vengono di solito distinte in due tipologie principali:

- Litio metallico

- Litio-ione

La prima tipologia, presenta notevoli vantaggi in termini di bassa resistenza interna, elevata capacità e conseguentemente elevate potenze ed energie specifiche, ma, per l'estrema reattività del litio metallico, ha posto alcuni limiti di sicurezza che hanno reso arduo il cammino commerciale di questo prodotto.

Nella seconda tipologia,trattata in seguito e presa in considerazione in questo lavoro, vengono usati materiali elettrodici ad intercalazione, che possono accumulare e rilasciare elevate quantità di litio in maniera reversibile. L'anodo ha prestazioni inferiori a quelle del litio metallico, ma essendo meno reattivo, offre maggiore stabilità e sicurezza in uso.

Accumulatori al Litio-Ione

L'elemento caratterizzante è la presenza di un elettrolita liquido che impregna una matrice polimerica inerte avente la funzione di separatore.
Attualmente sono le uniche in commercio disponibili in quantità enormi, per il mercato consumer, mentre le altre tipologie sono per il momento limitate ad applicazioni di nicchia o in fase di studio in vista di un loro utilizzo più esteso [13].
L'elettrolita utilizzato è composto da uno o più solventi organici polari in cui vengono sciolti uno o più sali di litio come LiPF6, LiAlCl4, LiAsF6, ecc. Infatti il litio, essendo un metallo estremamente reattivo, reagisce violentemente con l'acqua; pertanto tutti i materiali usati in questi sistemi devono essere non acquosi e anidri ma nello stesso tempo polari per dissolvere il sale di litio [14].
I vantaggi delle litio-ione rispetto agli altri sistemi elettrochimici di accumulo sono moltissimi:

- Tensione molto alta (da 3 a 4.2 V)
- Alta densità di energia (fino a 530 Wh/l)
- Alta energia specifica (fino a 230 Wh/kg)
- Alta potenza specifica (fino a 500 W/kg per 20 s)
- Numero di cicli molto elevato
- Bassa autoscarica
- Lunga durata della carica dopo immagazzinamento
- Non presentano o hanno scarso effetto memoria

- Nessuna manutenzione (sono sigillate)
- Accettano cariche e scariche profonde 100% della capacità e 80% della potenza
- Spessori sottili
- Efficienza energetica maggiore del 90%

gli svantaggi presentano:

- Potenzialmente pericolose, necessitano di un microchip per evitare sovraccariche e sovrascariche
- Tempi di ricarica spesso troppo lunghi
- Costi ancora elevati rispetto agli altri accumulatori
- Necessità di controllo delle batterie (bilanciamento se più di 3 in serie)
- Invecchiamento crescente con il tempo di stoccaggio, la temperatura e lo stato di carica
- Temperatura di utilizzo compresa tra -20 e +40°C e solo occasionalmente superiore a +55°C.

2.3.2 Accumulatori a Volano

L'accumulo di energia elettrica viene tramite la traduzione della stessa energia cinetica rotazionale. Consiste in un rotore a sospensione magnetica, connesso ad un motore elettrico, posto all'interno di una camera a vuoto che ne riduce l'attrito. L'energia viene caricata e scaricata tramite il motore elettrico che aumenta la velocità di rotazione fornendo energia elettrica e inversamente estrae energia elettrica rallentandone la rotazione. Si tratta di sistemi ancora in fase di sperimentazione.

Nella maggior parte delle applicazioni viene utilizzato anche un convertitore di potenza per regolare la macchina elettrica e provvedere a un funzionamento in un range operativo più ampio. L'energia immagazzinata è data dalla seguente relazione:

$$W = \frac{1}{2} J \omega^2 \tag{2.1}$$

dove:

W: energia accumulata espressa in [J];

J: momento di inerzia della massa rotante espressa in $[kg * m^2]$;

ω: velocità angolare espressa in $[rad * s^{-1}]$.

Dalla formula si può notare come la capacità di accumulo può essere incrementata aumentando il momento di inerzia, il regime di rotazione o entrambi. I

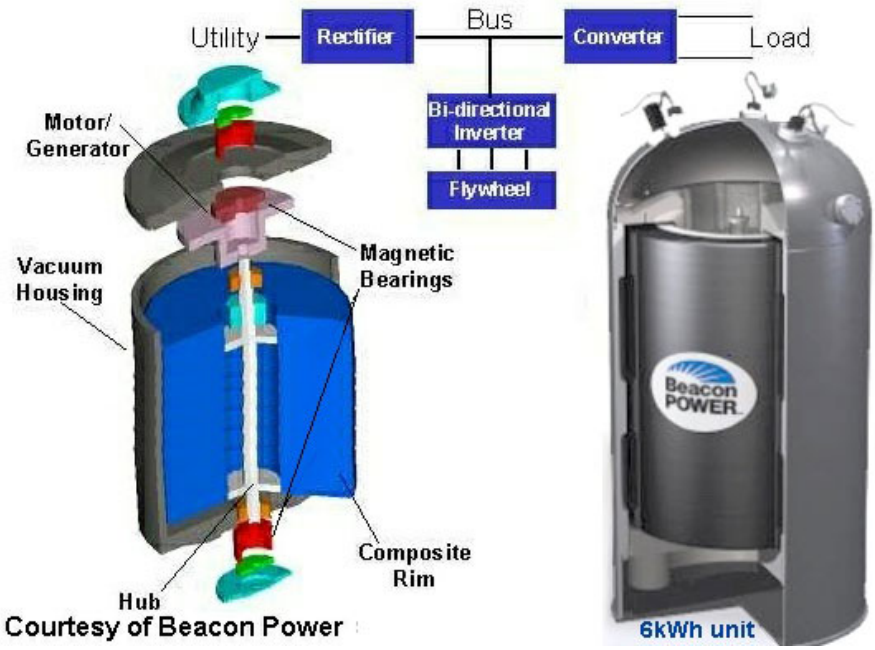


Figura 2.4. Volano da 6 kWh prodotto dalla Beacon Power

punti di forza di questa tipologia di accumulo sono:

- bassa manutenzione;
- lunga vita (20 anni o oltre 500.000 cicli);
- realizzazione con materiali inerti.

Questi sistemi vengono attualmente impiegati in installazioni con caratteristiche che spaziano dai 2kW / 6kWh per applicazioni nelle telecomunicazioni, sino ad 1MW per alcuni minuti di autonomia in applicazioni di potenza elevata. Un'applicazione che è stata sperimentata nell'ambito della trazione elettrica è a bordo di tram, per permettere ai mezzi il superamento di alcuni tratti eliminando i cavi di alimentazione (ad esempio le piazze nei centri storici). Sono stati utilizzati anche per il recupero dell'energia in frenatura nelle metropolitane.

Tuttavia al momento attuale, nonostante siano state sperimentate diverse applicazioni per questa tecnologia, l'interesse è diminuito principalmente per motivi di costo.

2.3.3 Accumulatori Idrici

Si tratta di impianti elettrici a bacino, dotati di turbine reversibili che, in casi di eccesso di produzione elettrica e nei periodi di basso carico (prezzo), permettono al fluido di risalire al bacino di monte (pompaggio) per poi essere di utilizzato per la produzione successiva. Nonostante questa tecnologia sia che sia caratterizzata da un LUEC : è il costo unitario di produzione costante sull'intera vita operativa dell'impianto) relativamente basso (circa 120€ / MWh) rispetto alle 20 altre tecnologie, la fattibilità risulta essere subordinata la possibilità di realizzare bacini artificiali o di sfruttare bacini naturali.

2.3.4 Accumulatori CAES

Il principio di funzionamento prevede la compressione dell'aria ed il successivo stoccaggio all'interno del serbatoio (naturale o artificiale); l'aria compressa viene poi riscaldata ed espansa all'interno di una turbina a gas collegata a un generatore. Sono sistemi caratterizzati da un LUEC *Levelized Unit Electricity Cost* relativamente basso rispetto alle altre tecnologie (120-140€ / MWh) ed in particolare rispetto alle batterie. Essi comunque presentano un indice ESOI estremamente conveniente [15] che potrebbe rendere questo sistema di accumulo predominante nelle sessioni di trasporto e nelle *Wind-Farm*

2.3.5 Batteria ad alta temperatura NaS

La caratteristica di questa tecnologia è il fatto che la temperatura di lavoro della cella si aggira attorno ai 300 °C, necessari sia per mantenere allo stato fuso gli elettrodi, sia per aumentare la conducibilità dell'elettrolita. Lo sviluppo di queste nuove tipologie di celle è stato spinto dall'esigenza di individuare coppie elettrochimiche in grado di fornire energie specifiche molto elevate senza ricorrere all'utilizzo di materiali eccessivamente pregiati e rari.

Il punto di forza di questa tecnologia è l'energia specifica molto più elevata di quella degli accumulatori con elettrolita acquoso (circa quattro volte quella di

un accumulatore al piombo), per tale motivo essa ha visto, a partire dagli anni '70, una notevole attività di ricerca e sviluppo principalmente per applicazioni su veicoli elettrici (ci sono state comunque applicazioni sperimentali anche nello stazionario).

Lo sviluppo della cella sodio/zolfo è stato iniziato dalla ABB e ripreso successivamente dalla giapponese NGK, che ha apportato diverse modifiche per ridurre il grado di pericolosità, arrivando alla commercializzazione della batteria a partire dal 2002. NGK produce celle sodio/zolfo utilizzate esclusivamente in moduli ad alta potenza per applicazioni nella distribuzione di energia elettrica (power quality, load-levelling, peak-shaving) e sono già presenti diverse installazioni di grossa dimensione negli Stati Uniti e in Giappone.

La tensione a circuito aperto della cella di una batteria NaS è compresa tra i 2.05V ed i 2.1V alla scarica del 60-75%. Raggiunto questo punto, la tensione a circuito aperto inizia a diminuire linearmente fino alla fine del ciclo, dove misura 1.8V. La figura 2.5 mostra una tipica cella NaS prodotta da NGK. Come si vede l'elettrodo negativo di Sodio, posizionato al centro della cella, è circondato dalle elettrolita beta allumina, che a sua volta è racchiuso dall'elettrodo positivo di zolfo. Inoltre, la batteria NaS presenta anche un'alta efficienza energetica.

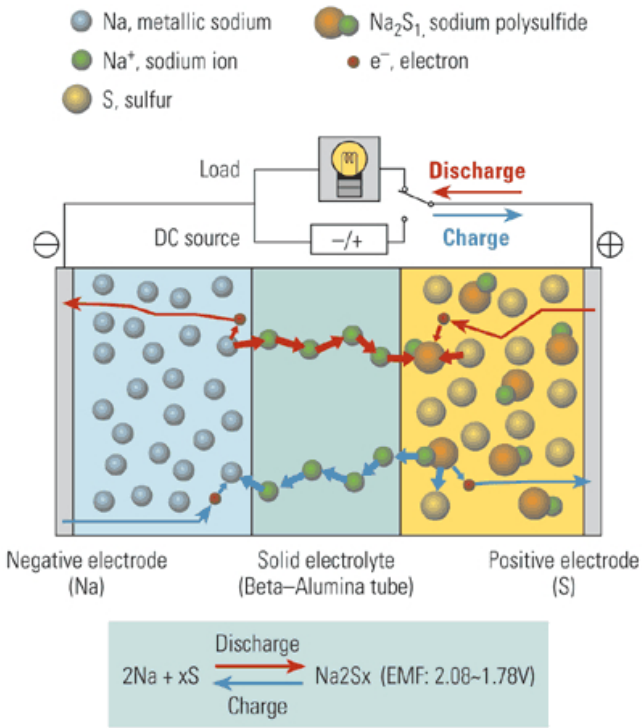


Figura 2.5. Struttura di una batteria NAS (Fonte: NKG)

Secondo la NGK, i modelli disponibili commercialmente sono tarati per un efficienza pari all'85%. Sono tuttavia presenti dei modelli che presentano un efficienza energetica dell'89%. Se paragonate alle altre tecnologie come NiCd, NiMH di piombo acido che mostrano efficienze intorno al 75%, il risultato di questi sistemi è decisamente impressionante. Il rendimento complessivo della NaS, tenendo conto delle perdite nel trasformatore e nell'inverter, può assumersi pari all'82,5%, e questo è una delle giustificazioni per la scelta della tecnologia NaS in sistemi di accumulo dell'energia su larga scala.
Uno degli aspetti più interessanti della cella sodio/zolfo è il rendimento amperometrico praticamente unitario, grazie alla mancanza di reazioni parassite.

2.3.6 Applicazioni nelle reti elettriche

In generale, nonostante le interessanti prospettive di sviluppo, i sistemi di accumulo sono ancora scarsamente utilizzati nelle reti elettriche ad esclusione dei sistemi convenzionali basati sui bacini di pompaggio dell'acqua.

La figura 2.6 mostra la capacità totale dei sistemi di accumulo nelle reti

Sistema di accumulo	Potenza installata
Pompaggio di acqua	110.000 MWe
CAES	440 MWe
Batteria NaS	365 MWe
Batteria Piombo-acido	≈35 MWe
Batteria Nichel-Cadmio	27 MWe
Batteria Litio-ione	≈ 16 MWe
Batteria Redox a flusso	< 3 MWe

Figura 2.6. Applicazioni dei sistemi di accumulo nelle reti elettriche (Fonte: Fraunhofer Institute)

elettriche. I sistemi con pompaggio di acqua, che sono tradizionalmente utilizzati nella generazione centralizzata, coprono oltre il 99% delle applicazioni attuali. E' evidente come le potenzialità delle applicazioni alla generazione distribuita ed alle future "smart grids" sono ancora da sviluppare ed ampliare, come già ipotizzato nella figura 2.7. Nel caso dell'accumulo elettrochimico, sono diverse le batterie in competizione tra di loro, con una chiara prevalenza attuale delle batterie sodio zolfo (figura 2.6)

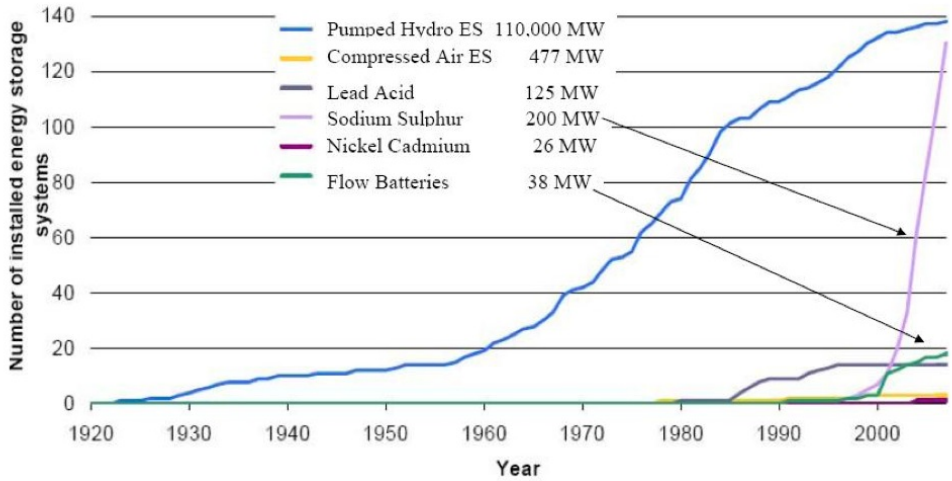


Figura 2.7. Evoluzione mondiale dei sistemi di accumulo fino al 2007 (Fonte: Fraunhofer Institute)

I sistemi di accumulo elettrico sono tradizionalmente impiegati come alimentazione di emergenza in mancanza di rete per garantire servizi essenziali a carichi privilegiati (sale operatorie, sicurezza in impianti industriali, centrali di produzione dell'energia, ecc.) e per l'alimentazione di sistemi isolati sia a terra che a bordo di navi, aerei, treni. Una delle più comuni applicazioni delle batterie al piombo è l'avviamento dei motori a combustione interna. Gli accumulatori di piccola taglia sono utilizzati per l'alimentazione di piccoli elettrodomestici (laptop, telefoni cellulari, cordless, ecc.).
I gruppi di continuità elettrica – UPS (Uninterruptible Power Supply) sono fra le prime applicazioni industriali che hanno avuto bisogno di un sistema per l'accumulo di energia. Essi tipicamente presentano potenze anche fino ad 1 MW con autonomie che vanno da pochi minuti a qualche ora e sono generalmente chiamati all'erogazione quando viene a mancare l'alimentazione principale e ciò può succedere anche molto raramente.

Le batterie al litio sono ormai un prodotto commerciale per le applicazioni all'elettronica di consumo (sistemi portatili come, ad esempio, telefoni cellulari, notebook, videocamere digitali e così via), mentre è ormai realtà l'estesa utilizzazione nei veicoli a trazione elettrica. Pertanto l'offerta commerciale e prototipali di queste batterie è estesa a numerosi costruttori europei, americani e asiatici.

In questo momento, a livello nazionale le batterie al litio sono proposte in alcune sperimentazioni su taglie abbastanza limitate.

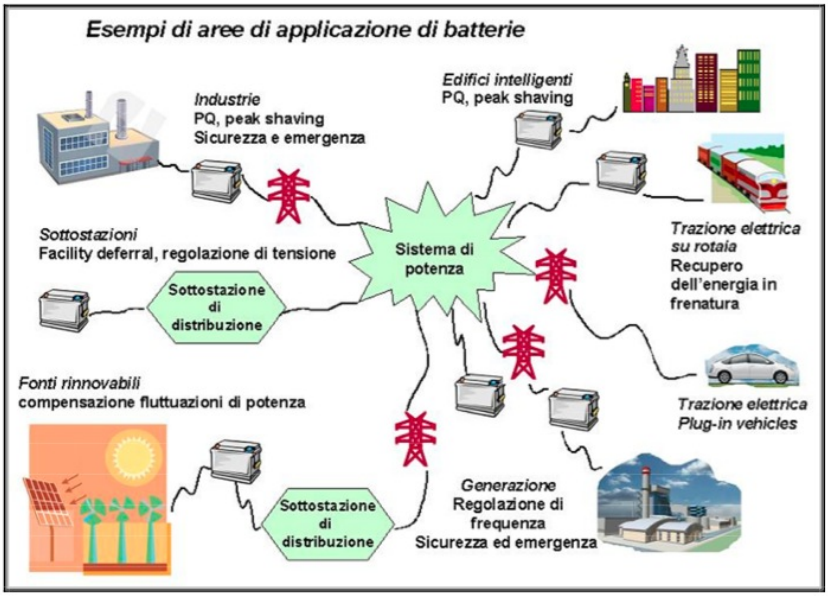


Figura 2.8

Negli Stati Uniti, promossi dal DOE (Department of Energy),vi è lo sviluppo di un sistema di accumulo da 20 MW con batterie da 2 MW nello stato di New York.

Tuttavia, le applicazioni attuali delle batterie al litio sono ancora abbastanza limitate e frammentate per avere un quadro completa della piena applicabilità della tecnologia e dei vantaggi ad essa associati. In aggiunta è abbastanza evidente dalle esperienze e conoscenze attuali che le batterie a base di litio presentano problemi di sicurezza nelle fasi di fabbricazione, uso e riciclaggio, che richiedono raffinate logiche e tecnologie elettroniche di gestione e controllo. Questi problemi non sono ancora ben esplorati nel caso in cui si tratta di produrre e assemblare sistemi di grandi dimensioni, che sono quelli che potranno utilizzarsi nelle reti elettriche.

2.4 Le MicroTurbine a Gas

Nell'ottica di decentrare la produzione dell'energia, gli elementi di cogenerazione sono stati valutati come complemento e sussidio ai sistemi di accumulo in ambito residenziale o locale.
In special modo si è concentrata la ricerca sulle micro-turbine a Gas (MTG).

Le micro-turbine a gas rappresentano una soluzione di grande attualità per la generazione di energia meccanica o elettrica nel campo delle piccole potenze (fino a circa 100 kW). In tal senso, tali macchine si prestano ad applicazioni di generazione e di cogenerazione "distribuita", in quanto l'energia meccanica (ed, eventualmente, termica) prodotta si intende disponibile direttamente per un'utenza locale.

Come detto le potenze tipiche delle MTG vanno dai pochi kW fino a circa 100 kW, ma sono di grande interesse emergente micro-turbine di taglia ancora più piccola, usualmente denominate "Ultra micro-turbine a gas" (UMTG) le cui potenze vanno da pochi Watt fino a un massimo di un 1 kW. Le UMTG trovano applicazione in molti casi di azionamenti meccanici o generazione elettrica per i quali sono richiesti al sistema generatore dell'energia minimo peso e ingombro, assieme a una soddisfacente autonomia di funzionamento. Le UMTG risultano competitive con dispositivi elettrici alimentati a batteria, grazie al loro minore peso. In prospettiva si prevede, ad esempio, l'impiego di UMTG per l'alimentazione elettrica di dispositivi elettronici portatili o per l'azionamento di "robot" per lavorazioni meccaniche.

Le figure mostrano esempi di micro-turbine da 1 a 2.5 kW e in esse si notano già alcune peculiarità tipiche delle MTG:

- Basso rapporto di compressione, realizzato con un unico compressore radiale ($\beta = 2 - 4$)

- Necessità di ciclo rigenerativo per raggiungere rendimenti accettabili

- Velocità di rotazione ben più elevate di quelle delle turbine a gas tradizionali

In particolare, una macchina da 1 kW, impiega turbomacchine dal diametro di periferia di circa 2 cm e la velocità periferica necessaria al trasferimento di energia meccanica si raggiunge con velocità di rotazione di circa 400000 giri /min. Le MTG in figg. 2.9 e 2.10 realizzano ambedue la potenza di 2.5 kW, ma la prima (di nuovissima generazione) opera a una velocità di rotazione di 250000 giri/min. La seconda (in fig.2.10) è realizzata secondo una tecnologia meno spinta e la sua velocità di rotazione nominale è di 100000 giri/min. In questo caso, il diametro delle turbomacchine è più elevato, così come le dimensioni degli altri componenti (camera di combustione, scambiatore rigenerativo, etc.).

ne consegue che l'ingombro e il peso di questa seconda MTG sono decisamente superiori.

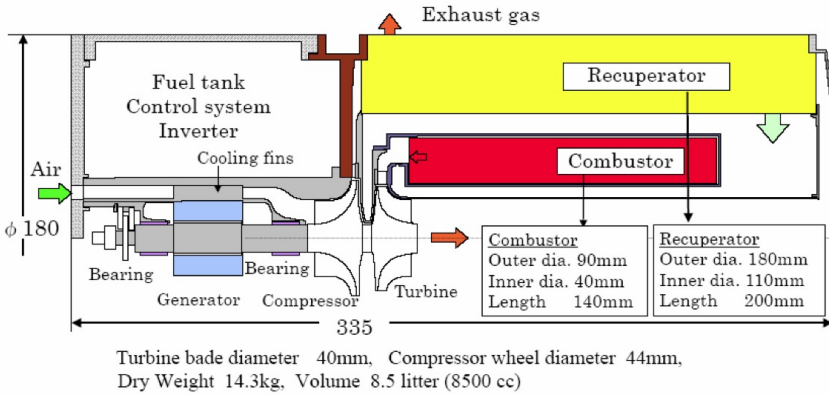
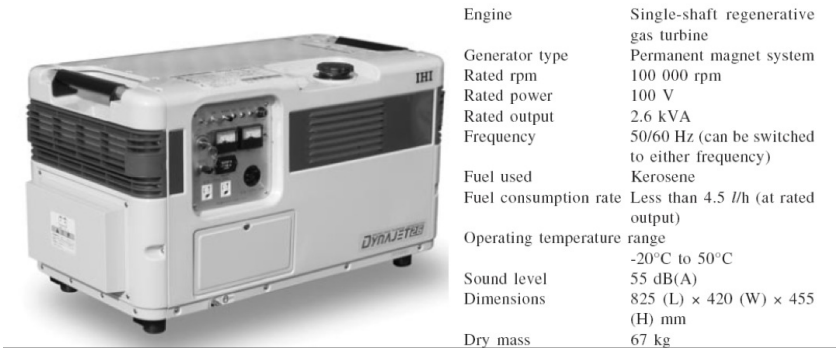


Figura 2.9. Schema di una micro-turbina a ciclo rigenerativo da circa 2.5 kW



Engine	Single-shaft regenerative gas turbine
Generator type	Permanent magnet system
Rated rpm	100 000 rpm
Rated power	100 V
Rated output	2.6 kVA
Frequency	50/60 Hz (can be switched to either frequency)
Fuel used	Kerosene
Fuel consumption rate	Less than 4.5 *l*/h (at rated output)
Operating temperature range	-20°C to 50°C
Sound level	55 dB(A)
Dimensions	825 (L) × 420 (W) × 455 (H) mm
Dry mass	67 kg

Figura 2.10. Gruppo generatore con MTG da circa 2.5 kW

Le principali caratteristiche comuni a buona parte delle micro turbine a gas possono essere così sintetizzate:

- La MTG può essere competitiva con altri dispositivi di analogo livello di potenza (ad esempio motori diesel) a condizione che i suoi costi di realizzazione siano contenuti. Se tale obiettivo è raggiunto, la MTG può risultare preferibile per applicazioni cogenerative e per la maggiore facilità di utilizzo di combustibili gassosi sintetici derivanti dal trattamento di biomasse o rifiuti solidi.

- L'obiettivo di costi contenuti non può essere raggiunto riproducendo in scala turbine a gas di taglia maggiore. A titolo di esempio, una MTG da 100 kW ottenuta per similitudine da una di 100 MW comporterebbe

la riduzione di tutte le dimensioni secondo un fattore di scala di 33.3 (si ricorda che, in condizioni di similitudine, le potenze variano secondo il quadrato del fattore di scala). Una simile scelta comporterebbe la realizzazione di componenti miniaturizzati, ad esempio di compressori e turbine assiali multistadio dalle dimensioni estremamente ridotte, così come di dettagli di particolare importanza come i circuiti di raffreddamento della turbina, facendo crescere in modo inaccettabile i costi.

- L'elevata velocità di rotazione (come visto, sempre superiore ai 50000 giri/min) comporta, nel caso di accoppiamento della micro turbina con un alternatore convenzionale, l'impiego di un riduttore di velocità. Si ricorda infatti che un alternatore a una coppia di poli ha una velocità di sincronismo di 3000 o 3600 giri/min (a seconda della frequenza di rete a 50 o 60 Hz) secondo la relazione: $a = 1$ L'elevato rapporto di trasmissione del riduttore comporterebbe perdite meccaniche aggiuntive che penalizzerebbero ulteriormente il rendimento globale.

Un alternatore tradizionale ha una coppia di poli ha una velocità di rotazione di 3000 o 3600 giri/min, a seconda della frequenza di rete, a 50 o 60 Hz. L'accoppiamento con l'alternatore richiederebbe quindi un riduttore di velocità con rapporto di trasmissione di circa 21:1 (o 18:1). Questo ulteriore componente aggiungerebbe peso e ingombro all'impianto e sarebbe causa di perdite che abbasserebbero il valore del rendimento meccanico e quindi di quello globale. La soluzione più attuale ed efficiente è rappresentata dai generatori ad alta velocità e a frequenza variabile, con conversione elettronica della frequenza al valore desiderato.

Capitolo 3

Storage Management

L'utilizzo dei dispositivi di accumulo dell'energia nelle abitazioni e' una delle principali soluzioni per potenziare il risparmio energetico, favorire lo sviluppo di impianti di generazione distribuita da fonti rinnovabili e ridurre la dipendenza dai combustibili fossili nelle future reti intelligenti. D'altra parte se tutti i dispositivi di micro-accumulo fossero caricati nello stesso momento utilizzando l'alimentazione della rete elettrica, si avrebbe un innalzamento significativo della domanda di elettricità che si tradurrebbe nella necessità di avere una capacita di generazione piu elevata e quindi in maggiori emissioni di anidride carbonica, arrivando nel caso peggiore a determinare interruzioni del servizio elettrico per eccessivo sovraccarico.

3.1 Scenario di riferimento

L'accumulo di energia è una delle premesse essenziali per la progettazione e realizzazione di una Smart Grid, ovvero di una infrastruttura intelligente in grado di erogare energia in modo sostenibile a livello mondiale. Partendo da questo presupposto, le comunità scientifica e industriale hanno focalizzato gran parte delle loro attività sulla produzione di nuovi dispositivi di storage a basso costo in grado di immagazzinare l'energia elettrica in modo efficiente per lunghi periodi di tempo e di sostenere un elevato numero di cicli di carica e scarica senza avere degradazioni eccessive delle prestazioni. L'utilizzo massiccio di questi dispositivi nel sistema elettrico può portare a dei miglioramenti significativi delle modalità di consumo dell'energia nelle società industrializzate.

L'adozione di sistemi di accumulo nelle abitazioni civili per alimentare gli elettrodomestici nelle ore di maggior consumo dell'elettricità (tipicamente al mattino e alla sera), può essere sfruttata, infatti, per diminuire il picco nella domanda di energia, ridurre il numero di impianti di generazione ad alta capacità e conseguentemente abbassare i costi energetici e le emissioni di anidride carbonica. Gli apparati di storage consentono, inoltre, di compensare le fluttuazioni della quantità di energia elettrica generata da fonti rinnovabili (solare, lica), facilitando l'integrazione nella rete elettrica esistente dei nuovi sistemi di generazione ecosostenibili [16]. L'eolico e il fotovoltaico sono, infatti, fonti non programmabili, la cui produzione è legata alle condizioni atmosferiche. I loro picchi produttivi non coincidono con le richieste di carico della rete e richiedono il disaccoppiamento temporale della generazione ed utilizzazione dell'energia. Questa problematica viene risolta dai dispositivi di storage che consenteno di re-inniettare in rete nei momenti di maggior carico l'elettricità prodotta nei periodi di minore domanda. La necessità di disporre di una capacità di accumulo nelle smart grid sufficientemente elevata e distribuita da supportare rapidi servizi di regolazione e bilanciamento della domanda può essere compensata in modo parziale dalla tecnologia V2G che sviluppa l'interazione bidirezionale *Voehicle to Grid* tra la rete e le vetture elettriche :EV (Electric Vehicle) o PHEV (Plug in Hybrid Electric Vehicle). L'introduzione nei prossimi anni di milioni di vetture elettriche e di veicoli elettrici ibridi direttamente collegabili alla rete, se da un lato pone delle sfide al sistema elttrico per la gestione di numerose centraline di ricarica, dall'altro consente di disporre di uno sciame di piccoli dispositivi di accumolo di energia che possono essere usati per sostenere i picchi di rete (*spinning reserve*) e controllare la qualità dell'energia prodotta quando gli autoveicoli sono parcheggiati, il che avviene per circa l'80% del tempo [17, 18]. La tecnologia V2G e più in generale l'uso di accumulatori nelle abitazioni richiede necessariamente lo sviluppo di adeguati sitemi di controllo e ottimizzazione dei cicli di carica e scarica per evitare blackout o dannni all'infrastruttura elettrica qualora tutti gli individui decidessero di ricaricare i loro dispositivi contemporaneamente, ovvero una crescita eccessiva della fattura energetica per il singolo individuo nel caso in cui l'immagazzinamento avenisse nelle fasce orarie in cui il prezzo dell'elettricità di rete è elevato.

Il tema di ricerca sviluppato in questa tesi ha teso a sviluppare un agente

intelligente per la gestione dello storage domestico al fine di ottimizzare i cicli di carica e scarica delle batterie all'interno della singola abitazione in presenza di impianti di generazione fotovoltaica. Il fine è ridurre la fattura energetica dell'utente. Nel modellamento di questo sistema di controllo non sono stati posti particolari vincoli ma si è assunto che il controllore delle unità di storage domestiche possa avere la massima liberta di acquistare e rivendere energia alla rete in funzione del prezzo orario deciso dal provider.

3.2 L'Agente controllore

Un agente è un sistema intelligente in grado di decidere e svolgere azioni in modo indipendente per conto del suo utente o proprietario reagendo agli eventi esterni al fine di soddisfare gli obiettivi di progetto. Prendendo in esame una rete elettrica di tipo residenziale che integra un impianto fotovoltaico, con produzione media giornaliera tra 0,4 e 0,6 kWh a metro quadro, e un sistema di accumulo agli ioni di litio con capacita 2kW è stato modellato nell'ambiente MatLab® uno smart agent capace di controllare in modo ottimale la carica e la scarica della batteria utilizzando sia la corrente di rete che quella fotovoltaica. Lo smart agent a seconda delle ore del giorno, della domanda di carico proveniente dalla rete, del costo orario dell'energia e dello stato di carica della batteria decide se ricaricare o meno il dispositivo di accumulo e sceglie la fonte di energia per la carica.
Inoltre, in presenza di carichi programmabili e translabili nel tempo il sistema provvederà a risolvere il problema di scheduling al fine di massimizzare il ciclo di vita della batteria, minimizzare i costi energetici per l'utente e sagomare la domanda di energia. E' stato previsto che lo smart Agent scambi messaggi con lo smart meter per avere in tempo reale informazioni sul consumo di energia e sulla produzione fotovoltaica. L'obbiettivo è evitare i picchi di assorbimento, grazie all'alimentazione del carico con la batteria quando la potenza richiesta è superiore ad una certa soglia e la produzione di energia fotovoltaica non è sufficiente.

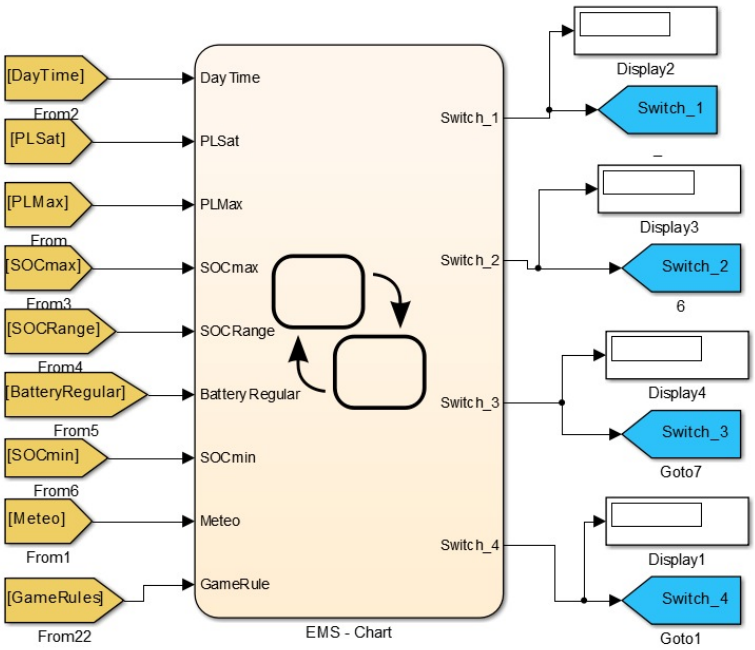


Figura 3.1. Controllore Simulink

DayTime: distingue le due diverse fasce di prezzo dell'energia (F1 ed F23)

PLSat: verifica se la produzione dell'impianto fotovoltaico é sufficiente a soddisfare il carico dell' utenza

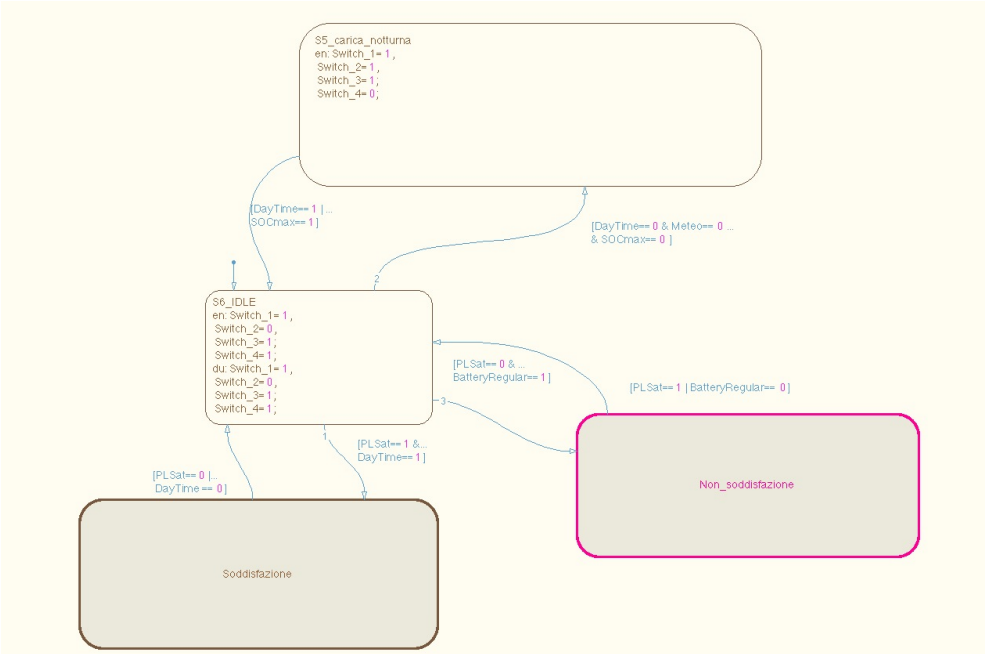
PLMax: controlla se la richiesta del carico é superiore alla potenza contrattuale dell'utenza

SOCmax: identifica lo stato di carica completa della batteria

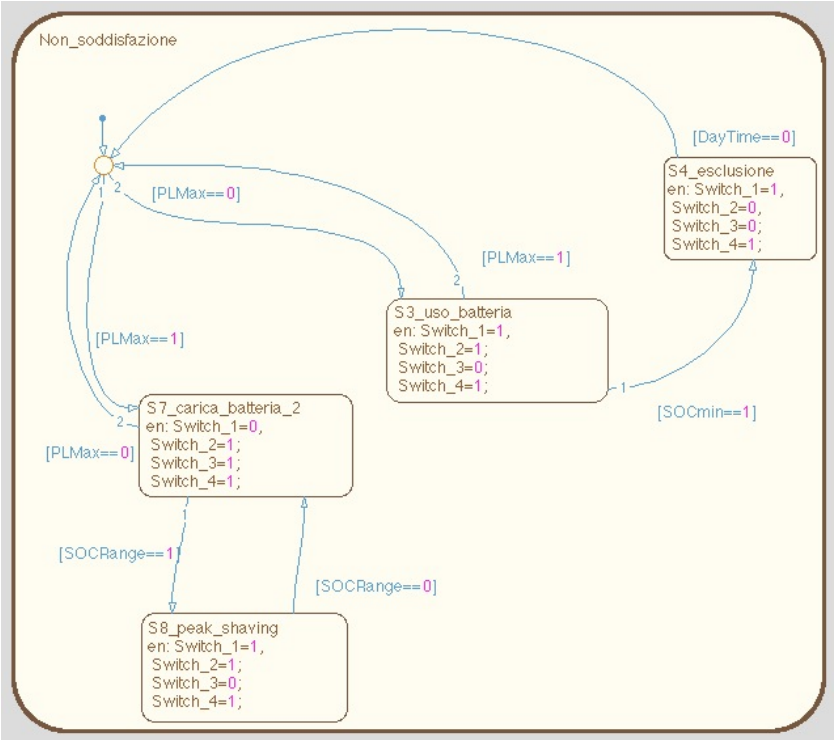
SOCRange: identifica lo stato della batteria in un range predefinito di carica quasi completa, tra l'80% ed il 90% (necessario in tutti quei casi in cui il sistema di accumulo sia utilizzato per il peak shaving)

BatteryRegular: identifica la carica della batteria nel range utile per il suo utilizzo (SOC>40%)

SOCmin: identifica lo stato di scarica, secondo il limite imposto per il raggiungimento di un certo n° di cicli (con il nostro accumulatore un SOCmin=40% garantisce un minimo di 10000 cicli)



(a) *La macchina a stati del controllore*



(b) *Sub stato di non soddisfazione*

L'accumulatore

Il sistema di accumulo è stato modelato tramite i parametro caratteristici di un sistema di accumalazione fornito dalla SAFT.

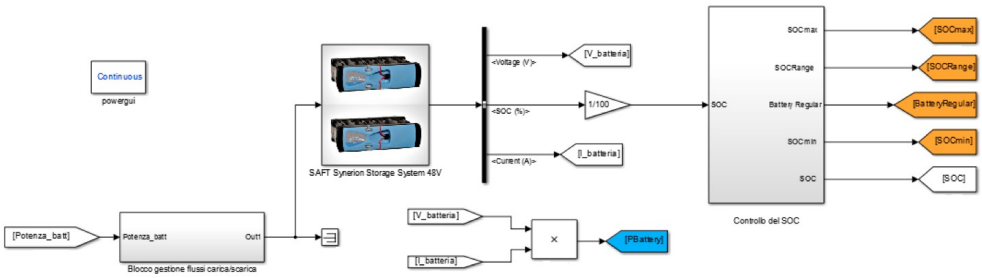


Figura 3.2. Modello sistema di accumulo al Litio

L'impianto fotovoltaico

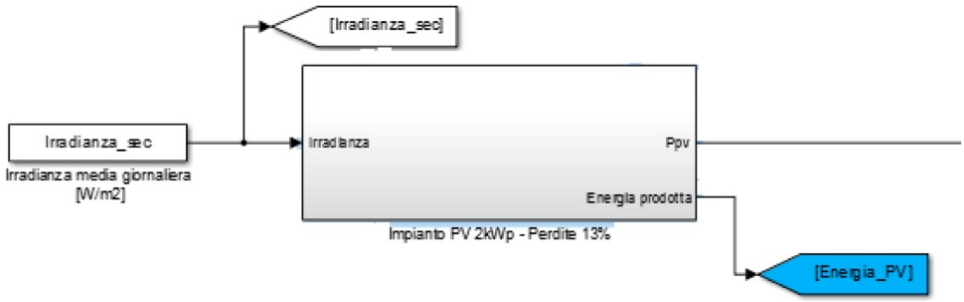


Figura 3.3. Modello impianto PV da 2kWp

I dati di Irradianza media giornaliera utilizzati (l'irradianza G è la potenza per unità di area proveniente direttamente o indirettamente dal sole [W/m2]), sono raccolti e resi fruibili per Matlab dal PVGIS [19], un database di dati di irraggiamento solare (l'irraggiamento H è l'energia per unità di area proveniente direttamente o indirettamente dal sole [kWh/m^2 o MJ/m^2]) collegato ad un interfaccia web promosso e realizzato dalla Commissione Europea.

I dati, prelevati in formati *.txt* dalla web PVGIS vanno elaborati con l'utilizzo di una funzione MatLab implementata all'uopo che li memorizza in una matrice 86400x2 *Irr_sec* contenente sulla prima colonna un vettore colonna (1 : 1 : 86400) rappresentativo dei secondi di una giornata ed sulla seconda colonna il vettore colonna di 86400 valori desunti dai dati del PVGIS. In uscita avrò la potenza istantanea in kW prodotta dall'impianto Ppv e l'-Energia prodotta in kWh considerando le perdite dell'impianto del 13% causate da temperatura, sporcizia, conversione DC-AC etc.

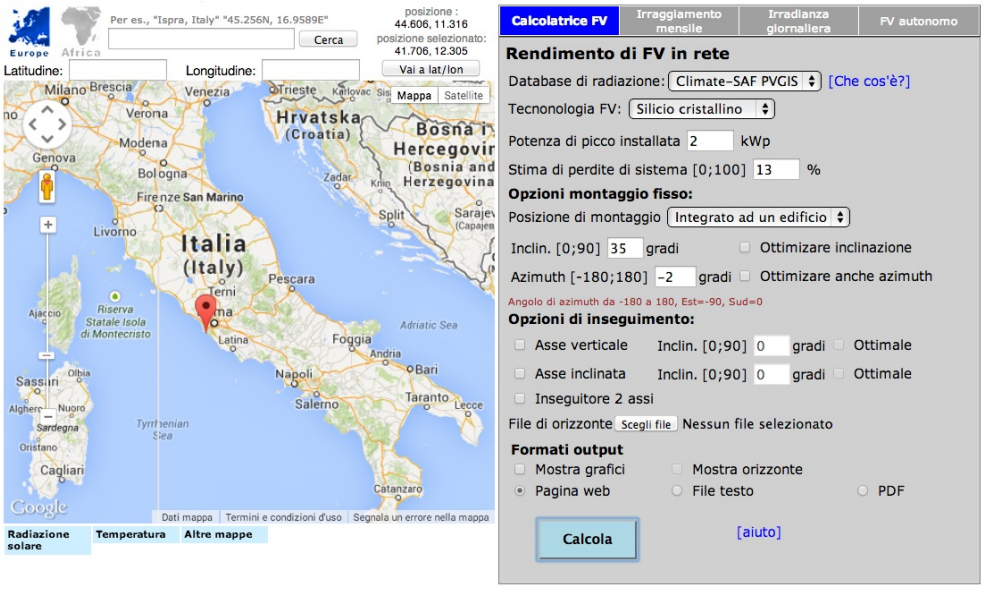


Figura 3.4. Interfaccia web PVGIS

3.3 Formulazione del modello matematico per l'ottimizzazione dello storage

Per definire il modello dell'agente intelligente si è ipotizzato che il sistema di controllo pianifichi la stategia di storage su finestre temporali di 24 ore. L'asse dei tempi si assume discretizzato in T intervalli temporali di durata Δt. Ogni giorno, l'unità residenziale presenta un profilo di consumo energetico ed un profilo stimato di generazione da fonti rinnovabili. Per soddisfare i suoi fabisogni energetici l'unità utilizza parte dell'energia immagazzinata nelle batterie e parte dell'energia acquistata da un provider di servizi elettrici che modula il prezzo di vendita dell'energia su base oraria in funzione dei costi di produzione e della domanda complessiva all'interno dell'area servita dalla smart grid. Si assume che il prezzo orario dell'energia abbia un andamento concavo rispetto alla domanda totale di elettricità per ciascun intervallo temporale Δt, in modo da scoraggiare gli utenti a consumare elettricità negli intervalli di maggior carico per la rete e bilanciare la produzione con la domanda di energia [20] (figura 3.5). Nei sottoparagrafi che seguono sono descritti il modello per l'agente di controllo dell'unità di accumulo dell'energia (ovvero il giocatore razionale del gioco energetico formulato) e le metriche per modulare il prezzo dell'energia e per valutare la sostenibilità ambientale complessiva .

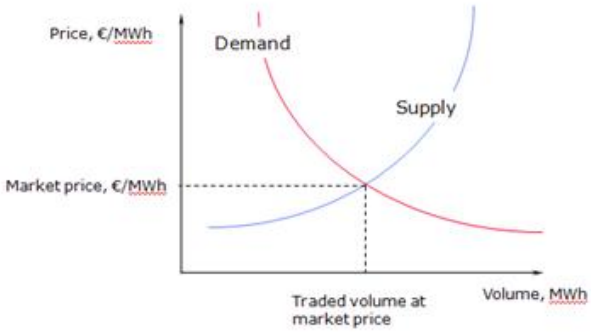


Figura 3.5. Modello della curva di prezzo dell'energia dettata dal mercato elettrico.

3.3.1 Agenti di controllo dell'unita di accumulo residenziale

In questo lavoro si indica con N_A l'insieme degli agenti che gestiscono i dispositivi di storage di ciascuna unità abitativa RU. Ogni unità è connessa alla rete del provider di elettricità tramite uno smart meter che regola il flusso bidirezionale di potenza e di informazioni. L'obiettivo perseguito dall'agente software $N_a \in N_A$ è quello di minimizzare il suo payoff andando ad accumulare energia quando i prezzi sono più bassi e a consumare l'energia accumulata nella batteria quando i prezzi sono più alti.
Ne segue che ogni agente software N_a deve individuare la strategia più opportuna con cui andare a caricare o scaricare i dispositivi di storage. Ora poichè il prezzo pagato da ciascuna RU dipende dal carico aggregato di tutta l'area geografica ovvero dalle strategie di accumulo $\sum_{k \in N_A} b_{i,k} = s_i$ e dal fabisogno energetico di tutti gli altri consumatori, l'agente deve decidere il suo profilo di accumulo sulla base di un prezzo di mercato predetto sulla base delle tariffe dei giorni precedenti utilizzando un algoritmo a media mobile.

Per ogni RU viene definito il profilo di carico energetico per time slot come

$$l_i(h) = e_i\,(h) - g_i(h) + b_i(h) \tag{3.1}$$

dove:

e_i Rappresenta il profilo di consumo dell'utente residenziale

g_i Rappresenta il profilo di auto-produzione dell'utente.

b_i Costituisce il profilo del dispositivo di storage controllato dall'agente N_a

3.3.2 Metrica per la definizione del prezzo dell'energia e la sostenibilità ambientale

Per studiare gli effetti dello storage sul sistema elettrico e valutarne l'impatto ambientale sono state prese in considerazione tre metriche standard del mercato elettrico:

- il *fattore di diversità*
- il *fattore di carico*
- la quantità di CO_2 generata dalla rete, valutata come g di CO_2/kWh erogato dalla rete.

Per valutare il fattore di emissione medio di CO_2 la fonte di riferimento è ISPRA che ogni anno redige un inventario nazionale delle emissioni di CO_2. Il dato più recente sul fattore g è fornito sul *NIR Italy* 2012 e viene ricavato calcolando il fattore di emissione semplificato di CO_2 per l'anno *year* in t/MWh tramite la formula seguente:

$$EF_{grid,year} = \frac{\sum_k \sum_i (FC_{k,i,year} \cdot NCV_{k,year} \cdot EFCO2_{k,year})}{\sum_i EG_{i,year}} \tag{3.2}$$

dove si sono indicati con: $FC_{k,i,year}$ la quantità di combustibile di tipo k consumato dall'impianto di generazione di elettricità i nell'anno *year*; $NCV_{k,year}$ il potere calorifico inferiore del combustibile fossile di tipo k nell'anno *year* misurato in GJ per unità di massa o di volume; $EFCO2_{k,year}$ il fattore di emissione di CO_2 del combustibile fossile di tipo k nell'anno *year* misurato in t/GJ; $EG_{i,year}$ la quantità di energia elettrica in MWh immessa nella rete dall'impianto i nell'anno *year*.

Capitolo 4

Controllo dello storage nelle Smart-Grid

4.1 Premessa

Gli ultimi studi del *National Renewable Energy Lab* sullo stato di sviluppo delle energie rinnovabili nel mondo, evidenziano che l'Italia si colloca al secondo posto nel mondo in termini di capacità fotovoltaica dopo la Germania e davanti agli USA. Questo dato, unito alle limitazioni degli incentivi per le energie rinnovabili (in particolare il fotovoltaico) previste nel Quinto Conto Energia, e al progressivo aumento del costo dell'energia tradizionale, porta a ritenere che il fotovoltaico si svilupperà dal 2014 essenzialmente in ambito residenziale ponendosi al servizio diretto dell'autoconsumo. I sistemi di accumulo distribuiti forniscono d'altra parte un contributo significativo alla valorizzazione ed integrazione delle fonti rinnovabili non programmabili (fotovoltaico in primis) nell'ecosistema elettrico, in quanto consentono di disaccoppiare la generazione dal dispacciamento ed utilizzo dell'energia autoprodotta. Ne consegue che l'affermarsi a livello residenziale di sistemi di generazione fotovoltaica destinati all'autoconsumo in Italia e in Europa produrra come effetto la diffusione nei prossimi di dispositivi di storage di capacità medio/piccola. Questi sistemi uniti alla diffusione della mobilità elettrica richiedono una revisione del paradigma di interfacciamento dei consumatori con la rete principale e al tempo stesso necessitano di sistemi automatici di gestione "intelligente" dell'energia accumulata e consumata all'interno delle unità abitative e delle aree residenziali per conseguire il massimo sfruttamento dell'energia rinnovabile prodotta, la

massimizzazione dell'efficienza, la riduzione dei costi per gli utenti.

Il questo capitolo ci si propone di dare una risposta a questo problema focalizzandosi sullo sviluppo di un sistema di controllo e gestione dei dispositivi di micro-accumolo per l'ottimizzazione delle modalità di utilizzo delle risorse energetiche disponibili al fine di rendere efficiente il funzionamento dell'intero sistema elettrico. Il fondamento teorico della logica di controllo proposta è costituito dalla teoria dei giochi. I principi e le tecniche di questa disciplina sono state, infatti, utilizzate per andare ad individuare le strategie ottimali di stoccaggio dell'energia nelle batterie tenendo conto sia del carico della rete elettrica sia delle condizioni di mercato dell'energia. L'obiettivo del sistema di controllo ideato è ottenere un risparmio economico per i consumatori che utilizzano dispositivi di stoccaggio dell'energia e potenziare l'affidabilità e la sicurezza del sitema elettrico.

L'approccio seguito è stato quello di adottare il paradigma dei sistemi distribuiti multi-agente che interagiscono tra loro in modo da massimizzare la loro utilità nell'ambito del mercato elettrico. L'interdipendenza complessa tra il prezzo dell'energia ed i cicli di carica e scarica dei dispositivi di storage dei consumatori di elettricità può essere modellata ricorrendo alla teoria dei giochi proposta da Nash e Aumann. L'avvento degli smart meter per monitorare e gestire il consumo elettricoi nelle abitazioni residenziali e commerciali, rende ragionevole ipotizzare l'installazione di agenti software direttamente all'interno degli smart meter per regolare in modo razionale i cicli di carica e scarica delle batterie consumo. Questi agenti intelligenti hanno lo scopo di ottimizzare i profili di utilizzazione e stoccaggio dell'energia nelle abitazioni avvalendosi di informazioni di diversa natura, quali i dati sul costo orario dell'elettricità forniti dal provider o le previsioni atmosferiche per la stima dell'energia che può essere generata da eventuali fonti rinnovabili (micro turbine eoliche o pannelli fotovoltaici).

La logica di funzionamento dell'agente intelligente prevede l'interazione di più unità di controllo domestiche nell'ambito di una smart grid. Per modellare il comportamento razionale dei sistemi di controllo dei dispositivi di accumulo e per tener conto degli effetti sul carico elettrico complessivo della rete si è utilizzata la teoria dei giochi. Seguendo i principi teorici di Nash il funzionamento dell'agente intelligente di ogni unità domestica seleziona sempre la strategia di stoccaggio e consumo dell'energia che minimizza il

payoff del consumatore a seconda delle scelte di accumulo effettuate dagli altri consumatori della rete che possono far variare il prezzo orario dell'energia.

4.2 Game Engineering nelle Smart-Grid

In una rete elettrica come descritta nel capitolo 1 è naturale prevedere la presenza di diversi Smart Agent che gestiscono i dispositivi di accumulo e la presenza di più fonti di energia rinnovabile, un caso tipico è quello di un campus universitario con diverse sottoreti elettriche interconnesse tra loro.
Tale contesto induce a considerare un sistema multiagent in cui alcuni agenti interagiscono tra loro secondo logiche di tipo cooperativo o non cooperativo in funzione degli obiettivi di progetto. Per interagire con successo con gli altri nodi della rete è necessario dotare lo smart agent di funzionalità di cooperazione, coordinazione, e negoziazione che implementano specifiche strategie di gioco. Questo presupposto ha motivato lo studio nel corso del dottorato dei fondamenti teorici della Teoria dei giochi cooperativi e non cooperativi. Sono stati analizzati nello specifico i giochi con strategia dominante, Maxmin, Backward Induction, i giochi dinamici, i giochi evoluzionari e i giochi a coalizione semplice.

Un aspetto che va tenuto in forte considerazione è la non equivalenza tra *Ottimizzazione* e *Teoria dei Giochi*.

Potremmo definire:

Definizione 1. *Ottimizzazione*: Ricerca dell'obiettivo tramite minimizzazioni di funzionali o applicazione di appropriati algoritmi di ricerca.

Definizione 2. *Teoria dei Giochi*: Predisposizione all'equilibrio ottimale di un sistema attraverso evoluzione autonoma.

4.3 La Teoria dei Giochi

La teoria dei giochi è stata applicata al DSM nelle Smart-Grid in quanto è utile nella progettazione di sistemi distribuiti. In [21], gli autori hanno usato la teoria dei giochi per modellare un problema DSM in una Smart-Grid dove i clienti programmano i loro profili di consumo energetico per ridurre al minimo il pagamento totale di energia. Tuttavia, tutti gli utenti devono scambiare i loro profili di consumo energetico tra loro in una rete peer-to-peer, che non è

una soluzione facilemente realizzabile e può presentare varie problematiche di sicurezza [10].
In pratica, gli utenti, nell'attuale rete, sono in grado di comunicare e scambiare informazioni con i fornitori di energia. Pertanto, utilizzare il prezzo come un approccio efficace ad incentivare un uso pilotato dell'energia è una strategia vincente in rete intelligente. Fornendo una politica dei prezzi mirata, un fornitore di energia darà incentivi per gli utenti e si aspetta che essi sposteranno i loro consumi da periodi di picco di carico verso periodi di bassa domanda energetica. In [22] , è stato applicato il modello di Stackelberg per modellare problema DSM in cui un fornitore di energia agisce come un leader e clienti agiscono come seguaci. E' stata proposto un algoritmo distribuito in cui il legame tra il leader e seguaci è raggiunto a l'equilibrio del mercato.
Verrà in seguito esposto siamo un gioco non cooperativo per modellare un DSM in una Smart-Grid in cui un fornitore di energia cerca di controllare i consumi energetici degli utenti fornando unicamente incentivi dinamici sui prezzi.

4.3.1 Classificazione dei giochi

Un gioco è una situazione di interdipendenza strategica in cui le scelte di ogni giocatore dipendono dalle scelte degli altri giocatori. I giochi possono essere classificati in vari modi a seconda del punto di vista preso in cosiderazione. Esistono quindi:

- **Giochi cooperativi**, in cui i giocatori perseguono un fine comune e tendono a coalizzarsi tramite accordi vincolanti. In un gioco cooperativo è fondamentale che l'utilità dovuta alla unione dei giocatori deve essere superiore a quella ottenuta con giocatori indipendenti $U_{coop} > \sum_i U_i$.
  La centralità del gioco consiste nella politica di spartizione del surplus derivante dalla cooperazione.

- **Giochi non cooperativi**, nei quali i giocatori non stipulano accordi vincolanti tra loro, indipendentemente dai loro obiettivi. Essi vengono anche chiamati giochi competitivi. In questo caso ciascun giocatore persegue il proprio interesse senza considerare guadagni o perdite altrui.

Sulla base dell'informazione disponibile ai giocatori si distinguono due categorie di giochi:

- **Giochi ad informazione perfetta**, nei quali tutti gli individui conoscono le azioni precedentemente compiute da tutti gli altri giocatori e le possibili azioni che essi potranno compiere, incluse le utilità percepibili da ogni soggetto per ogni singola mossa eseguita.(Es: Giochi a turni)

- **Giochi ad informazione completa**, se gli individui sono a conoscenza delle possibili strategie a disposizione di ogni giocatore e delle utilita ricavabili da esse, ma non necessariamente dell'azione che ogni giocatore ha intrapreso.(Es: Giochi simultanei)

Un'ulteriore classificazione può essere fatta secondo la tempistica delle azioni:

- **Giochi Statici** dove i giocatori scelgono simultaneamente le rispettive strategie per una singola mossa e il criterio di assegnazione del risultato è noto a tutti.

- **Giochi Dinamici**, L'azione da compiere dipende dalla scelta fatta precedentemente dall'avversario.Ogni azione che è possibile compiere, tranne quella che ha dato inizio al gioco, fa parte di un sottogioco.

  Un sottogioco è una parte di un gioco; più precisamente è la parte che rimane da giocare di un gioco: è un gioco che comincia ad un punto del gioco originario e che comprende tutte le mosse che portano al termine del sottogioco.
  Un gioco dinamico è composto da più sottogiochi.
  La dinamica più elementare si sviluppa come segue:

  1. il Giocatore 1 sceglie un'azione a_1 dall'insieme A_1;
  2. il Giocatore 2 osserva a_1 e poi sceglie un'azione a_2 dall'insieme A_2;
  3. i payoff sono $U_1(a_1, a_2)$ e $U_2(a_1, a_2)$.

  In un gioco dinamico, la strategia di ogni giocatore indica le azioni che il giocatore adotterà nel primo stadio del gioco e nel primo stadio di ogni sottogioco.

In ogni gioco i partecipanti dovranno effettuare delle scelte che quando orientate ad ottenere n determinato obbiettivo vengono nominate strategie. esso posso essere classificate come:

- **Strategia pura** (o deterministica) fornisce una definizione completa del modo in cui un giocatore gioca una partita. In particolare, essa determina quale scelta farà il giocatore in qualsiasi situazione che potrebbe affrontare.

- **Strategia mista** (o probabilistica) è la distribuzione di probabilità su un insieme di strategie pure.
  Esempio: $v_i(p, 1-p)$ e $v_j(q, 1-q)$ dove 1 rappresenta il 100% di possibilità che j giochi una strategia, mentre 0 rappresenta l'impossibilità che quella strategia venga giocata; q è la percentuale di probabilità che sia giocata S_j; 1–q è la percentuale restante del verificarsi di S_j

4.3.2 Rappresentazione dei giochi

Ogni gioco può essere rappresentato in:

- forma normale o strategica

- forma di matrice

- forma estesa

La forma normale molto utile per descrivere matematicamente il modello di un gioco statico è un'espressione che contiene i seguenti valori:

- i – un giocatore in esame;

- j – l'altro giocatore;

- S_i – lo spazio delle strategie del giocatore i;

- S_i – una singola strategia dello spazio Si;

- U_i – la funzione dei risultati (payoff) del giocatore i.

$\mathcal{G} = \{S_1, S_2, S_3; U_1, U_2, U_3\}$ indica un gioco a 3 giocatori, ognuno dei quali dispone di un certo numero di strategie (S1, S2, S3) e di certi risultati o payoff (u1, u2, u3) relativi a questi spazi di strategie.

La forma di matrice è una rappresentazione fatta per celle, nelle quali vengono inscritti valori (payoff) corrispondenti a combinazioni di righe e colonne,

che rappresentano le possibili strategie. Solitamente si utilizza una bimatrice (due valori per ogni cella) nella quale il primo valore indica sempre il risultato del giocatore di riga (Giocatore 1) e il secondo indica sempre quello del giocatore di colonna (Giocatore 2). Questa rappresentazione è stata ideata da Thomas Schelling (1960).

		Giocatore 2	
		s_2'	s_2''
Giocatore 1	s_1'	–1 –1	–9 0
	s_1''	0 –9	–6 –6

Figura 4.1

Nella bimatrice di figura 4.1, per la scelta $u_i(s_1', s_2'')$ il gioco si risolve con i payoff $u_1 = -9, u_2 = 0$.

La forma estesa è una descrizione puntuale del gioco, delle mosse e delle relative probabilità, della situazione dopo ogni mossa, delle strategie, degli insiemi di informazione (insiemi di nodi che globalmente rappresentano la situazione di un giocatore), ecc.; risulta molto ricca ma poco maneggevole è generalmente verbale e indica:

1. il numero dei giocatori (da 1 a infinito);
2. quando i giocatori hanno diritto alla mossa;
3. cosa possono fare i giocatori quando hanno diritto a muovere;
4. cosa conosce ogni giocatore quando gli spetta una mossa;
5. i payoff ricevuti da ciascun giocatore in corrispondenza di ogni combinazione di mosse;
6. il comportamento dei giocatori (razionali, aspiranti alla massima vincita, irrazionali...).

In generale si utilizza una rappresentazione ad albero in cui la prima mossa del gioco viene effettuata partendo dalla radice. Ad ogni nodo decisionale si

associa una possibile situazione del gioco, agli archi uscenti da ciascun nodo si associano le possibili mosse del giocatore, che è chiamato a muovere in quella situazione, e ai nodi terminali, chiamati anche foglie, si associano i valori delle vincite (payoffs) di ciascun giocatore. Ogni nodo decisionale, dunque, descrive in maniera compatta la storia passata del gioco.
Adottare questo tipo di rappresentazione risulta molto conveniente soprattutto quando abbiamo a che fare con un gioco sequenziale.

4.3.3 Equilibri

Il raggiungimento degli equilibri è correlato alla nozione di strategie dominanti. Potremo definire le strategie dominanti come quelle che pongono un giocatore in una condizione migliore di quella in cui sarebbe se avesse scelto qualsiasi altra strategia poiché evitano al giocatore di incappare nel peggior risultato ottenibile.

Da notare che nessuna credenza di un giocatore, relativa alle strategie degli altri giocatori, rende una strategia dominata una scelta ottima.
Il risultato che ogni giocatore razionale mira ad ottenere è quello utile a raggiungere una situazione che garantisce una vincita minima per ogni comportamento adottato dagli altri giocatori, anche tralasciando il miglior risutato raggiungibile: tale situazione è denominata punto di sella. Questo risultato si raggiunge attraverso l'adozione di strategie dette non dominate.

Equilibrio di Nash

In $\mathcal{G} = \{S_1, \cdots, S_n; U_1, \cdots, U_n\}$, le strategie $(s_1^e, \cdots, s_n^e)$ sono un equilibrio di Nash se s_i^e è la miglior risposta del giocatore i alle strategie specificate per gli altri n–1 giocatori (tutti i giocatori tranne i).

$$U_i(s_1^e, \cdots, s_{i-1}^e, s_i^e, s_{i+1}^e, \cdots, s_n^e) \geq U_i(s_1^e, \cdots, s_{i-1}^e, s_i, s_{i+1}^e, \cdots, s_n^e) \tag{4.1}$$

significa che per ogni giocatore la strategia prescritta (s_i^e) deve essere la miglior risposta di quel giocatore alle strategie prescritte per gli altri giocatori $(s_1^e, \cdots, s_{i-1}^e, s_{i+1}^e, \cdots, s_n^e)$ ossia deve essere la migliore tra tutte le sue altre strategie disponibili $(s_i^e \geq s_1)$

In un gioco a due giocatori, l'equilibrio di Nash si individua quando

$$U_i(s_i^e, s_j^e) \geq U_i(s_i^e, s_j^e) \tag{4.2}$$

Se le strategie $(s_1^e, \cdots, s_n^e)$ sono un equilibrio di Nash allora sopravvivono all'eliminazione iterata di strategie dominate.

Osservazione 1. Si possono evidenziare alcuni limiti dell'equilibrio di Nash (in strategie pure):

- inefficienza (Es: dilemma del prigioniero);
- non unicità (Es: battaglia dei sessi);
- non esistenza (Es: pari e dispari).

Osservazione 2. In ogni gioco finito (con numero di giocatori e numero di strategie finiti) esiste un equilibrio di Nash.

Best Response Functions

Per trovare gli equilibri in un gioco finito, si può sempre applicare la definizione di Equilibrio di Nash ad ogni profilo di strategie. Ciò può essere ragionevole se ogni giocatore ha a disposizione solo un insieme ristretto di azioni. In giochi più complessi, è più conveniente calcolare gli Equilibrio di Nash con le "Funzioni di Miglior Risposta" (BRF - Best Response Functions).
Dalla definizione di equilibrio di Nash si evince che se un set di strategie $(s_1^e, \cdots, s_n^e)$ è un equilibrio di Nash allora questo è il profilo di strategie nel quale nessun giocatore ha interesse ad essere l'unico a cambiare la propria scelta. Quindi, un punto di equilibrio è quel profilo di strategie nel quale l'azione di ogni giocatore è una migliore risposta alle azioni degli altri giocatori. Le regole da rispettare sono la non cooperazione tra gli Agenti che sono razionali in un gioco corretto. I PayOff ricavati da ogni partecipanti sono forniti dal provider.

4.3.4 Modello del Gioco

Consideriamo un sistema intelligente di alimentazione costituito da un sol provider di energia e numero N di utenti prosumer.

		Giocatore 2	
		S1	S2
Giocatore 1	S1	5	6
	S2	1	2

		Giocatore 2	
		S1	S2
Giocatore 1	S1	4	1
	S2	6	3

		Giocatore 2	
		S1	S2
Giocatore 1	S1	5 , 4	6 , 1*
	S2	1*, 6	2*, 3*

Figura 4.2

Ogni utente è dotato di una batteria. Il tempo di funzionamento richiesta è diviso in tempi ΔT di uguale intervallo nell'arco di una giornta di 24 ore. Ogni utente ha un numero non definito di carichi translabili nell'arco della giornata. Per via semplificativa i carichi a disposizione non sono considerati interrompibili.

Prima di definire il gioco energetico è importante caratterizzare anche se sommariamente la teoria dei giochi come strumento ingegneristico.

Viene quindi definito in forma strategica il gioco DSM nella forma:

$$\mathcal{G} = \{\mathcal{K}, \{A_i\}, U_i\} \tag{4.3}$$

dove $A_i = \{a_i\}$ sono le possibili azioni che un giocatore può intraprendere raggruppate in vettori $\mathbf{a} = (a_1 \cdots a_N) \in \mathcal{A}$, dove $\mathcal{A}$ è l'insieme di tutte le strategie ammissibili e $\mathbf{a}$ è definito come profilo strategico al quale corrisponde un determinato risultato atteso detto anche Payoff.
$\mathcal{K}$ è l'insieme degli utenti che partecipano al gioco e $U_i : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}$ la funzione di utilità nota come funzione di payoff del giocatore i.

$$U_i(\mathbf{a_l}) = U_i({a_i}^*, \mathbf{a_{-l}}) \tag{4.4}$$

come può essere intuibile la funzione di utilità dipenderà si adall'azione intrapresa dall'utente i-esimo ma sarà anche influenzata dalle azione $\mathbf{a_{-1}}$ intraprese da tutti gli altri utenti che partecipano al gioco.
Lo scopo di ogni giocatore sarà quindi quello di massimizzare la propria funzione di utilità ponderando la scelta migliore sapendo che ogni altro individuo parteciperà al gioco seguendo gli stessi principi.

L'aspetto importante che differenzia l'approccio della teoria dei giochi rispetto ad uno di ottimizzazione è fondamentalmente sull'essenza del risultato da ottenere.
L'ottimizzazione cerca il miglior risultato mentre un gioco ricerca il raggiungimento di un equilibrio. Non è detto che la scelta migliore ottenuta all'equilibrio sia la migliore in assoluto. La definizione della funzione di utilità prevede la definizione di ulteriori vincoli da applicare alla comunità U_i.

4.3.5 Formulazione Matematica

Si consideri la problematica distribuita relativa alla formulazione 3.1 esposta al capitolo 3.
Il vettore $\mathbf{a_i}$ può essere scritto come

$$a_i = [l_i^1, \cdots, l_i^t, \cdots, l_i^T] \tag{4.5}$$

dove l_i è fornito dalla equazione 3.1 per ogni time slot ΔT.

Considerati N utenti di una area e un selezionato profilo di azioni da intraprendere $a = (a_1 \cdots a_N) \in \mathcal{A}$ il carico totale da distribuire per ogni time slot è espresso da:

$$L(h) = \sum_{N}^{i=1} l_i(t) \quad \forall h \in T \tag{4.6}$$

Modello di autoproduzione

La produzione di energia è in grado di generare energia sia per alimentare i propri dispositivi, sia per caricare un dispositivo di accumulo o di vendere energia alla rete nelle ore di massimo assorbimento. Suddivisiamo il tipo di produzione a seconda del tipo di impianto utilizzato:

- Produzione di Energia non dispacciabile
  E' il caso relativo alle sorgenti di natura intermittenti come i panelli

solari, le turbine azionate dal vento. Vista la aleatorietà dell aproduzione non è possibile applicare nessuna strategia riguardo alla modalità di produzione. Di conseguenza il gruppo di utenti che detiene impianti di questa classe parteciperà al carico 4.6 nella sezione del profilo di consumo $e_i(t)$ come contributo negativo.

- Produzione di energia dispacciabile
  E' il caso relativo alle sogenti di energia pilotabili come i motori a combustione e le Micro turbine a Gas trattate nel Capitolo 2.4.
  Queste sorgenti, oltre ai costi fissi hanno un costo variabile di produzione (es: carburante) e sono quindi interessate al processo di ottimizzazione tramite opportune strategia di produzione.
  Data un profilo di produzione $g_i(t)$ sarà presente una funzione di costo $W_i(g_i(t))$ che tiene conto della variabilità dei costi di produzione.

Vengono introdotti alcuni vincoli a cui devono sottostare le sorgenti. Considerato il profilo di produzione $g_i(t)$ dell'utente iesimo esso devo soddisfare necessariamente l'inegualianza:

$$0 \leq g_i(t) \leq g_i^{max} \tag{4.7}$$

cioè la produzione è limitata da una massima capacità di produzione/timeslot. Inoltre al fine di evitare fenomeni di sovraproduzione ogni utente è limitato da una quantità massima giornaliera di energia prodotta γ_i^{max} .

Modello del sistema di accumulo

Il modello di accumulo sarà caratterizato dai parametri di:

- Efficenza di carica $\beta_i^+ \leq 1$
- Efficenza di scarica $\beta_i^- \leq 1$
- Capacità C_i
- velocità di carica massima b_i^{max}

Considerato il profilo della batteria $b_i(t)$ scomposto come $b_i(t) = b_i^+(t) - b_i^-(t)$ dove $b_i^+(t)$ è il profilo di carica e $b_i^-(t)$ è il profilo di scarica.
Al fine di tener conto delle efficenze di cui sopra in caso di carica l'energia

effettivamente immagazina è solo una quota parte cioè $\beta_i^+ b_i^+(t)$. Inoltre per estrarre dalla batteria una quantità $b_i^-(t)$ è necessario scaricare $\beta_i^- b_i(t)$.

E' possibile quindi definire il livello di carica allo slot temporale t $q_i(t)$:

$$q_i(t) = q_i(t-1) + \beta_i^T \mathbf{b}_i(t) \tag{4.8}$$

dove $\beta = (\beta^+, -\beta^-)^T$ e $b_i(t) = (b_i^+(t), b_i^-(t))^T$.
Ulteriori vincoli sono dettati dalla massima velocità di carica e dalla capacità della batteria:

$$\begin{aligned} \beta_i^T \mathbf{b}_i(t) &\leq b_i^{max} \\ -q_i(t-1) \leq \beta_i^T \mathbf{b}_i(t) &\leq C_i - q_i(t-1) \end{aligned} \tag{4.9}$$

Risulta inoltre utile, per simulare meglio un uso a regime vincolare la lo stato di carica della batteria a fine giornata pari a quella di inizio cioè:

$$q_i(T) - q_i(0) \leq \epsilon \quad con \quad \epsilon \simeq 0 \tag{4.10}$$

Esplicitando la serie numerica si può fornire la carica della batteria rispetto al suo istante iniziale. Dall'equazione 4.8 si ottiene facilmente:

$$q_i(t) = q_i(0) + \sum_{t=1}^{T} \beta_i^T \mathbf{b}_i(t) \tag{4.11}$$

Funzione di costo

Considerando la funzione del carico agregato definita nella 4.6 si deve definire una opportuna funzione di costo di tipo concavo al fine di garantire l'esistenza di almeno un equilibrio di Nash a l'equilibrio. Sia $C_t(L(h))$ definita come:

$$C_t(L(h)) = \alpha_h L^2(h) \tag{4.12}$$

dove α è un coefficente di pesatura fornito dal provider e dipendente dal timeslot. Questa funzione di costo di rete viene usata per modulare la funzione obiettivo che dipenderà dai profili di accumulo delle batterie b_i e di produzione delle sorgenti schedulabili g_i.

$$F_n(\mathbf{g_n}, \mathbf{b_n}) = \sum_{t=1}^{T} (\alpha_h L(h)(e_n(t) - g_n(t) + b_n(t)) + W_n(g_n(t))) \tag{4.13}$$

La funzione obiettivo 4.13, che rappresenta il bilancio finanziario di ogni utente e fortemenet dipendente dalla localizzazione nei time slot dei profili di accumulo e di produzione. L'obiettivo è quindi quello di minimizzare la funzione 4.13 sul periodi T. Assunti gli utenti come razionali e intensionati a minimizare la funzione obiettivo la ricerca delle strategie b_i e g_i di tipo dominante e quindi di ottenere un equilibrio di Nash.
La funzione obbiettivo essendo definita concava garantisce l'esistenza di un equilibrio di Nash ed è quindi sempre possibile ricavare almeno una strategia di tipo dominante che la soddisfa. La ricerca della strategia viene effettuata tramite il metodo Best Response Functions esposto nel capitolo 4.

4.4 Caratterizzazione dei sistemi multi-agente

In letteratura non esiste una definizione *formale* univocamente accettata di agente intelligente, ma sono fornite [23] le seguenti caratteristiche fondamentali:

- Un agente è un'entità che percepisce l'ambiente circostante attraverso delle interfacce senzienti ed opera nell'ambiente in cui è immerso sulla base delle informazioni raccolte. Nel caso della gestione dello storage, l'agente è sia l'entità che controlla direttamente il flusso di carica/scarica di una batteria, sia il modulo software che consente alle smart appliances di prendere parte al mercato elettrico al dettaglio;

- Un agente è in grado di agire nell'ambiente reale o virtuale tramite degli attuatori fisici o software;

- Gli agenti devono poter comunicano tra loro, e questa caratteristica è parte della loro capacità di poter agire nell'ambienti in cui sono immersi. Come esempio, si consideri un sistema che include un generatore fotovoltaico e un accumulatore: la batteria utilizza l'energia fornita dal pannello per caricarsi e si scarica nei momenti di assenza di produzione. Per conseguire tale operazione in modo ottimale, i due agenti devono poter scambiare dei messaggi. Questa interazione é considerata decisivo in quanto influenza l'equilibrio dell'intero sistema in modo diverso dal caso in due agenti agiscono senza alcun tipo di coordinamento;

- Gli agenti possono avere un certo livello di autonomia decisionale, il che significa che possono prendere decisioni senza essere necessariamente coordinati da un controllore centrale. Per raggiungere questo obiettivo, sono guidati da un insieme di *best practice*. Per un sistema di dispositivi di accumulo, una *best practice* potrebbe essere: ricaricare le batterie quando il prezzo per kWh è basso e lo stato di carica è ugualmente basso. Questo implica che l'agente della batteria decide quando iniziare la ricarica sulla base delle proprie regole e dei propri obiettivi e non quando riceve un comando esterno. Inoltre, l'autonomia di ogni agente è correlata alle risorse che possiede ed è in grado di gestire. Queste risorse potrebbero essere combustibile disponibile per un generatore diesel o la quantità di carica residua di una batteria;

- Un'altra caratteristica significativa degli agenti è che hanno una rappresentazione parziale dell'ambiente in cui interagiscono. Ad esempio, nel caso di più elementi di storage connessi ad un insieme di più sistemi di generazione ogni agente *generatore* conosce solo il livello di tensione del proprio bus e può, al massimo, stimare cosa accade agli altri dispositivi analoghi. Tuttavia, l'agente non conosce lo stato dell'intero sistema. Questo meccanismo è alla base della logica di funzionamento dei MAS, ovvero riuscire a controllare un sistema molto complesso tramite un minimo scambio di dati e un uso ridotto delle risorse computazionali.

In sintesi il comportamento di ogni agente è dettato dagli obiettivi che si propone di soddisfare utilizzando le sue risorse, competenze e servizi. Per esempio un agente potrebbe avere compiti di produrre o immagazzinare potenza e accedere a servizi per vendere energia in un mercato. Il modo in cui l'agente utilizza le sue risorse, competenze e servizi caratterizza il suo comportamento.

Di conseguenza, è evidente che il comportamento di ogni agente è costituito dai suoi obiettivi. Un agente che controlla un impianto a batteria e il cui obiettivo è fornire gruppo di continuità ad un carico, potrebbero avere un comportamento differente da un agente il cui obiettivo primario è quello di massimizzare i profitti facendo un'offerta nel mercato dell'energia nei momenti più propizi.

4.4.1 Agenti reattivi

L'aspetto innovativo di un sistema di controllo basato su agenti è, dal punto di vista dell'intelligenza computazionale, la capacità di reagire ai segnali provenienti dal sistema esterno. In modo schematico possiamo caratterizzare un agente reattivo se:

- Il singolo agente non è dotato di una significativa inteliggenza
- L'agente reagisce a determinati segnali in modo autonomo.
- La collaborazione di più agenti forma una intelligenza collettiva notevole.
- L'intelligenza collettiva è superiore a quella del singolo individuo.

Tipici esempio di questo sistema di controllo sono gli algoritmi di istradamento, o i sistemi basati sul modello *Ant Colony* o *Particle Swarm*. In genere in questi sistemi il funzionamento non prevede una coordinazione globale della comunità ma un sistema di comunicazione delle informazioni. Questa modalità operativa consente una rapida risposta alle stimulazioni [24] e si rende necessaria in tutte quelle applicazioni in cui è necessaria una reazione immediata come nei casi di protezione di una rete.

4.4.2 Architettura

Come descritto precedentemente un sistema Multi agente deve prevedere un sistema di trasporto dei messaggi e un protocollo di comunicazione comune.
Al fine di favorire la scalabilità, in un piattaforma Multi agente viene inserito un agente particolare AMS (agent management system) che supervisiona il corretto accesso ed uso alla piattaforma e al sistema di comunicazione esso mantiene traccia degli agenti registrati nell'area di adibita al controllo. Come descritto dal FIPA [25] in figura 4.3 è presente un aegnte che tiene traccia dei servizi offerti dagli agenti (directory facilitator).
Per un controllo capilare di un sistema elettrico, la soluzione scalabile e gerarchica [26, 27] è quella maggiormente approvata in letteratura (figura 4.4).

- uno strato inferiore con gli agenti che controllano ciascuna di queste componenti (solitamente generatori, carichi e stoccaggio), con vari gradi

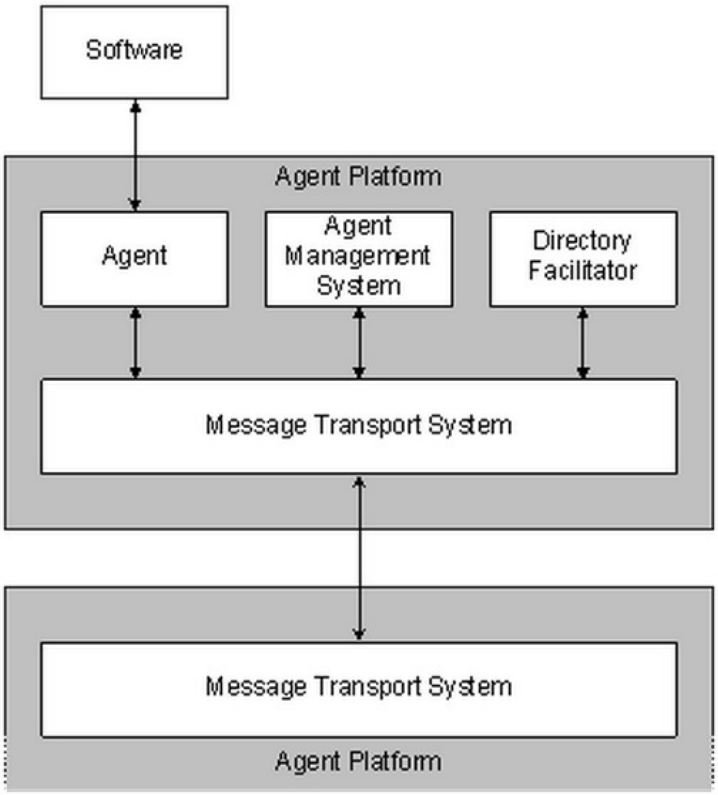


Figura 4.3. La piattaforma standard MAS

di intelligenza al fine di dare loro la capacità di poter reagire in tempo reale o no;

- uno strato intermedio di area o locale, incaricata di coordinare le componenti dello strato precedente: questi agenti ottimizzare il funzionamento delle aree dispatchando l'energia energia tra i generatori e i carichi;

- uno strato superiore corrispondente ad una rete di distribuzione o un operatore microgrid, che coordina diverse aree ottimizzando le operazioni a livello globale.

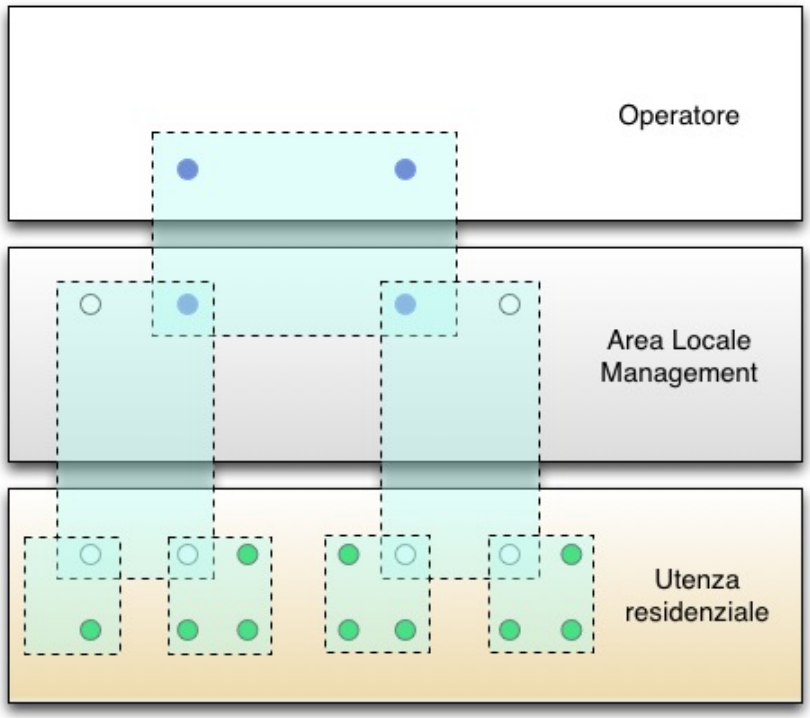


Figura 4.4. La piattaforma standard MAS

Appendice A

Ulteriori lavori di Ricerca

Durante gli anni di dottorato sono stati svolti, contemporaneamente ai lavori inerenti il tema energetico anche studi scientifici che hanno portato alla stesura di articoli nel campo del signal processing e del trattamento delle immagini e allo sviluppo di algoritmi di classificazione. Nel seguito saranno brevemente illustrati i suddetti lavori.

A.1 Signal Processing

A.1.1 Inpainting

Questo studio introduce un nuovo algoritmo di inpainting automatico digitale basato sulla sola ricostruzione dei bordi. L'approccio si basa sull'analisi wavelet di Laguerre Gauss [28] delle immagini danneggiate da cui vengono estrapolate le informazioni sulla struttura delle regioni circostanti e le porzioni danneggiate dell'immagine. Viene valutato quindi in modo automatico il gradiente della luminanza e il colore nelle zone danneggiate: questa stima è frutto di algoritmo ai minimi quadrati che disegna a partire dal bordo della lacuna i bordi semplificati (1 pixel di spessore) all'interno della regione da ricostruire.
La ricostruzione delle parti sconosciute è ottenuta automaticamente grazie ad un metodo variazionale che opera nel dominio trasformato di Fourier e che utilizza le informazioni del gradiente predetto imponendo i vincoli sulle variazioni graduali della luminanza e del livello di colore.
Sono seguiti test di laboratorio su una serie di immagini mostrando l'efficacia

dell'algoritmo proposto in zone lisce, come pure in aree con bordi e/o presenza di texture.
L'intero lavoro implementato in codice C/C++ è stato ottimizzato per schede grafiche Nvidia tramite la libreria CUDA ed è stato presentato allo SPIEE di San Francisco.

L'approccio allo studio dell'Inpainting è stato effettuato nei seguenti passi:

- Studio dell'Inpainting
  Lo studio è stato inteso non solo come tecnica di Elaborazione digitale ma più approfonditamente come metodologia artistica di recupero delle opere d'arte. [29] Lo studio della psicofisica della visione umana e dei fenomeni che regolano la percezione della realtà che ci circonda sono stati il filo conduttore di questa ricerca. Gli strumenti matematici adottati e gli algoritmi implementati sono stati affinati al fine di poter garantire le proprietà di chiusura, continuità di direzione, simmetria, regolarità e completamento amodale tipici della visione umana. [30]

- Stato dell'arte
  E' stata realizzata una classificazione dei vari metodi noti in letteratura, studiandone i punti di forza e le debolezze nonchè i costi computazionali. Il primo approccio si adatta meglio nel caso di trasmissioni di immagini

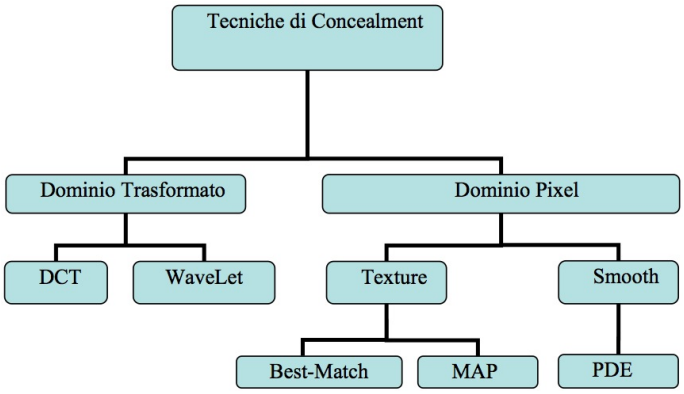


Figura A.1. Classificazione dei metodi di Inpainting

codificate JPEG, MPEG o JPEG2000 affette da errori in reti ad alta probabilità di collisione dove risulta vincente mitigare l'uso dei protocolli ARQ.[31]
Il secondo approccio avviene attualmente o tramite ricostruzioni tessiturali o per massima regolarità. Le due modalità risultano antagoniste,

eventuali tecniche ibride utilizzano una pesatura dei due sistemi senza ancora arrivare ad una tecnica realmente innovativa.
Le tecniche di ricostruzione tessiturali best-matched o well-matched si basano sul pattern recognition cioè se la porzione di interesse dell'immagine contiene modelli simili, le lacune sono riempite copiando zone dall'intorno eventualmente soggette a pesatura.[32]
Nella tecnica MAP l'immagine intorno alla zona danneggiata è modellata come un campione di un campo aleatorio Markoviano ed è effettuata una stima MAP dei pixel mancanti.
Nella tecnica Smooth si ricerca la regolarità minimizzando opportuni funzionali.[33]

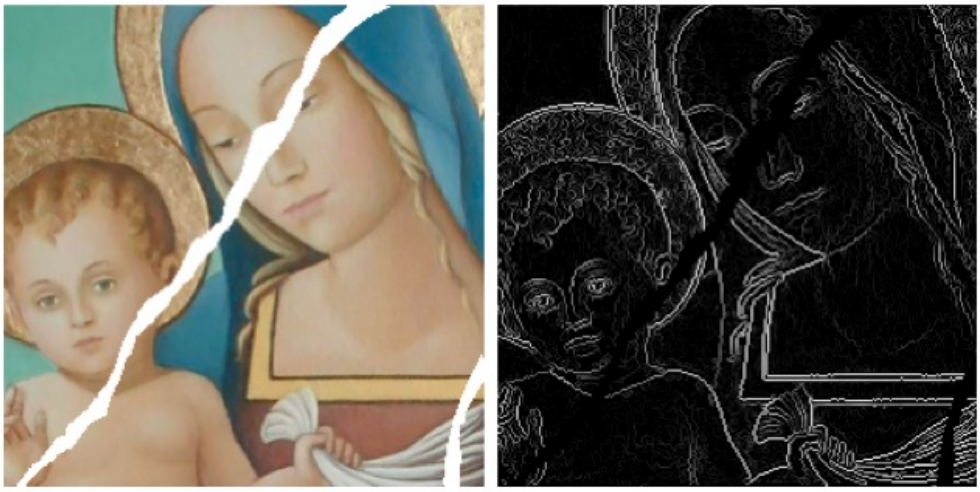
- Metodo proposto
  L'importanza delle informazioni contenuti nei bordi di un'immagine ha suggerito di utilizzare tecniche di rappresentazione delle immagini basate su analisi multirisoluzione wavelet. Inoltre, la scelta per quest'ultime del filtraggio Circolare Armonico di Laguerre-Gauss (A.1) è stato motivato dal fatto che questi filtri simulano al meglio il comportamento dell'occhio umano nella selezione delle informazioni rilevanti.

$$h_{s,1}(r,\vartheta) = \frac{(-1)}{\pi}\frac{1}{s^2}e^{-\left(\frac{r}{s}\right)^2}\left(\frac{r}{s}\right)e^{-j\vartheta} \tag{A.1}$$

  Nel dominio dei bordi wavelet trasformato, al fine di facilitare il completamento amodale dell'occhio umano i bordi mancanti vengono interpolati tramite la tecnica del *least square circular fitting*[34].
  Considerando le proprietà dei Filtri di L-G il piano wavelet dei bordi ricostruito viene considerato come approssimazione del gradiente e l'immagine viene ricostruita tramite una appropriata integrazione minimizzando il funzionale (A.2) dove G è il gradiente è il gradiente sintetico e $\tilde{I}$ l'immagine ricostruita. Il calcolo viene eseguito in Frequenza tramite il metodo di Frankot-Chellappa [35].

$$\min E[G,\Omega] = \min\left\{\iint_{\Omega}\left\|\nabla\tilde{I} - G\right\|^2 d\Omega\right\} \tag{A.2}$$

- Risultati Sperimentali



(a) *Immagine danneggiata e rappresentazione semplificata dei bordi*

(b) *Inseguimento dei bordi e interpolazione*

(c) *Immagine restaurata*

Figura A.2. Esempio di applicazione della tecnica di Inpainting

A.1.2 Image processing

Nell'ambito di una estesa collaborazione con la soprintendenza speciale per i beni culturali di Roma sono state approfondite tecniche di elaborazione e ideate infrastrutture atte alla valorizzazione e fruizione di quelle aree urbane archeologiche che, in un paese a connotazione fortemente storica come i nostro, sono spesso di difficile fruizione. Per molteplici motivi, di tipo ambientalistico, architettonico o urbanistico molti siti di indiscusso intesse sono completamente inaccessibili perché ipogei o per comprovati motivi di sicurezza.
Al fine di andare incontro a queste esigenze di divulgazione, e migliorare la user experience sono stati sviluppati e sono in ulteriore affinamento dei tools (CHIP) per offrire una esperienza immersiva del bene architettonico e storico. Risultati di questi studi sono stati presentati alle conferenze IEEE ISCCSP 2012 e ICMEW 2012.

Image Enhancement

Tra i metodi di ottimizzazione delle immagini sviluppati per migliorare visibilità di strutture e dettagli delle immagini che sono deboli o indistinguibili nell'immagine originale vi è l'image Enhancement. Queste tecniche sono di interesse in una vasta gamma di applicazioni, come l'astronomia, geofisica, immagini mediche, immagini di opere d'arte. E' stato svilupputa un metodo usando i filtri di Laguerre-Gauss [28] correttamente regolati e modulati per migliorare il valore estetico delle immagini culturali. Questo algoritmo fa uso della funzione di sensibilità al contrasto visivo umano per migliorare la qualità dell'immagine.
Nel seguito una sintesi del metodo realizzato.

Dope aver scomposto l'immagine nelle suo componenti di luminanza questa viene filtrata attraverso il banco di filtri di Laguerre-Gauss [28] a 3 risoluzioni e a 4 ordini angolari. La componente a bassa frequenza viene attenuata di un fattore $\beta_{LF} < 1$ ottenendo $LF^{'}(x) = \beta_{LF} \cdot LF(x)$.
Le componenti di alta frequenza vengono esse stesse rimodulate tramite l'eq. A.3 applicandola ad ogni pixel dell'immagine.

$$|HF^{'}_{1,j}(x)| = \frac{\alpha_{1,j}}{Max_{loc}} \cdot |HF_{1,j}(x)|^2 + \beta_{1,j} \cdot |HF_{1,j}(x)| \tag{A.3}$$

La luminanza dell'immagine viene ricostruita invertendo il filtraggio e utilizzando l'eq. A.4

$$\hat{I}x = \frac{I_{LF}(x) \cdot H'_{LF}(x) + \sum_{n=1}^{4} \sum_{j=0}^{2} (I_{n,j}(x) \cdot H'_{n,j}(x))}{|H_{\mathrm{LF}}(x)|^2 + \sum_{n=1}^{4} \sum_{j=0}^{2} |H_{n,j}(x)|^2} \tag{A.4}$$

Un esempio di applicazione viene fornita in figura A.4 dove si evince che una asaltazione delle trame e dei bordi fini pur mantenedo un equilibrio tonale non artefatto e una lettura dell'immagine naturale.

(a) *Immagine originale da archivio*

(b) *Immagine elaborata*

Figura A.3. Porticus Aemilia Elaborata

Compressione dinamica

La funzione di compressione dinamica è stata realizzata utilizzando congiuntamente la tecnica del filtraggio omomorfico e l'attenuazione del gradiente [36]. L'immagine viene dapprima suddivisa nelle componenti di luminanza e riflettanza poi ne viene calcolato il logaritmo. Il successivo passaggio attraverso i filtri di Laguerre-Gauss [28] presenta l'aspetto innovativo di questa tecnica. L'immagine logaritmica eq:A.5 viene scomposta nelle componemti di bassa e alta frequenza a 3 risoluzioni diadiche $\hat{i}_0, \hat{i}_{1,0}, \hat{i}_{1,1}, \hat{i}_{2,1}$

$$\hat{i}(x,y) = \log[i(x,y)+1] \tag{A.5}$$

Successivamente vengono effettuate opportune attenuazione del piano gradiente $\hat{i}_{1,0}$ ad alta frequenza e della rapprentazione in bassa frequenza $\hat{i}_0$ eq:A.6 dove C è un semplice parametro di attenuazione e $\psi(x,y)$ è un fattore dipendente dalla intensità del gradiente nel punto x, y.

$$\begin{aligned} u(x,y) &= \hat{i}_{0,1} \cdot \psi(x,y) \\ l(x,y) &= C \cdot \hat{i}_0(x,y) \end{aligned} \tag{A.6}$$

Le nuove rappresentazioni del gradiente così ottenute vengono poi riutilizzate nell'equazione di ricostruzione della luminanza dell'immagine a partire dalla formula di inversione del filtraggio wavelet di Laguerre-Gauss (eq:A.7) trasformata nel dominio dello spazio.

$$\hat{I}_C(\xi,\eta) = \frac{U(\xi,\eta) \cdot G^{(1)^*}(\xi,\eta) + L(\xi,\eta) \cdot G^{(0)}(\xi,\eta)}{|G^{(1)}_{s_0}(\xi,\eta)|^2 + |G^{(0)}(\xi,\eta)|^2} \tag{A.7}$$

Le immagini a colori vengono elaborate a partire dalle loro componenti RGB estraendo le informazioni sempre dalle caratteristiche di luminanza.

$$\begin{aligned} r_C(x,y) &= (\frac{r(x,y)}{i(x,y)})^S \; i_C(x,y) \\ g_C(x,y) &= (\frac{g(x,y)}{i(x,y)})^S \; i_C(x,y) \\ b_C(x,y) &= (\frac{b(x,y)}{i(x,y)})^S \; i_C(x,y) \end{aligned} \tag{A.8}$$

L'immagine elaborata $i_C(x,y)$ viene quindi ottenuta applicando l'esponen-

ziale eq: A.9 all'uscita del filtro di inversione di Laguerre-Gauss A.7.

$$i_C(x,y) = e^{\hat{i}_C(x,y)} - 1 \tag{A.9}$$

In figura A.4 un esempio di applicazione automatica del metodo esposto.

(a) *Immagine originale da archivio*

(b) *Immagine elaborata*

Figura A.4. Esempio di compressione dinamica automatica

Living in the PAST

Le tecniche automatiche di classificazione e processamento delle immagini costituiscono un elemento fondamentale dei sistemi di realtà aumentata per ambienti culturali che consentono di combinare assieme oggetti reali e virtuali. Un aspetto critico di una applicazione di realtà amentata è la stima della posizione del dispositivo di visualizzazione rispetto all'ambiente circostante , l'annotazione ed il recupero di contenuti visuali preesistenti e l'utilizzo delle abitudini ed esperienze dell'utente per migliorare in modo dinamico la sua esperienza di percezione.
A tal riguardo nel corso del dottorato si è sviluppata un framework ed una applicazione mobile per la creazione di esperienze avanzate nel campo del patrimonio archeologico e storico.

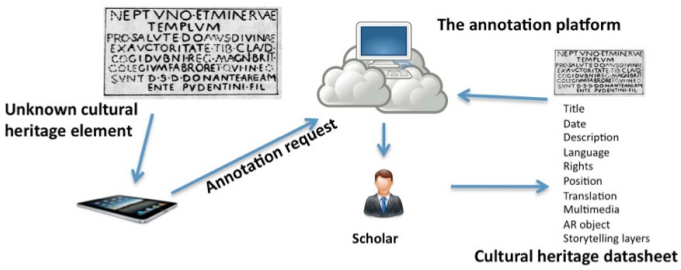


Figura A.5. Tourist requesting for annotation

A.2 Classificazione Video Automatica

Nell'ambito di un progetto di ampio respiro relativo a l'*Information Retrieval in Multimedia Archives* [1] ho avuto modo di approfondire, sviluppare e testare tecniche di classificazione basate sulle Support Vector Machine (SVM) e affinare l'estrazione di caratteristiche da keyFrame video al fine di classificare archivi video di eventi sportivi di interesse storico. L'archivio video, composto dai video delle Olimpiadi di Roma degli anni '60 è stato gentilmente fornito da Teche RAI ai fini della ricerca ed è stato adottato nei test bed realizzati. Il lavoro si è articolato in due fasi nelle quali ad una prima stesura del motore di classificazione è seguita un affinamento tramite una tecnica di pre elaborazione.

[1] Si ringrazia la RAI e Teche RAI per aver messo a disposizione i DataSet utilizzati per questa ricerca.

I lavori della ricerca sono stati presentati alle conferenze CBMI 2012 e ISCCSP 2012.

- Rappresentazione Video
  Ai fini della notazione automatica dei video ogni sequenza MPEG della base dati è stata segmentata e ne sono stati estratti i Key Frame successivamente rappresentati da caratteristiche di basso livello quali: le Textures, i bordi e la luminanza.(fig A.6)

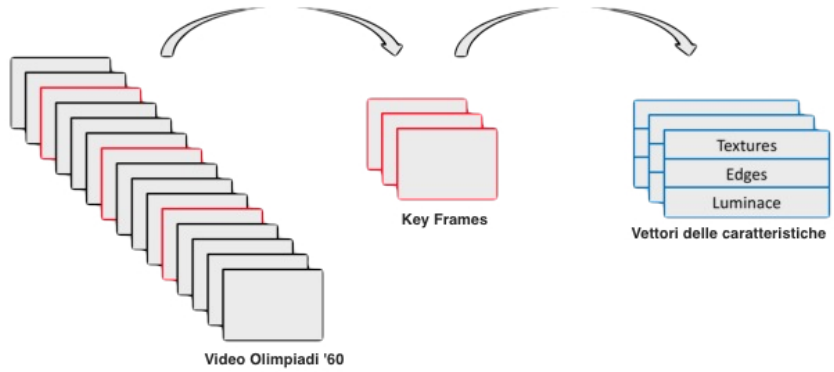


Figura A.6. Rappresentazione dei video

L'analisi dei key frame è stato effettuato utilizzando la decomposizione wavelet di Laguerre Gauss le cui proprietà consentono una raffinata selezione delle caratteristiche geometriche dell'immagine. Dall'eq.A.10 variando i parametri n e k si posso estrarre informazioni relative ai Bordi (n=1), agli incroci di due linee (n=2), ai vertici (n=3) e alle intersezioni ortogonali (n=4).

$$
\begin{aligned}
l_k^n(r,\theta) &= (-1)^k 2^{\frac{(|n|+1)}{2}} \pi^{\frac{|n|}{2}} \left(\frac{k!}{k+|n|} \right) r^{|n|} L_k^{(n)} 2 \left(2\pi \mathrm{r}^2 \right) e^{-\pi \mathrm{r}^2} e^{\mathrm{j}n\theta} \\
L_k^{(n)} &= \sum_{i=0}^{k} (-1)^i \begin{pmatrix} k+n \\ k-1 \end{pmatrix} \frac{x^i}{i!}
\end{aligned}
\tag{A.10}
$$

Ai fini della rappresentazione, sono stati utilizzati i filtri con i parametri n=1,k=0 estratti ad alta risoluzione per le caratteristiche di bordo e n=3, k=0 e n=1,k=0 estratte a tre risoluzioni per le informazioni relative alle texture.

Le feature di luminanza vengono estratte suddividendo il Key frame in blocchi ognuno caratterizzato da una varianza, media e skewness.
Questi tre vettori rappresentano le caratteristiche di bassi livello del frame estratto e saranno utilizzati dal classificatore SVM.

- DataSet Preprocessing
  La classificazione a partire dalle caratteristiche di basso livello può produrre dei risultati effetti da rumore nei DataSet generati dalle SVM. Può risultare quindi vincente una strategia di rimozione delle informazioni all'origine del rumore da effettuare come procedura di preprocessing.
  Sono stati valutati due tipi di rumore:

  1. Rumore di digitalizzazione
  2. KeyFrame non rappresentativo

  Quest'ultimo è il rumore da eliminare dai dataSet specialmente quelli dedicati al training delle Support Vector Machines. La procedura ideata e testata prevede ,per ogni feature estratta, la clusterizzazione delle immagini considerate di rumore. Le prime N di ogni rank vengono raggruppate in un insieme G di dimensione 3N.
  Il nuovo Set G creato viene suddiviso in cluster usando le tre features in esame, questo al fine di creare una matrice di probabilità per poter selezione le immagine presenti in più cluster tramite esplorazione con il BRF (Breadth First Search) algorithm.(fig A.7) Successivamente le immagini considerate rumore vengono eliminate dal DataSet.

- Classificazione
  Per la classificazione sono state considerati le attività sportive proposte dalla RAI:

  · nuoto
  · atletica
  · basket
  · boxe
  · calcio
  · scherma

Il training è stato effettuato per ogni sport ed ogni feature con una strategia di confronto uno contro uno [37] (es: nuoto VS boxe) per ogni feature. Ogni SVM è stata valutata, al fine di ottenere le migliori performance, tramite la funzione di costo (eq.A.11) variando i parametri caratteristici della SVM(tab. A.1).
Il sistema poi selezionerà i parametri più efficienti della SVM per i quali la funzione di costo è massima.

$$\begin{aligned} f_c(x) &= \alpha_1 \frac{tp(x)}{tp_M} + \alpha_2 \frac{fp(x)}{fp_M} \\ \alpha_1 &= 1 \quad \alpha_2 = -1 \end{aligned} \tag{A.11}$$

Kernel	Parametri del Kernel				
Polinomi	1	2	3	4	5
RBF	0.5	1	3	5	10

Tabella A.1. Parametri di confugurazione SVM

- Risultati

Sono stati computate ben 9 ore di video per training (2000 Key Frames), e 6 ore di video sequenze al fine di ottimizzare i parametri delle SVM.

I test, fig.A.8, sono stati effettuati successivamente su circa 10 ore di video ulteriore e hanno messo in evidenza di come il sistema di pre elaborazione consenta di migliorare le prestazioni rispetto al sistema senza una procedura di eliminazione dei frame considerati come rumore.

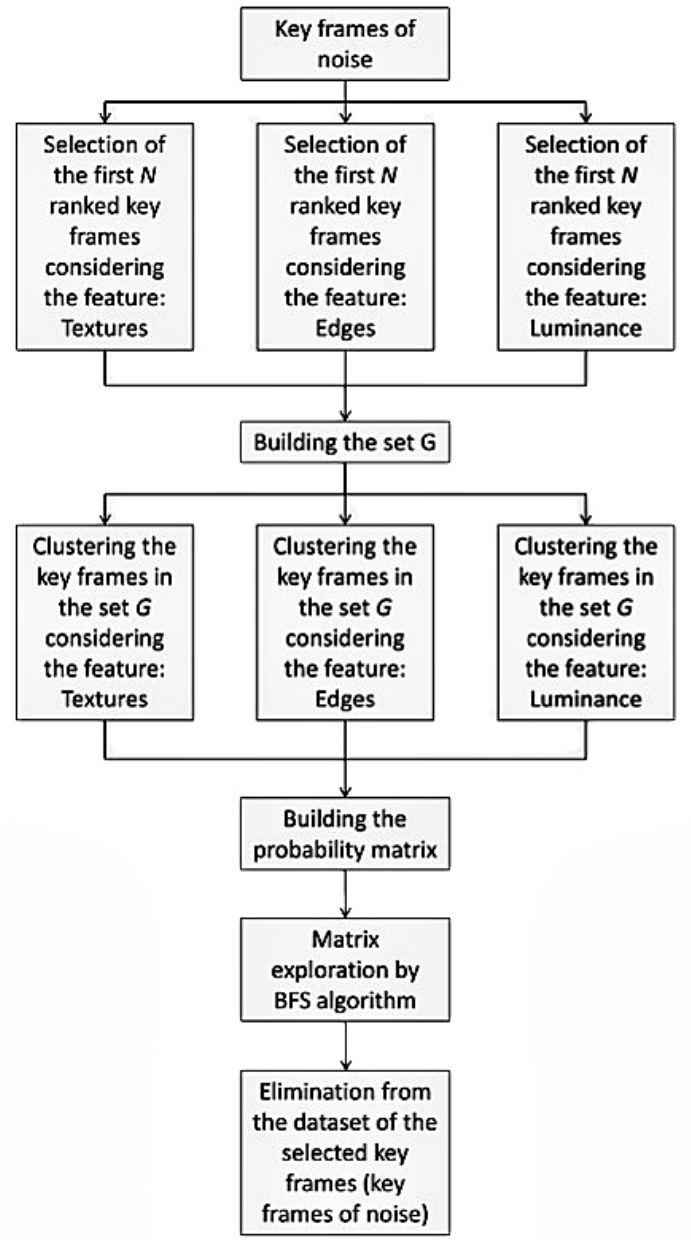
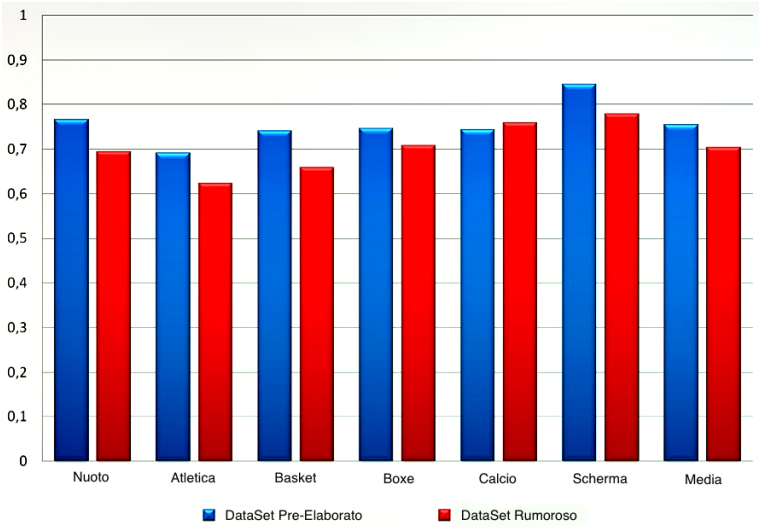
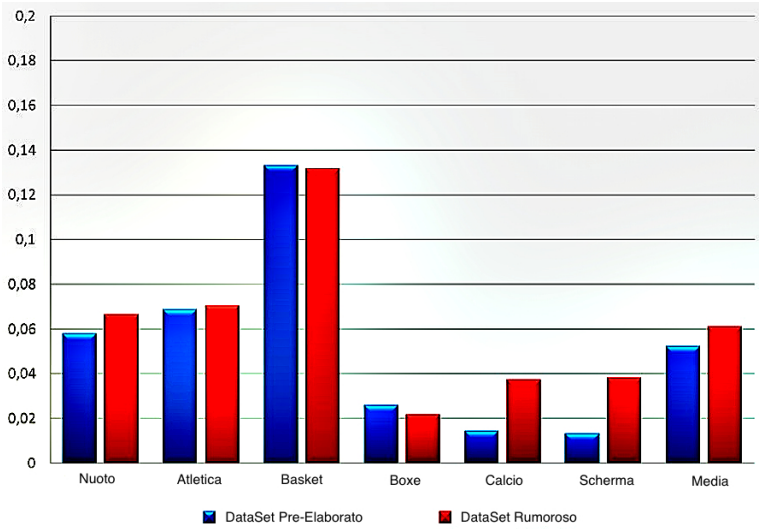


Figura A.7. Algoritmo di Preprocessing



(a) *Veri Positivi*



(b) *Falsi Positivi*

Figura A.8. Risultati di Test

Indice delle Pubblicazioni

[Pal01] E. Pallotti,F. Mangiatordi, *Smart grid cyber security requirements*, Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011 10th International Conference on, DOI:10.1109/EEEIC.2011.5874822, May 2011.

[Pal02] E. Pallotti; L. Capodiferro; F. Mangiatordi; P. Sità, *Smooth image inpainting by least square oriented edge prediction*, SPIE Proceedings Vol. 8295 Image Processing: Algorithms and Systems X, DOI:10.1117/12.908297, March 2012.

[Pal03] L. Capodiferro, L. Costantini, F. Mangiatordi, E.Pallotti, *SVM for historical sport video classification*, Communications Control and Signal Processing (ISCCSP), 2012 5th International Symposium on, DOI:10.1109/ISCCSP.2012.6217817, May 2012.

[Pal04] F. Mangiatordi, E.Pallotti, P. Del Vecchio, F. Leccese, *Power consumption scheduling for residential buildings*, Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012 11th International Conference on, DOI:10.1109/EEEIC.2012.6221508, May 2012.

[Pal05] L. Costantini, F. Mangiatordi, E. Pallotti, P. Sita, *CHIP - Cultural heritage image processing tool*, Communications Control and Signal Processing (ISCCSP), 2012 5th International Symposium on, DOI:10.1109/ISCCSP.2012.6217820, May 2012.

[Pal06] L. Capodiferro, L. Costantini, F. Mangiatordi, E. Pallotti, *Data pre-processing to improve SVM video classification*, Content-Based Multimedia Indexing (CBMI), 2012 10th International Workshop on, DOI:10.1109/CBMI.2012.6269801, June 2012.

[Pal07] A. Bernardini, C. Delogu, E. Pallotti, L. Costantini, *Living the Past: Augmented Reality and Archeology*, Multimedia and Expo Workshops (ICMEW), 2012 IEEE International Conference on, DOI:10.1109/ICMEW.2012.67, July 2012.

[Pal08] F. Mangiatordi, E. Pallotti, M. Fasano, and P. Del Vecchio, *GA strategies for optimal planning of daily energy consumptions and user satisfaction in buildings*, Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2013 12th International Conference on, pp. 440–444, DOI:10.1109/EEEIC.2013.6549556, May 2013.

[Pal09] F. Mangiatordi, E. Pallotti, P. Del Vecchio, L. Capodiferro, *Residential consumption scheduling based on dynamic user profiling*, in Proceedings of the International Congress on Energy Efficiency and Energy-Related Materials, ENEFM'13, 9-12 October 2013. Springer Proceedings in Physics, Vol.155, Chapter N°11 ISBN:978-3-319-05520-6, May 2014 to appear.

[Pal10] F. Mangiatordi, E. Pallotti, P. Del Vecchio, *A Non Cooperative Game Theoretic Approach for Energy Management in MV grid*, Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2013 12th International Conference on, pp. 266–271, DOI:10.1109/EEEIC-2.2013.6737920, Nov 2013.

Bibliografia

[1] C. S. W. Group, "Smart grid cyber security strategy and requirements, the smart grid interoperability panel.," August 2010.

[2] S. Vaclav, "Global energy: The latest infatuations," *American Scientist*, vol. 99, no. 9, pp. 212–219, 2011.

[3] "Analyzing the reliability impact of distributed generation," vol. 2, pp. 1013–1018, 2001.

[4] Barker, P. D. Mello, and R.W., "Determining the impact of distributed generation on power systems. i. radial distribution systems," *Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 3, pp. 1645–1656, 2000.

[5] I.-S. Bae, J.-O. Kim, J.-C. Kim, and C. Singh, "Optimal operating strategy for distributed generation considering hourly reliability worth," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, pp. 287–292, 2004.

[6] Falaghi and H.-R. Haghifam, "Distributed generation impacts on electric distribution systems reliability: Sensitivity analysis," in *Computer as a Tool EUROCON 2005.The International Conference on*, vol. 2, pp. 1465–1468, November 2005.

[7] Q. Sun, Z. Li, and H. Zhang, "Impact of distributed generation on voltage profile in distribution system," in *International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*, vol. 1, pp. 249–252, 2009.

[8] L. R. P. P., "Microgrid: a conceptual solution," in *IEEE 35th Power Electronics Specialists Conference*, vol. 6, pp. 4285–4290, June 2004.

[9] E. Barklund, N. Pogaku, M. Prodanovic, C. Hernandez-Aramburo, and T. Green, "Energy management in autonomous microgrid using stability-

constrained droop control of inverters," vol. 23, pp. 2346–2352, Sept 2008.

[10] A. Dimeas and N. Hatziargyriou, "Operation of a multiagent system for microgrid control," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, pp. 1447–1455, 2005.

[11] J. Polonetsky, "Privacy and the smart grid: New frontiers, new challenges," in *31st International Conference of Data Protection and Privacy Commissioners*, November 2009.

[12] FPF, "http://www.futureofprivacy.org."

[13] K. B. P. Kurzweil, *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources.* 1st ed., 2009.

[14] G. M. Ehrlich, *Lithium-Ion Batteries, Handbook of Batteries.* 2002.

[15] C. J. Barnhart, M. Dale, A. R. Brandt, and S. M. Benson, "the energetic implications of curtailing versus storing solar- and wind-generated electricity," *Energy Environ. Sci.*, vol. 6, pp. 2804–2810, 2013.

[16] D. Mackay, *Sustainable energy: without the hot air.* Uit Cambridge Ltd, 2009.

[17] K. Clement-Nyns, E. Haesen, and J. Driesen, "The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 1, pp. 371–380, 2010.

[18] I. Cvetkovic, T. Thacker, D. Dong, G. Francis, V. Podosinov, D. Boroyevich, F. Wang, R. Burgos, G. Skutt, and J. Lesko, "Future home uninterruptible renewable energy system with vehicle-to-grid technology," in *Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE*, pp. 2675–2681, 2009.

[19] CEE, "Database promosso dalla commissione europea pvgis - http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis."

[20] D. Kirschen, "Demand-side view of electricity markets," vol. 18, pp. 520–527, 2003.

[21] Y. Cao, T. Jiang, and Q. Zhang, "Reducing electricity cost of smart appliances via energy buffering framework in smart grid," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 23, no. 9, pp. 1572–1582, 2012.

[22] C. Chen, S. Kishore, and L. Snyder, "An innovative rtp-based residential power scheduling scheme for smart grids," in *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 5956–5959, May 2011.

[23] J. Ferber, *Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence.* Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1st ed., 1999.

[24] S. McArthur, E. Davidson, V. Catterson, A. Dimeas, N. Hatziargyriou, F. Ponci, and T. Funabashi, "Multi-agent systems for power engineering applications;part i: Concepts, approaches, and technical challenges," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 1743–1752, Nov 2007.

[25] FIPA, "http://www.fipa.org."

[26] A. Dimeas and N. Hatziargyriou, "Operation of a multiagent system for microgrid control," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 1447–1455, Aug 2005.

[27] T. Logenthiran, D. Srinivasan, and D. Wong, "Multi-agent coordination for der in microgrid," in *Sustainable Energy Technologies, 2008. ICSET 2008. IEEE International Conference on*, pp. 77–82, Nov 2008.

[28] G. Jacovitti and A. Neri, "Multiresolution circular harmonic decomposition," *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 48, pp. 3242–3247, Nov 2000.

[29] G.Emilie-Male, *The Restorer's Handbook of Easel Painting.* Van Nostrand Reinhold, 1976.

[30] R. Arnheim, "Untersuchungen zur lehre von der gestalt," *Psychologische Forschung*, vol. 11, no. 1, pp. 2–119, 1928.

[31] S. Rane, J. Remus, and G. Sapiro, "Wavelet-domain reconstruction of lost blocks in wireless image transmission and packet-switched networks," in

Image Processing. 2002. Proceedings. 2002 International Conference on, vol. 1, pp. I–309–I–312 vol.1, 2002.

[32] D. Zhang and Z. Wang, "Image information restoration based on long-range correlation," *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, vol. 12, pp. 331–341, May 2002.

[33] M. Bertalmio, G. Sapiro, V. Caselles, and C. Ballester, "Image inpainting," in *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '00, (New York, NY, USA), pp. 417–424, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000.

[34] W. Gander, G. Golub, and R. Strebel, "Least-squares fitting of circles and ellipses," *BIT Numerical Mathematics*, vol. 34, no. 4, pp. 558–578, 1994.

[35] R. Frankot and R. Chellappa, "A method for enforcing integrability in shape from shading algorithms," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 10, pp. 439–451, Jul 1988.

[36] R. Fattal, D. Lischinski, and M. Werman, "Gradient domain high dynamic range compression," *ACM Trans. Graph.*, vol. 21, pp. 249–256, July 2002.

[37] K.-B. Duan and S. Keerthi, "Which is the best multiclass svm method? an empirical study," in *Multiple Classifier Systems* (N. Oza, R. Polikar, J. Kittler, and F. Roli, eds.), vol. 3541 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 278–285, Springer Berlin Heidelberg, 2005.