

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II**



**SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE**

**Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio**
(Classe delle Lauree in Ingegneria Civile ed Ambientale, Classe n. 35)

**Tesi di Laurea Magistrale in
Gestione delle Risorse Energetiche del Territorio**

**SCENARIO ANALYSYS OF HIGHER
PENETRATION OF RENEWABLE ENERGY
SOURCES IN ISLAND SYSTEMS**
a case study for Sardinia

Relatori:
Ch.mo Prof. Ing. Francesco Calise
Ch.mo Prof. Ing. Neven Duić

Candidata:
Alessandra Maria Orlando
Matr.: M67/431

Correlatori:
Ing. Maria Vicidomini
Ing. Antun Pfeifer

ANNO ACCADEMICO 2018/2019

ABSTRACT

Il presente lavoro di tesi è stato svolto in collaborazione con il Dipartimento di Energia, Ingegneria Energetica e Ambiente dell'università di Zagabria e riguarda l'analisi di scenari energetici ad alta penetrazione di fonti rinnovabili in sistemi isolani; in particolare, il caso in esame è quello della Regione Sardegna.

Per il caso studio sono stati costruiti 4 modelli simulanti il sistema energetico dell'isola in anni e condizioni differenti:

Il primo è il modello di riferimento, relativo all'anno 2017. è stato scelto quest'anno poiché abbastanza prossimo da rappresentare un riferimento quanto più attuale possibile, ma al contempo abbastanza distante nel tempo da poterne reperire dati e statistiche relativi al settore energetico.

Il secondo scenario ricalca le previsioni e le strategie presentate nel Piano Energetico e Ambientale della Regione Sardegna per il 2030 nei tre macro settori di elettricità, calore e trasporti.

Il terzo scenario rappresenta un'alternativa in termini di interventi da implementare rispetto a quella prevista dal piano regionale, sempre in riferimento all'anno 2030; l'obiettivo è superare gli obiettivi fissati dalla Regione, incrementando la quota produttiva di elettricità da fonti rinnovabili al 40%.

Il quarto ed ultimo scenario persegue l'obiettivo che l'Unione Europea ha intrapreso con gli accordi di Parigi per la lotta al cambiamento climatico, ovvero la cosiddetta carbon neutrality, un bilancio di emissioni di CO₂ pari a zero.

Il quadro normativo in cui si inserisce questo studio deve la sua conformazione a una serie di cambiamenti avvenuti successivamente alla ventunesima conferenza delle parti tenutasi a Parigi nel 2015; questo accordo, firmato da 196 Paesi, stabilisce che i firmatari si impegnino a contenere il fenomeno del surriscaldamento terrestre al di sotto dei due gradi Celsius rispetto ai livelli pre industriali. Non stabilisce strategie da implementare ma lascia che ogni nazione, o gruppo di nazioni se si considera l'Europa, legiferi in merito. In quest'ottica, l'Unione Europea ha emanato il Pacchetto Clima Energia 2020, altrimenti noto come Direttiva 20 20 20 con cui si impegna a ridurre del 20% le emissioni di CO₂ rispetto al 1990, di incrementare del 20% la quota di energia prodotta da fonti rinnovabili e di tagliare del 20% la quota annua di consumi energetici. Per implementare il Pacchetto Clima Energia è stato sviluppato il sistema ETS,

l'Emission Trading System. L'ETS si basa sul concetto di cap and trade che fissa un tetto massimo (cap) al livello complessivo delle emissioni consentite a tutti i soggetti vincolati assegnate annulamente, ma permette ai partecipanti di acquistare e vendere sul mercato (trade) diritti a emettere CO₂ (quote). Ad ogni Paese è assegnato un obiettivo annuale di riduzione di emissioni che corrisponde l'anno seguente ad una assegnazione in numero inferiore delle quote a sua disposizione. Ciò comporta che il sistema debba ritirare dal mercato ogni anno un numero di quote tali da far sì che questo surplus non faccia crollare il prezzo della singola tonnellata di CO₂ che attualmente si aggira intorno ai 27€.

Il Patto dei Sindaci, o Covenant of Mayors, è il ponte di collegamento tra le autorità europee e quelle locali in termini di pianificazione energetica e implementazione degli interventi. L'ambizione collettiva è quella di ridurre le emissioni del 40% entro il 2030.

Per quanto riguarda l'anno 2050, l'obiettivo fissato dall'Unione Europea nell'Energy Roadmap è, come detto, la completa decarbonizzazione dell'economia europea raggiungendo un bilancio emissivo netto pari a zero.

A livello italiano strumenti pianificativi sono:

- il Piano d'Azione per l'Efficienza Energetica (PAEE) che è il documento programmatico che fornisce indicazioni dettagliate sulle azioni da attuare per raggiungere gli obiettivi di miglioramento dell'efficienza energetica e dei servizi energetici;
- il Piano d'Azione Nazionale (PAN) che fornisce indicazioni dettagliate sulle azioni da attuare per raggiungere, entro il 2020, l'obiettivo vincolante per l'Italia di coprire il 17% del totale lordo consumo con energia prodotta da fonti rinnovabili.

Per assicurare il raggiungimento di tale obiettivo in Italia vige il burden sharing con cui ad ogni regione e provincia autonoma è assegnato una diversa soglia emissiva da conseguire nei tempi previsti commisurata alle specificità delle regioni.

Questo si traduce nel Piano Energetico e Ambientale Regionale, redatto ogni anno dalle Regioni allo scopo di analizzare il sistema nella sua composizione e delineare una linea d'azione tecnica e pratica per il raggiungimento degli obiettivi intermedi. Questo documento è alla base della modellazione del secondo scenario.

Per la modellazione degli scenari è stato utilizzato il software EnergyPLAN rilasciato per la prima volta nel 1999 dall'università di Alborg in Danimarca, che ha raggiunto quest'anno la sua 14esima versione, rilasciata in collaborazione con l'università di Zagabria. Il software è un modello deterministico, basato su una programmazione analitica, che riproduce il funzionamento di un sistema energetico dal livello cittadino a quello nazionale ed oltre. Il software è programmato per ottimizzare le operazioni tecniche sul sistema più che gli investimenti e i costi, e trova la sua forza nella capacità di simulare correttamente un sistema complesso e variabile come quello energetico sulla base di un numero esiguo di input disaggregati. I risultati forniti all'utente hanno un livello massimo di dettaglio dell'ordine dell'ora, parliamo quindi di 8784 valori, uno per ogni ora dell'anno considerato l'anno bisestile.

Entrando nel merito della ricerca, il primo passo è stato costruire il modello storico di riferimento. Il territorio in esame è quello della Regione Autonoma della Sardegna, seconda isola del Mediterraneo per estensione, che nell'anno in esame conta all'incirca 1.66 milioni di abitanti.

Per quanto riguarda la domanda di elettricità i dati forniti dal rapporto di Terna, l'operatore nazionale di gestione della rete elettrica, registrano nel 2017 una richiesta di 8.76 TWh e una produzione di circa 11 TWh; il 24% della produzione è stato quindi esportato mentre il 6% della domanda è stato soddisfatto da energia proveniente dal continente.

La connessione con il continente è garantita per la Sardegna tramite due linee di trasmissione; il primo storicamente è il SACOI, che collega Sardegna e Toscana utilizzando la Corsica come ponte fisico, con una capacità di scambio di 400 MW; successivamente è stato inaugurato il SAPEI che collega la Sardegna con il Lazio ed è denominato *il cavo dei record*; ha una capacità di 1000 MW si articola per 435 km di cui 420 sommersi, a 1640 metri di profondità nel Tirreno.

Per quanto riguarda la domanda di energia termica relativa al riscaldamento domestico e alla produzione di acqua calda sanitaria sono stati considerati i dati ISTAT per il 2017 riguardanti le tecnologie installate e i consumi dei combustibili utilizzati a tale scopo; è evidente come la popolazione faccia ancora molto affidamento a impianti isolati e indipendenti, specialmente caldaie a biomassa. La motivazione è da ricercare nell'assenza di terminali di gasdotti per l'approvvigionamento di metano presenti sull'isola che rende la fornitura

estremamente più onerosa per i costi addizionali di trasporto connessi alla necessità di far arrivare il metano liquefatto via mare.

Per modellare la domanda di trasporti si è fatto riferimento al Bollettino Petrolifero 2017, un documento emesso ogni anno dal Ministero dello Sviluppo Economico; il software permette di modellare la domanda in termini di combustibile richiesto per le diverse tecnologie presenti nel sistema siano esse motori a combustione interna o elettrici. I dati estrapolati evidenziano, nell'anno in esame, una netta preponderanza di motori diesel nel parco veicolare Regionale, incluso non solo il trasporto privato ma anche quello pubblico e quello merci.

Per quanto riguarda la fornitura di energia immessa in rete è stato consultato di database dell' European Network Transmission Systems Operator che riporta un censimento anno per anno delle unità produttive presenti sul territorio; per ogni impianto riporta il tipo di tecnologia utilizzata, il nome della ditta che lo gestisce, la localizzazione e la potenza installata.

Le centrali termoelettriche tradizionali operative sul territorio per l'anno in esame sono 5; Fiume Santo, Assemini, Sarlux, Ottana Energia e Sulcis per una potenza complessiva installata di 1836 MW.

Lo stesso database è stato consultato per censire gli impianti fotovoltaici, eolici e idroelettrici connessi alla rete.

La fornitura regionale quindi si appoggia per il 77% sui combustibili fossili di cui il 53% percento carbone, il 34% gas naturale e il restante 13% olio combustibile.

La Sardegna, grazie alla sua posizione nel mediterraneo rappresenta il sito ideale per l'installazione di tecnologie dipendenti dalla radiazione solare; registra un valor medio di irraggiamento annuo di 1800 kWh/m², quasi il doppio della media italiana. Il database ENTSO-E conta nel 2017, 4 campi solari attivi per una potenza complessiva installata di 94 MW. Tramite il software PV-GIS, strumento di calcolo della producibilità degli impianti fotovoltaici, è stato stimato l'andamento orario annuale della produzione da tali unità, specificando per ognuna le coordinate del sito e la potenza installata.

Allo stesso modo è stato censito il parco eolico della regione, molto più ricco e uniformemente distribuito di quello fotovoltaico; il database riporta 20 impianti eolici, per una potenza complessiva installata di 974 MW. Tramite il sistema informativo meteonorm, che si occupa della stima e della raccolta dei parametri relativi alla meteorologia, è stata prevista la producibilità di tali impianti sulla base dei dati storici di velocità del vento, tenendo conto delle curve di potenza caratteristiche delle turbine installate in ogni sito; in tal modo si è ottenuta la distribuzione oraria annuale di producibilità.

La gestione dei rifiuti solidi urbani è operata in Sardegna da 8 impianti sparsi sul territorio di cui 2, quello di Macomer e l'impianto Tecnocasic, dotati di un termovalorizzatore per disporre della frazione energeticamente valorizzabile del conferito. Nell'anno in esame, in particolare, l'impianto di Macomer è stato fermo a causa di due incendi che hanno interessato la linea del termovalorizzatore. I dati sulla quantità di rifiuto conferito mensilmente, la caratterizzazione merceologica, da cui deriva la definizione del potere calorifico medio del rifiuto, e l'efficienza di conversione elettrica sono stati ricavati da un'interrogazione all'Agenzia Regionale di Protezione Ambientale e all'impianto Tecnocasic stesso.

Per validare il modello così definito si sono confrontati due parametri fortemente rappresentativi del funzionamento del sistema energetico, le emissioni di CO₂ e la fornitura complessiva di energia primaria, paragonando il valore di output di EnergyPLAN con quelli misurati rispettivamente dall'EDGAR, Emission Database for Global Atmospheric Research, e dall'IEA, International Energy Agency. Entrambi i confronti riportano margini di errore inferiori al 5%.

Per la definizione dello scenario Business As Usual del 2030 sono stati consultati gli obiettivi generali delineati dal Piano Energetico e Ambientale Regionale 2015-2030 che si compone di 4 macrocategorie :

- trasformazione del sistema energetico della Sardegna verso una configurazione integrata e smart
- incremento dell'efficienza dei processi energivori con relativo risparmio in termini di consumi
- sicurezza dell'approvvigionamento energetico
- promozione della ricerca e della partecipazione attiva sul tema energia

Per il settore elettrico, le strategie da implementare riguardano principalmente l'utilizzo in autoconsumo istantaneo di impianti da fonti rinnovabili di piccola taglia con cui gli utenti possono generare energia in modo autonomo e eventualmente usufruire del libero mercato per rivendere i surplus alle aziende. L'autoconsumo istantaneo è un passo avanti nella riduzione delle emissioni ma è una prospettiva poco lungimirante nell'ottica di ottenere uno smart system integrato e interconnesso e soprattutto, non contribuisce in alcun modo alla stabilità della rete rendendo il sistema poco elastico.

Così facendo, la domanda sulla rete diminuisce, e dei 1836 MW di termoelettrico tradizionale operanti nel 2017, rimangono operativi 960 MW alimentati principalmente a gas; 600 per la copertura del carico di base e 360 per la copertura dei picchi di domanda.

L'obiettivo per la produzione da rinnovabili da immettere in rete è di raggiungere i 4.9 TWh.

Per il settore dell'energia termica si prevede una riduzione della richiesta del 20% rispetto al valore del 2017 conseguente a delle operazioni di efficientamento dell'isolamento degli edifici; il Piano prevede inoltre un utilizzo più diffuso del metano e delle pompe di calore con dismissione delle caldaie a propano e biomasse.

Per il settore dei trasporti, in linea con le direttive europee sui veicoli elettrici, il Piano regionale prevede una dismissione completa dei veicoli a benzina e diesel a favore dei veicoli elettrici a batteria e plug-in. Prevede inoltre una campagna di incentivi all'uso del trasporto pubblico, anch'esso parzialmente elettrificato, e dei servizi di car pooling e car sharing. Entro il 2030, inoltre, si prevedono completati i lavori della linea metropolitana collegante Cagliari e Sassari.

Nella validazione del modello si andranno a confrontare i risultati in output al software, con i valori calcolati previsti dal Piano. I parametri sono le emissioni di CO₂ e l'energia primaria proveniente da combustibili fossili. Gli obiettivi di riduzione sono commisurati sulle emissioni nette. L'obiettivo della riduzione del 40% delle emissioni nette al 2030 è raggiunto sia nelle previsioni del piano che nello scenario modellato nel software.

Per la modellazione degli scenari ad alta penetrazione rinnovabile, High RES scenario 2030 e Full Decarbonization 2050, sono stati considerati interventi che

promuovano l'elettrificazione dei sistemi più energivori, sfruttando l'elettricità prodotta da fonti di energia rinnovabile.

La definizione di un sistema così fortemente dipendente da FER prescinde necessariamente dall'implementazione, tra le altre cose, di sistemi di stoccaggio dell'energia in grado di superare le criticità intrinseche di queste tecnologie connesse alla loro natura fluttuante e non programmabile.

Le tecnologie di stoccaggio elettrico implementate in questi scenari sono tre:

- *stoccaggio idroelettrico*; gli impianti idroelettrici a bacino possono essere utilizzati sia come unità produttive che di stoccaggio. Il rotore utilizzato in fase produttiva come turbina assume funzione di pompa nelle fasce orarie di surplus di elettricità, portando la massa d'acqua a quota maggiore e trasformando così l'energia in eccesso in energia potenziale, pronta a essere riconvertita in energia elettrica.
- *stoccaggio di idrogeno*; l'eccesso di produzione elettrica può essere utilizzato nei processi di elettrolisi dell'acqua per produrre idrogeno molecolare. Questo gas, caratterizzato da un potere calorifico più alto di quello del metano, può essere stoccato e utilizzato come combustibile nei processi industriali o nel settore dei trasporti. Lo svantaggio di questa tecnologia è che l'energia elettrica viene trasformata in energia chimica e il processo inverso si può ottenere solo mediante combustione; di conseguenza, nei momenti in cui è necessaria un'integrazione, non è immediatamente fruibile.
- *Tecnologia Vehicle to Grid*; questo sistema permette alle auto elettriche caratterizzate da un sistema di ricarica smart-charge di poter scambiare con la rete elettrica. Nelle fasce orarie di minor richiesta gli utenti potranno acquistare energia dalla rete a prezzi inferiori e stoccarla nella batteria del veicolo. Quando si presenta la necessità di un'integrazione sulla rete, le batterie dei veicoli collegati fungeranno da riserva, con un rientro economico positivo per gli utenti.

Lo scenario High RES 2030 comporta, con le nuove installazioni di fotovoltaico e eolico, una percentuale di elettricità prodotta da fonti di energia rinnovabile pari al 100% e un risparmio di energia primaria del 30% rispetto allo scenario proposto dalla Regione. Si prevede un'installazione di 790 MW di elettrolizzatori che producano idrogeno destinato al trasporto e all'alimentazione delle centrali

termoelettriche ancora operanti per la copertura dei picchi di domanda. In questo scenario sono state eliminate le ipotesi previste dal Piano Regionale sull'istallazione di impianti produttivi FER di piccola taglia destinati all'autoconsumo istantaneo degli utenti, nell'ottica di pervenire ad un sistema il più interconnesso possibile. Un'alta interconnessione dei comparti energivori è un requisito fondamentale all'ottenimento di uno smart system indipendente e stabile.

Lo scenario Full-Decarbonization 2050 prevede ulteriori istallazioni di impianti fotovoltaici e eolici per la completa copertura della richiesta elettrica. 300 MW di termoelettrico tradizionale persistono per assicurare l'approvvigionamento elettrico; questo impianto è alimentato completamente a biometano, recuperato dal biogas prodotto in digestione anaerobica dalla biodegradazione della frazione organica del rifiuto solido urbano. Il trasporto, pubblico privato e merci, è completamente elettrificato, dando precedenza ai veicoli smart-charge rispetto a quelli a idrogeno per raggiungere un livello di interscambio tra la rete e i dispositivi di stoccaggio più immediato. Parte dei processi industriali si considera elettrificato sulla base di studi che prevedono per il futuro una disponibilità maggiore di tali tecnologie; in particolare si considerano soggetti a questo processo i settori metallurgico e estrattivo. Il processo di decarbonizzazione industriale è stato effettuato mantenendo costante il totale di energia primaria immessa, quando il rendimento energetico lo consente; è stato eliminato qualsiasi contributo dei prodotti petroliferi, che è stato quindi distribuito il 30% sulla biomassa, il 60% sull'elettricità e il restante 10% sull'idrogeno.

I risultati forniti dal software per lo scenario 2050 evidenziano come sia teoricamente possibile per la Regione Sardegna il raggiungimento della neutralità climatica.

A valle dello studio dei diversi scenari si è pervenuti alla conclusione che i punti fondamentali per l'attuazione di questo proposito siano i seguenti:

- un adeguato sistema di interconnessione elettrica con la terraferma;
- implementazione di sistemi di stoccaggio elettrico efficienti e diversificati;
- elettrificazione dei processi industriali o, alternativamente, utilizzo dell'idrogeno come combustibile;
- elettrificazione del trasporto pubblico e privato;
- elettrificazione dei sistemi di riscaldamento domestico e, ove possibile, istallazione di sistemi ausiliari di produzione di energia termica individuali provenienti da fonti di energia rinnovabile.

Con questi interventi, le emissioni nette per il territorio Regionale ammonterebbero a 230 tonnellata di CO₂ all'anno, meno del 2% di quelle registrate nel 1990. L'obiettivo imposto dalla Comunità Europea di completa decarbonizzazione al 2050 risulta, di conseguenza, fattibile.