

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in INGEGNERIA INFORMATICA M

Tesi di Laurea in SISTEMI INTELLIGENTI

Integrazione di ottimizzazione e simulazioni per il piano energetico regionale dell'Emilia-Romagna

Candidato:
Andrea Borghesi

Relatore:
Chiar.ma Prof. Michela Milano

Correlatori:
Prof. Marco Gavanelli

Anno Accademico 2011/2012 - Sessione III

Indice

Introduzione	1
1 Quadro generale	3
1.1 E-Policy	4
1.2 Pianificazione regionale	8
1.2.1 Vincoli finanziari	9
1.2.2 Impatti	10
1.2.3 Obiettivi	13
1.3 Strategie implementative	15
1.3.1 Incentivi	15
1.3.2 Incentivi europei	18
1.3.3 Incentivi italiani	23
1.3.4 Incentivi regionali	27
2 Simulazione	31
2.1 Strumenti	31
2.1.1 Netlogo	31
2.2 Modello ad agenti	35
2.3 Simulatore base	37
2.3.1 Descrizione simulatore	38
2.3.2 Agenti del modello	39
2.3.3 Valutazione fattibilità	41
2.3.4 Esecuzione del modello	44
2.4 Simulatore esteso	46
2.4.1 Modalità incentivanti	46
2.4.2 Interazione sociale	48
2.5 Limiti simulatore	49

3	Risultati simulazioni	53
3.1	Strumenti	53
3.1.1	R	53
3.2	Metodologia analitica	56
3.2.1	Analisi di regressione	57
3.2.2	Implementazione in R	59
3.3	Analisi risultati	63
3.3.1	Comportamento degli incentivi	63
3.3.2	Effetti dell'interazione sociale	75
4	Ottimizzazione	83
4.1	CLP	84
4.2	Strumenti	86
4.2.1	ECL ⁱ PS ^e	86
4.3	Modellazione problema	87
4.3.1	Approccio a vincoli	88
4.3.2	Modello CLP	89
4.3.3	Implementazione modello	92
4.4	Il piano regionale 2011-2013	98
5	Interazione componenti	105
5.1	Integrare DSS e simulazioni	106
5.2	Regressione lineare a tratti	110
5.2.1	Implementazione in R	112
5.3	Integrazione modello	114
5.3.1	Variabili	114
5.3.2	Vincoli	115
5.4	Assegnazione fondi	117
	Conclusioni	123
	A Esempi di CLP	127
	Bibliografia	138

Elenco delle figure

1.1	Processo di decisione delle Politiche	5
1.2	Schema generale del sistema	6
1.3	Frontiera ottima di Pareto per i piani energetici e due funzioni obiettivo	14
1.4	Riassunto degli strumenti di supporto per l'energia da rinnovo- vabili negli stati membri dell'EU. Fonte [1].	19
1.5	Tariffe incentivanti distinte per paese e tecnologia (Aprile 2010). Fonte [2]	20
1.6	Fonti rinnovabili in Italia (2011)	23
1.7	Valori medi, minimi e massimi delle richieste accettate per il programma per le energie rinnovabili del 2001	29
1.8	Distribuzione dei progetti PV finanziati, in base alle dimen- sioni e al contributo richiesto, 2001	30
2.1	Il mondo virtuale di Netlogo	33
2.2	Esempio dell'ambiente di sviluppo di NetLogo	34
2.3	Flow chart della valutazione degli investimenti	43
2.4	Mondo virtuale di Netlogo	44
2.5	Grandezze caratteristiche della simulazione	45
2.6	Mondo virtuale, area interazione sociale	49
3.1	Esempio di utilizzo di R	56
3.2	Fondo Asta	64
3.3	Fondo Asta, analisi dei residuali	65
3.4	Fondo Asta, distribuzione errori	67
3.5	Conto Interessi	68
3.6	Conto Interessi, analisi dei residuali	69

3.7	Fondo Rotazione, analisi dei residuali	70
3.8	Fondo Rotazione	71
3.9	Fondo Garanzia	73
3.10	Fondo Garanzia, analisi dei residuali	74
3.11	Confronto tra i diversi incentivi	75
3.12	Fondo Asta, sensibilità a influenza sociale	77
3.13	Conto Interessi, sensibilità a influenza sociale	77
3.14	Fondo Rotazione, sensibilità a influenza sociale	78
3.15	Fondo Garanzia, sensibilità a influenza sociale	78
3.16	Fondo Asta, sensibilità a raggio interazione	80
3.17	Conto Interessi, sensibilità a raggio interazione	80
3.18	Fondo Rotazione, sensibilità a raggio interazione	81
3.19	Fondo Garanzia, sensibilità a raggio interazione	81
4.1	ECL ⁱ PS ^e , Interfaccia Utente	87
4.2	Panoramica di Input e Output del DSS di ePolicy	88
4.3	Confronto tra il piano degli esperti e quelli estremi che sfrut- tano un'unica risorsa energetica	101
4.4	Frontiera ottima di Pareto della qualità dell'aria rispetto al costo	102
4.5	Valore dei recettori sulla frontiera di Pareto	104
5.1	Modello di interazione basato su Apprendimento Automatico .	107
5.2	Modello di interazione basato su Decomposizione di Benders .	109
5.3	Una funzione (in blu) e la sua approssimazione lineare a tratti (in rosso). Fonte <a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Finite_-
element_method_1D_illustration1.svg">http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Finite_- element_method_1D_illustration1.svg	111
5.4	Confronto tra i diversi incentivi - Approssimazione lineare a tratti	113
5.5	Assegnazione Fondi - Budget €12M	118
A.1	Send More Money puzzle	127
A.2	Esempio di un problema CLP(\mathcal{R}). Fonte [19]	130

Elenco delle tabelle

4.1	Esempio di piano energetico per l'elettricità realizzando unicamente centrali a biomassa	100
4.2	Piano energetico ideato dagli esperti	102
4.3	Piano energetico che domina quello degli esperti, con stessa qualità dell'aria ma costo inferiore	103
5.1	Assegnazione Fondi - €2.5M	119
5.2	Assegnazione Fondi - €5M	119
5.3	Assegnazione Fondi - €10M	120
5.4	Assegnazione Fondi - €15M	121
5.5	Assegnazione Fondi - €20M	121
5.6	Assegnazione Fondi - €40M	122

Introduzione

La definizione delle politiche pubbliche a livello nazionale, regionale o locale è un compito complesso, in quanto occorre operare in ambiti caratterizzati da dinamicità e incertezza, tentando di risolvere diverse problematiche e conciliando interessi conflittuali. Fattori come la globalizzazione o la sostenibilità ambientale rendono ancora più difficili le scelte che i decisori politici sono tenuti ad effettuare per l'ideazione e l'implementazione di strategie in grado di affrontare le sfide reali della società odierna, senza sottovalutare il fatto che l'elevata complessità dei sistemi considerati non consente di determinare facilmente gli effetti relativi alle decisioni prese.

Da tutto ciò consegue che sia profondamente avvertita l'esigenza di sviluppare metodologie e strumenti di cui i decisori politici si possano avvalere per gestire le problematiche di questo settore. In questa direzione procede lo sviluppo di modelli matematici e computazionali alla base dei sistemi di supporto alle decisioni politiche; tali sistemi devono essere in grado di fornire una serie di scenari decisionali alternativi, con i quali è possibile aiutare il politico a svolgere il proprio compito, ma certamente senza sostituirvisi. Prendere le decisioni senza un supporto informatico è estremamente difficile poiché sia esse che le loro interconnessioni, ovvero impatti e conseguenze che ne derivano, sono moltissime e anche perché occorre prendere in considerazione diversi aspetti, da quelli economici a quelli ambientali e sociali che hanno un grado di complessità intrinseca molto elevato.

Come esempio, basti pensare alle valutazioni da fare per l'ottimizzazione di uno o più recettori ambientali, come la qualità dell'aria o delle acque. Invece, per quanto riguarda gli aspetti sociali, è necessario tenere conto di come la società reagirà alle politiche che si vogliono implementare: ad esempio se a fronte di determinati meccanismi incentivanti i cittadini o gli imprenditori investiranno in impianti di energia da fonti rinnovabili. Disporre quindi di

un sistema che modelli dal punto di vista matematico le decisioni di un piano (locale, regionale, nazionale e così via) permette di prendere in considerazione tutti questi aspetti contemporaneamente, in modo da generare politiche che abbiano impatti economici, sociali e ambientali accettabili e controllati.

Il lavoro da noi svolto e che ci accingiamo a illustrare rientra nell'ambito sopra esposto. In particolare rientra all'interno del progetto e-Policy (Engineering the Policy Making Life Cycle), finanziato nel VII Programma quadro dell'Unione Europea, dedicato allo sviluppo di sistemi di supporto ai decisori per produrre politiche sostenibili dal punto di vista ambientale e socialmente accettate; la regione Emilia-Romagna è partner di questo progetto e lo sviluppo del piano regionale energetico ha fornito il caso di studio per e-Policy e il lavoro in seguito presentato. Da un punto di vista molto generale, il sistema per il supporto alle decisioni sviluppato è costituito da componenti che si avvalgono di metodi provenienti da settori diversi come l'intelligenza artificiale, la ricerca operativa, sociologia, economia, etc. Per quanto riguarda il lavoro qui descritto, l'ambito considerato è quello dell'intelligenza artificiale e i componenti studiati sono un simulatore ad agenti per la comprensione del comportamento dei cittadini in reazione alle politiche che si desidera implementare e un ottimizzatore che si occupa di modellare matematicamente e individuare un piano regionale energetico ottimo.

Per questi motivi, nel primo capitolo di questa trattazione forniremo un quadro dettagliato del progetto e-Policy e delle problematiche relative alla pianificazione regionale. Successivamente nei capitoli secondo e terzo saranno mostrati rispettivamente il simulatore economico-sociale e l'analisi statistica dei risultati delle simulazioni. Nel quarto capitolo discuteremo la modellazione matematica e la fase di ottimizzazione, mentre nel quinto capitolo parleremo dell'interazione tra quest'ultima fase e quella di simulazione.

1 | Quadro generale

Le politiche pubbliche sono estremamente complesse, avvengono in ambienti che cambiano rapidamente caratterizzati da incertezza e coinvolgono conflitti tra diversi interessi. La nostra società è sempre più complessa a causa della globalizzazione, dell'ampliamento e del cambiamento delle situazioni geopolitiche. Questo implica che l'attività politica e la sua area di intervento si siano estese, rendendo più difficili da determinare gli effetti di tali interventi, mentre al tempo stesso diventa sempre più importante assicurarsi che le azioni intraprese affrontino in maniera efficace le sfide reali che la crescente complessità comporta.

Da questo consegue che coloro responsabili di creare, implementare e far rispettare le politiche devono essere in grado di giungere a delle decisioni nel caso di problemi mal definiti e non pienamente compresi, senza una singola risposta corretta, che coinvolgono diversi interessi in competizione e interagiscono con altre politiche su multipli livelli. È quindi necessario trattare con coerenza tali problematiche e ricercare tecniche, metodologie e strumenti per affrontare la complessità in questo settore.

Con questo scopo in mente è stato ideato il progetto ePolicy che verrà ora introdotto; nel resto del capitolo verranno quindi fornite una descrizione di questo progetto in termini generali, seguito dalla presentazione del caso di studio con cui si è deciso di testare le tecniche sviluppate - la regione Emilia-Romagna - e per passare infine a descrivere le strategie implementative adottabili per la messa in atto delle politiche studiate.

1.1 Il Progetto E-Policy

Il progetto europeo *ePolicy* (dall'inglese Engineering the Policy Making Life Cycle, cioè ingegnerizzare il processo di creazione delle politiche) ha come obiettivo la creazione di un sistema di supporto alle decisioni per la pianificazione regionale e la valutazione degli impatti sociali, economici e ambientali. Con l'espressione *sistema di supporto alle decisioni* (a cui in seguito ci riferiremo anche utilizzando l'acronimo *DSS*, dall'inglese Decision Support System) si intende una classe molto ampia di sistemi software che hanno come scopo aiutare a prendere decisioni in caso di gestione di problemi complessi, facilitando l'analisi di grandi quantità di dati e suggerendo strategie e politiche da adottare.

Avviato nell'Ottobre del 2011, il progetto è coordinato dall'Università di Bologna e coinvolge nove partner tra mondo dell'accademia e della ricerca, governi regionali e settore privato, distribuiti in cinque paesi diversi dell'Unione Europea.

I decisori politici devono prendere decisioni complesse valutando un notevole numero di variabili e vincoli, tenendo conto quindi degli impatti che le loro scelte avranno su diversi aspetti ambientali, economici e sociali. Al tempo stesso, si è osservata negli anni un sempre crescente desiderio da parte dei cittadini di contribuire alla creazione delle politiche attraverso mezzi come i social network e i blog.

L'intenzione del progetto, una volta concluso, è quella di permettere a coloro che effettuano le decisioni di disporre di un sistema integrato e user-friendly, in grado di creare e valutare piani alternativi altamente ottimizzati tra i quali poter scegliere sulla base di una dettagliata analisi dei costi e benefici degli stessi.

Oltre a esaminare gli aspetti teorici, il progetto ePolicy mira a applicare i suoi risultati a un caso pratico: la pianificazione energetica nella regione Emilia-Romagna. In particolare, il governo regionale si è posto l'obiettivo di incrementare la produzione di energia da fonti rinnovabili, concentrandosi soprattutto sulle tecnologie fotovoltaiche (PV) e a biomassa. Di conseguenza,

ePolicy punta a sviluppare un modello che fornirà supporto ai decisori politici della regione che stanno cercando di mettere in pratica il miglior meccanismo incentivante per stimolare la crescita della produzione energetica da alcune tecnologie rinnovabili.

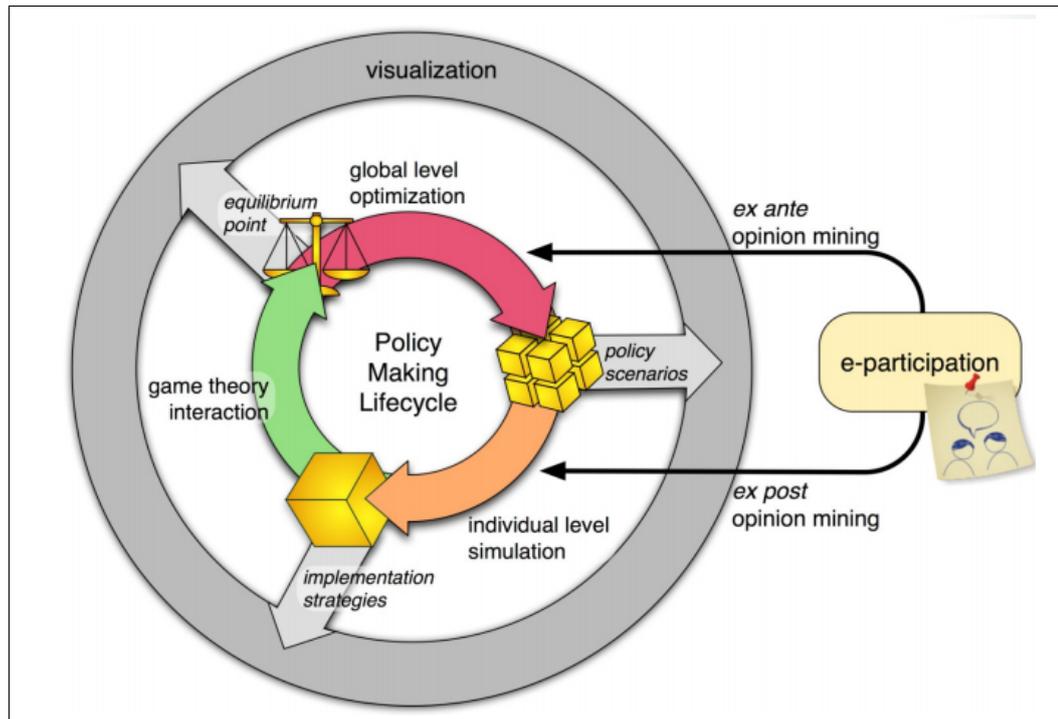


Figura 1.1: Processo di decisione delle Politiche

In Figura 1.1 osserviamo in che modo sia strutturato il ciclo di vita del processo di creazione delle politiche all'interno del progetto ePolicy:

- il livello di ottimizzazione globale, che prende in considerazione gli obiettivi, gli aspetti finanziari e gli impatti socio-ambientali su larga scala (produce dei piani e degli scenari per le politiche);
- il livello individuale delle simulazioni ad agenti, con il quale si intendono simulare comportamenti sociali riguardanti le nuove politiche sulla base delle opinioni e desideri personali (per ottenere le strategie implementative);
- l'integrazione tra la prospettiva globale e quella individuale, ad esempio con tecniche mutuata dalla teoria dei giochi;

- l'individuazione degli impatti sociali e le reazioni delle persone attraverso l'uso di tecniche di opinion mining , cioè estrazione delle opinioni, con i dati raccolti in rete (servendosi di blog, forum, social network,...);
- la visualizzazione dei risultati attraverso strumenti appositamente ideati per aiutare i decisori politici.

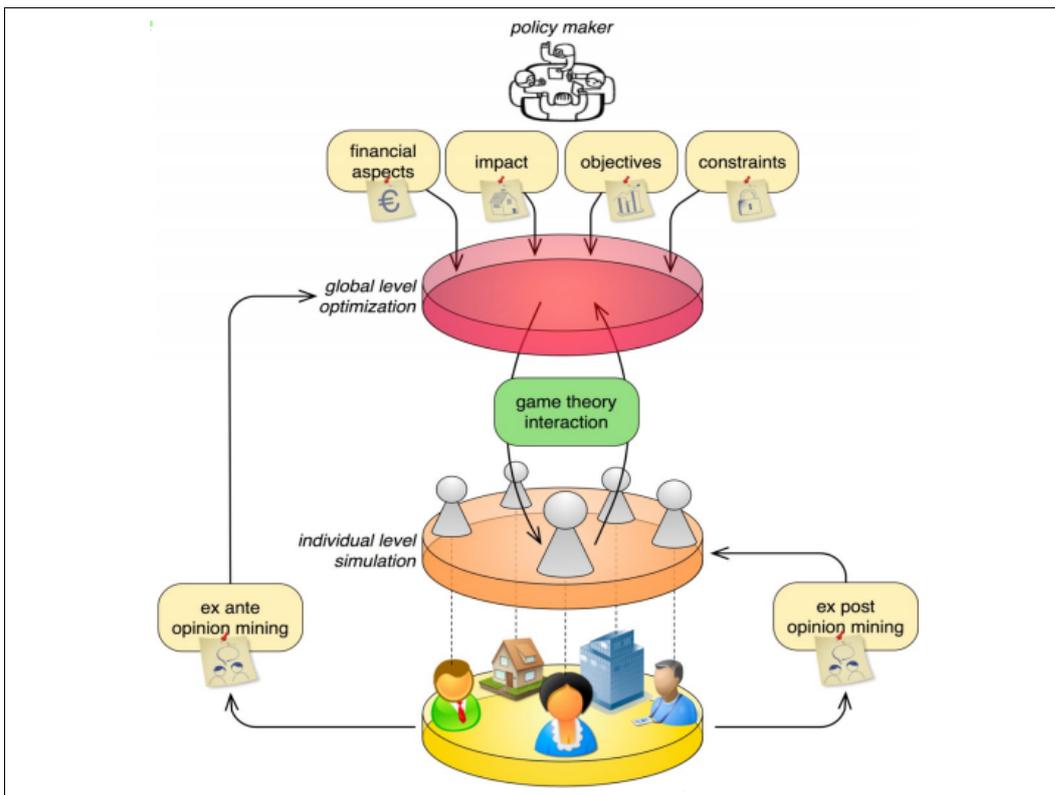


Figura 1.2: Schema generale del sistema

In Figura 1.2 è mostrato lo schema generale del progetto ePolicy. Si possono osservare le varie componenti del sistema come l'ottimizzatore che lavora a livello globale o il simulatore per il livello individuale e le interazioni tra loro e con gli utenti, ovvero i decisori politici che specificano vincoli, obiettivi e impatti e i cittadini dai quali ottenere informazioni per poter meglio pianificare (ex ante opinion mining) e osservarne le reazioni alle strategie implementative (ex post opinion mining).

Un aspetto importante da tenere in considerazione per fornire supporto ai

decisori politici è la definizione formale dei modelli delle politiche. In letteratura la maggioranza dei modelli politici è basata su simulazioni ad agenti [40, 44, 57] dove gli agenti rappresentano le parti coinvolte nel processo decisionale e implementativo. L'idea è che modelli ad agenti e relative simulazioni siano adatti per sistemi complessi. In particolare, questi modelli permettono di effettuare esperimenti computazionali per garantire una migliore comprensione della complessità dei sistemi economici, sociali e ambientali, cambiamenti strutturali e adattamenti reattivi endogeni in risposta ai cambi di politiche.

Per riassumere, i principali obiettivi del progetto ePolicy sono i seguenti:

- supportare i decisori politici nel loro lavoro, ovvero uno sforzo multidisciplinare mirato a ingegnerizzare il ciclo di vita del processo di creazione delle politiche;
- integrare le prospettive globale e individuale all'interno del processo decisionale;
- valutare gli impatti sociali, economici e ambientali durante lo sviluppo delle politiche (sia a livello globale che individuale);
- stabilire i probabili effetti sociali attraverso opinion mining;
- aiutare tutti coloro che sono coinvolti nei processi decisionali e i cittadini interessati con degli strumenti di visualizzazione efficaci.

Una volta realizzati questi obiettivi, è possibile aspettarsi alcuni benefici sociali ed economici, tra i quali una migliore previsione degli impatti delle politiche attuate in grado di condurre a una più efficiente implementazione delle politiche regionali e migliore identificazione degli effetti positivi per cittadini e imprese; o ancora, un aumentato impegno dei cittadini e un più ampio uso degli strumenti informatici e di telecomunicazione (ITC), che possono risultare in iterazioni innovative tra cittadini e governi. In secondo luogo si punta a ottenere una maggiore trasparenza delle informazioni sull'impatto delle decisioni economiche sulla società e una migliorata capacità di reagire alle principali sfide poste alla società e maggiore fiducia pubblica verso le attività governative e burocratiche.

1.2 Pianificazione regionale

Il caso di studio scelto per sperimentare le metodologie sviluppate con il progetto ePolicy è la creazione del Piano Regionale dell'Energia per la Regione Emilia-Romagna (d'ora in poi abbreviata anche con l'acronimo RER).

La pianificazione regionale è lo studio della disposizione efficiente delle attività e delle infrastrutture territoriali per una crescita sostenibile della regione. I piani regionali sono classificati in base all'ambito che considerano, come ad esempio Agricolo, Forestale, Energia, Industria, Trasporti, Risorse Idriche, Urbano, Ambientale, etc.

Nonostante i diversi piani differiscano per obiettivi e tipo di attività, essi condividono alcune caratteristiche comuni che consentono un trattamento uniforme in termini di requisiti per un sistema di supporto alle decisioni.

A grandi linee, i piani regionali sono organizzati secondo quanto segue:

- analisi della situazione e dei piani precedenti, nella quale vengono considerati aspetti sociali, economici e ambientali e i risultati degli strumenti implementati in passato sono identificati e valutati;
- obiettivi e strategie, possono essere derivati dalle linee guida europee o nazionali, leggi e norme esistenti, opinioni dai cittadini, specifiche necessità regionali;
- priorità e linee di intervento, la parte decisionale del piano durante la quale vengono allocate le risorse mirata a soddisfare gli obiettivi rispettando determinati vincoli;
- implementazione e monitoraggio, definendo strumenti che possono essere economici, come tasse o sussidi, regolatori, cooperativi, ad esempio accordi volontari o tra produttori e consumatori, informativi, come campagne informative e pubblicitarie o trasferimenti tecnologici.

Nell'approccio di ePolicy un piano consiste in un insieme di attività che dovrebbero essere effettuate per raggiungere certi obiettivi. Per facilitare la fase di pianificazione, la modellazione delle politiche deve tenere conto di alcuni aspetti, descritti in modo più esteso nei prossimi paragrafi e capitoli. Innanzitutto ogni piano presenta un certo numero di differenti obiettivi (anche diversi

a seconda dell'aspetto del funzionamento della regione che affrontano); durante la creazione di un piano, essi devono essere tenuti contemporaneamente in considerazione, compito non semplice poiché potrebbero essere in conflitto tra loro. In secondo luogo, l'implementazione di un piano è limitata da un insieme di vincoli finanziari ed economici, tipicamente espressi nei termini dei fondi disponibili e dei costi privati stimati. Ancora, gli effetti positivi o negativi in grado di influenzare aspetti sociali o ambientali devono essere considerati durante la pianificazione. Infine, un'altra attività fondamentale per la creazione di un piano è la definizione di strategie implementative, cioè i meccanismi usati per portare a compimento le attività previste, i quali hanno ovviamente un impatto sulle possibilità di conseguire gli scopi prefissati.

1.2.1 Vincoli finanziari

La realizzazione di un piano comprende due tipi di costi: costi pubblici, ad esempio quelli sostenuti dagli enti regionali, e costi privati, come i cittadini interessati e coinvolti in qualche attività relativa alla pianificazione.

I costi pubblici sono in genere coperti dal budget allocato per l'implementazione del piano; in Emilia-Romagna i fondi sono allocati tramite il Programma Operativo Regionale [4] (POR), parzialmente finanziato dall'Unione Europea. Le strategie del Programma Operativo sono basate principalmente sulle direttive regionali, identificate previa analisi delle potenzialità della regione, e i contesti strategici nazionali ed europei, che stabiliscono i principi per l'erogazione dei fondi provenienti dalla Comunità Europea.

Il Programma è diviso in cinque priorità: ricerca industriale e trasferimento tecnologico, sviluppo imprenditoriale e innovazione, sviluppo sostenibile e miglioramento dell'efficienza ambientale ed energetica, maggior sfruttamento dell'eredità ambientale e culturale, assistenza tecnica.

I vincoli fiscali derivanti dall'allocazione dei fondi sono modellati all'interno dell'approccio di ePolicy per mezzo di vincoli sui costi previsti, calcolati sulla base delle attività identificate come appartenenti al piano, insieme con i costi delle strategie implementative.

I costi privati possono avere un notevole impatto sul conseguimento degli obiettivi prefissati: costi elevati potrebbero scoraggiare i potenziali investi-

tori dalla partecipazione alle attività pianificate, mentre costi troppo bassi potrebbero dare luogo a eccessi nel coinvolgimento dei privati; ePolicy tiene conto di questi costi considerandoli opportunamente all'interno del simulatore sociale.

1.2.2 Impatti economici, sociali e ambientali

Ogni piano avrà delle conseguenze in termini ambientali, sociali ed economici. Per raggiungere gli scopi prefissati un piano prevede l'esecuzione di un certo numero di attività; due categorie sono state individuate con l'aiuto di esperti della regione Emilia-Romagna.

Le *attività primarie* sono quelle direttamente legate al conseguimento delle finalità del piano, ad esempio producendo esiti misurabile che influenzando direttamente gli obiettivi (nel caso di un piano energetico, la costruzione di una nuova centrale elettrica, per un piano relativo ai trasporti, la costruzione di una strada).

Le *attività secondarie* sono quelle che non agiscono direttamente sul valore degli obiettivi ma sono necessarie per l'implementazione delle attività primarie, cioè attività di supporto che non producono effetti misurabili sugli scopi del piano (sempre per un piano energetico, operazioni strettamente legate alla creazione di una centrale sono la realizzazione di strade per raggiungerla e di linee elettriche per collegarla alla rete nazionale).

Tra attività primarie e secondarie c'è una relazione diretta, inserita nel modello di ePolicy, in particolare gli esperti del dominio forniscono delle stime di "quanto" ogni attività secondaria sia richiesta per realizzare un certa "quantità" di una certa attività primaria; più precisamente, gli esperti possono fornire una funzione per ogni coppia di attività primaria/secondaria, la quale ha in ingresso la quantità desiderata di attività primaria e restituisce una stima dell'attività secondaria necessaria. Riassumendo, ePolicy prende come input una matrice quadrata $N_a \times N_a$, D , dove ogni elemento d_{ij} è una funzione che relazione l'attività j con quella i (N_a è il numero totale di attività considerate).

Valutazione degli impatti ambientali

Per effettuare la valutazione ambientale sono stati usati diversi metodi e stru-

menti, tra i quali la metodologia adottata in Emilia-Romagna; essa è basata sulle matrici coassiali [15] sviluppata a partire dai “metodi a rete” [53]. In questa metodologia ogni attività influenza l’ambiente in termini di *pressioni negative* e *pressioni positive* - tra le prime, la produzione di agenti inquinanti, mentre le seconde annoverano la maggior disponibilità di energia. Le pressioni stesse sono legate ai recettori ambientali, come la qualità dell’aria o delle acque superficiali; sia sulle pressioni che i recettori sono imposti dei vincoli (ad esempio ci sono limite per la massima emissione di gas serra per il piano complessivo).

Una matrice M definisce le dipendenze tra le sopra menzionate attività contenute in un piano e le pressioni sull’ambiente. Ogni elemento m_{ij} della matrice rappresenta una dipendenza qualitativa (con valori alto, medio, basso o nullo) tra l’attività i e l’impatto positivo o negativo j . Esempi di impatti negativi sono il consumo idrico/energetico/territoriale, variazione dei flussi idrici, inquinamento di acqua o aria, etc. Esempi di impatti positivi sono invece la riduzione dell’inquinamento idrico/aereo, riduzione dell’emissione dei gas serra, riduzione del rumore, conservazione delle risorse naturali, creazione di nuovi ecosistemi, etc.

Una seconda matrice N stabilisce come gli impatti/pressioni influenzano i recettori ambientali e in questo caso ogni elemento n_{ij} lega l’impatto positivo o negativo con i il recettore ambientale j . I recettori ambientali possono essere la qualità delle acque superficiali e delle falde acquifere, qualità del paesaggio, disponibilità energetica, benessere della flora e fauna selvatiche. A partire da queste matrici vengono calcolati gli impatti del piano sui recettori ambientali.

Valutazione degli impatti sociali

Conoscere l’opinione delle persone a riguardo di determinate politiche è di importanza fondamentale per chi deve prendere decisioni; spesso dunque i decisori politici propongono un processo partecipativo prima di iniziare la pianificazione, per raccogliere le opinioni di tutte le parti coinvolte durante incontri e workshop. Da ciò segue che la prima parte di un piano contiene il risultato della raccolta di opinioni svolta durante la fase partecipativa; ePo-

licy si propone di trattare questo lavoro in maniera automatica.

L'estrazione delle opinioni viene effettuata in ePolicy ricorrendo all'analisi di risorse testuali liberamente frequentate in rete, come blog, social network e forum; ad ogni messaggio rilevante viene assegnato un punteggio che indica se l'opinione riguardante un certo tema sia positiva o negativa e in che grado. Questo tipo di procedimento sfortunatamente non è molto generalizzabile, in quanto la scelta dei siti web rilevanti dipende dalla tipologia di piano considerata e inoltre il modello appreso tramite opinion mining dipende dall'argomento considerato.

Valutazione degli impatti economici

Nella struttura di ePolicy gli impatti economici sono valutati sfruttando tecniche e metodi sviluppati all'interno del progetto RAMEA [8], un sistema di contabilità per l'ambiente utile per valutare le prestazioni economiche e ambientali delle regioni e per garantire alle politiche/strategie regionali informazioni circa lo sviluppo sostenibile, in linea con gli strumenti sviluppati a livello nazionale (NAMEA). Gli obiettivi di questi studi sono stati mirati soprattutto per definire strumenti in grado di collegare la conoscenza economica sulla produzione e le attività di consumo con le emissioni inerenti all'ambiente, costruire uno strumento utile per compiere studi, esaminare scenari, realizzare piani e dare comunicati, fornire indicatori per misurare, controllare e prevedere le prestazioni regionali e infine identificare in che modo una regione possa ottenere sviluppo economico e sociale senza causare ripercussioni sull'ambiente.

Oltre a ciò i metodi RAMEA possono essere utilizzati per diverse altre analisi, ad esempio monitorare le emissioni nell'aria e la eco-efficienza, comparando quella regionale con quella nazionale e comprendendo gli effetti e le responsabilità delle catene di produzione e consumo sull'ambiente.

Il progetto RAMEA, oltre ad essere utile per la raccolta di dati, mira anche a fornire i seguenti strumenti:

- un sistema di monitoraggio in grado di esaminare le pressioni imposte sull'ambiente da settori economici e infrastrutture, aiutando a identificare i "punti caldi" per quanto riguarda gli impatti ambientali, e con-

sentire la costruzione di indici per valutare l'efficienza ecologica - ad esempio è possibile capire quali sono i settori chiave della regione per l'emissione di anidride carbonica, stabilire un collegamento diretto con le loro prestazioni economiche, comprendere se esiste una relazione tra crescita economica e inquinamento e creare indici per l'eco-efficienza;

- uno strumento per effettuare previsioni permette di fare analisi degli scenari - dopo aver identificato i settori chiave per la CO_2 è possibile valutare e e quantificare gli effetti di diverse politiche/strategie mirate a ridurre le emissioni, includendo anche lo scenario base (nessuna azione intrapresa);
- uno strumento per valutare le prestazioni che consente di confrontare differenti regioni.

1.2.3 Obiettivi del piano

La definizione degli obiettivi di un piano richiede di prendere in considerazione molte informazioni provenienti da diverse fonti. Innanzitutto, i programmi operativi nazionali e della Comunità Europea che identificano le finalità e i campi d'intervento a un livello generale. Secondariamente, vi sono le esigenze specifiche della regione: gli scopi generici sono elaborati in obiettivi dettagliati adattati alla situazione locale; durante questa fase le scelte politiche giocano un ruolo importante, insieme ai cittadini e a tutti i soggetti coinvolti. Infine i piani precedenti e i risultati ottenuti influenzano la determinazione degli obiettivi per il nuovo piano.

Come conseguenza, ogni piano presenta molteplici obiettivi, i quali devono essere presi in considerazioni dai decisori politici e riuniti in un'unica funzione, prestando anche attenzione ai possibili conflitti, con la necessità quindi di adottare criteri di ottimizzazione multipli.

Quando un problema ha un solo criterio di selezione per scegliere tra diverse soluzioni si ottiene un singolo valore ottimo (che potrebbe corrispondere a più soluzioni equivalenti). Invece quando sono presi in esame diversi obiettivi si ricavano più soluzioni ottime (definite di Pareto) - soluzioni che non sono dominate da altre. Una soluzione x non è dominata da altre soluzioni

con rispetto a un numero di funzioni obiettivo (f_1, f_2, \dots, f_n) se non esiste una soluzione che migliori rispetto a x almeno una funzione obiettivo e presenti lo stesso valore per le restanti.

Solitamente i piani regionali devono rispettare un certo numero di obiettivi, tra i quali uno potrebbe essere il costo. Sia i fondi pubblici che privati vanno considerati, con i primi impiegati nella realizzazione del piano e l'implementazione delle strategie. Altri obiettivi interessanti sono i recettori ambientali, cioè gli indicatori della qualità di un preciso aspetto ambientale, tra i quali possono esserne ricordati alcuni, come qualità delle falde acquifere, qualità dell'acqua marina, qualità del suolo, qualità dell'aria, limitazione della subsidenza, stabilità degli argini e dei letti fluviali, qualità del clima, benessere della fauna selvatica, della vegetazione terrestre e degli animali acquatici, valore dell'eredità storica/culturale, disponibilità di terreni fertili, disponibilità di acqua, accessibilità delle risorse ricreative, benessere e salute della popolazione, disponibilità di energia, etc.

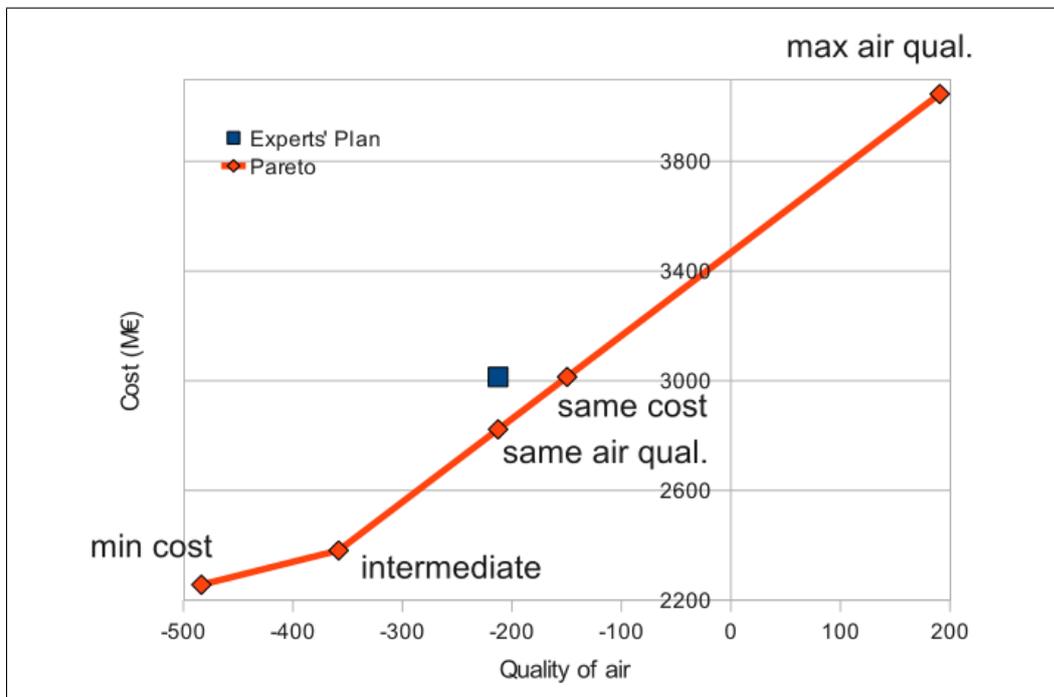


Figura 1.3: Frontiera ottima di Pareto per i piani energetici e due funzioni obiettivo

Chiaramente, a seconda della regione, il piano regionale potrebbe considerare diverse combinazioni di recettori da ottimizzare - ad esempio in Emilia-Romagna, la qualità dell'aria è in genere piuttosto scarsa poiché il territorio piatto e circondato dalle Alpi a Nord e gli Appennini a Sud permette pochi modi di dissipare gli inquinanti immessi nell'atmosfera, quindi un recettore spesso tenuto in considerazione è la qualità dell'aria.

Da tutto ciò segue che potremmo avere un piano che cerchi di minimizzare il costo complessivo e massimizzare la qualità dell'aria; disponendo di due funzioni obiettivo, possiamo visualizzare in un diagramma cartesiano piani alternativi non dominati. In Figura 4.4 sono mostrate le curve ottime di Pareto contenenti piani non dominati.

1.3 Strategie implementative

Dopo aver generato un piano regionale, definendo obiettivi e soddisfacendo vincoli, il passo successivo consiste nel trovare i meccanismi con cui implementare le politiche decise, l'efficacia dei quali verrà in seguito sperimentata sfruttando il simulatore sociale.

Riporteremo adesso alcune strategie implementative messe in pratica nell'Unione Europea ed in Italia, concentrandoci su quelle relative al settore delle energie rinnovabili, dal momento che nel caso di studio dell'Emilia-Romagna uno degli aspetti fondamentali è l'incremento della produzione di energia proveniente da fonti rinnovabili, in particolare tecnologie fotovoltaiche e a biomassa.

1.3.1 Tipologie di incentivi

Meccanismi incentivanti

Le forme di meccanismi incentivanti identificate sono le seguenti:

- tariffe di incentivazione, ossia un prezzo garantito pagato ai produttori di elettriche da fonti rinnovabili per l'energia che immettono nella rete;
- tariffe premium, che comportano il pagamento di un premio in aggiunta ai ricavi che i produttori ottengono vendendo l'elettricità sul mercato;

- quote obbligatorie, le quali creano un mercato per l'energia rinnovabile, poiché il governo ne stimola la domanda con l'imposizione a consumatori o fornitori di ricavare una certa percentuale della loro energia da fonti rinnovabili;
- sussidi agli investimenti, spesso utilizzati per sostenere la crescita di tecnologie non ancora pienamente mature come quella fotovoltaica;
- esenzione dalle tasse - alcuni paesi forniscono incentivi sulle tasse in relazione agli investimenti (tra cui deduzioni o crediti per una frazione del capitale investito in progetti di energia rinnovabile), oppure altri approcci prevedono incentivi sulle tasse in rapporto alle unità di elettricità da rinnovabili prodotta, diminuendo quindi i costi operativi;
- incentivi fiscali, ovvero prestiti a basso tasso di interesse (sotto il valore di tasso di interesse di mercato), eventualmente anche con ulteriori concessioni a coloro che contraggono il prestito, come un allungamento del periodo di restituzione del debito;
- costrizione - un approccio radicale potrebbe includere elementi di coercizione e benché non siano stati direttamente identificati esempi di questo tipo nel mercato della generazione da rinnovabili, sono state riscontrate circostanze simili, ad esempio in alcune zone urbane della Scandinavia è un obbligo di legge che le nuove case costruite vengano collegate alla locale rete di calore;
- marketing dell'Energia Verde - con questo meccanismo i clienti possono scegliere di comprare elettricità generata in parte o totalmente da fonti rinnovabili, tipicamente pagando di più rispetto alle altre tariffe presenti, e utilizzabile sia in mercati competitivi che regolamentati.

Ovviamente le categorie esposte sopra non sono mutualmente esclusive così che più strumenti possono essere usati contemporaneamente.

Questi vari schemi di incentivi possono essere classificati anche in un altro modo.

- *Incentivi alla produzione* - dove il beneficio del meccanismo è collegato in senso ampio alla quantità di energia generata, come per le tariffe d'in-

centivazione e le quote obbligatorie, e con caratteristiche che possono includere le seguenti:

- differenziazione tecnologica - dal momento che le tecnologie rinnovabili si trovano a diversi livelli di sviluppo e di costo in relazione ai prezzi di mercato esiste il rischio che tecnologie già vicine ad essere competitive economicamente anche senza sussidi possano essere favorite in presenza di un unico livello di supporto per tutte le tecnologie, per questo motivo la differenziazione tecnologica in aumento deve essere considerata nella creazione dei meccanismi di supporto;
 - aggiustamento in base all'inflazione - il livello di supporto fornito (ad esempio le tariffe incentivanti) può variare insieme all'inflazione;
 - digressione - il livello e la disponibilità del supporto può cambiare in base alla ricettività, se l'accoglienza dei meccanismi di incentivazione e delle tecnologie rinnovabili è buono il supporto può anche essere ridotto (a volte ciò avviene in seguito ad inattese decisioni dei governi, ma vengono sempre più stabiliti accordi in fase di progettazione degli incentivi);
 - accordi per l'autoconsumo - per le tariffe incentivanti potrebbero esserci differenze sul prezzo pagato per l'elettricità in base a dove essa sia generata piuttosto che immessa nella rete di distribuzione.
- *Incentivi agli investimenti* - schemi che tendono a fornire supporto per l'investimento iniziale senza considerazioni sull'effettiva quantità di energia che sarà generata, tra i quali possiamo ricordare questi esempi:
 - prestiti (sia senza interessi o a tassi inferiori a quelli di mercato);
 - garanzie sui prestiti (cioè il l'estinzione del debito viene garantita da enti esterni, come il governo nazionale o regionale), che hanno l'effetto sia di migliorare la disponibilità di linee di credito sia di ridurre i costi dei debiti;
 - benefici sulle tasse - come esenzione dall'IVA o deduzioni fiscali o tassazioni ridotte per le aziende.

Sebbene non un meccanismo incentivante in sé, è sicuramente vitale che sia presente un sistema legale robusto e affidabile per rassicurare investitori e utenti; tra gli elementi inclusi in tale sistema citiamo un processo semplice e prevedibile per la pianificazione, informazioni sulla priorità data dalle autorità all'energia rinnovabile e sul supporto fornito alle installazioni (ne derivano impatti significativi sulle possibilità di approvazione dei progetti e relativi tempi e costi), regolamentazioni che includano i procedimenti di approvazione e fino a che grado l'uso di energia da fonti rinnovabili venga obbligato.

Occorre anche chiarezza nel ruolo delle compagnie di distribuzione e trasmissione, le quali devono essere opportunamente incoraggiate a supportare la connessione dei produttori di energia da fonti rinnovabili e ad abbattere eventuali barriere che potrebbero inibire la generazione di energia rinnovabile.

Confronto dei meccanismi d'incentivazione

Nonostante ogni meccanismo di incentivazione sopra citato presenti i propri vantaggi o svantaggi, è interessante chiedersi quali siano i più efficaci nel promuovere la generazione di energia rinnovabile.

Ci sono prove che sostengono l'idea che un maggior effetto con costi contenuti sia ottenibile con tariffe incentivanti stabili e mantenute per un periodo significativo. Per esempio, in media nel 2009 i paesi con tariffe incentivanti fisse crescevano ad un ritmo più sostenuto e avevano una base di energia da rinnovabili molto maggiore che nei paesi con approcci differenti. Inoltre le tariffe fisse sembrano anche essere molto più efficienti. Come esempio i prezzi pagati nel Regno Unito e Italia per l'energia eolica (senza tariffe fissa all'epoca) erano superiori alle tariffe fisse; il Regno Unito pagava circa un terzo in più rispetto alla Germania per la sua energia eolica. Ci sono molte ragioni possibili per questa differenza ma un elemento potrebbe essere dovuto all'incertezza dei prezzi che circonda i certificati delle rinnovabili. Ad ogni modo non è chiaro se questa tendenza proseguirà nel tempo o se la situazione possa essere diversa con differenti tecnologie o scala degli investimenti.

1.3.2 Incentivi in Europa

La direttiva dell'Unione Europea 2009/28/EC per la promozione dell'uso di energia sostenibile pone come obiettivo che il 20% del consumo totale di

energia consumata provenga da fonti rinnovabili entro il 2020.

Country	FIT	Premium	Quota obbligazione	Investment grants	Tax exemptions	Fiscal incentives
AT	x					
BE	x		x	x	x	
BG	x			x		x
CY	x			x		
CZ	x	x				
DE	x					x
DK		x				
EE	x	x				x
ES	x	x			x	
FI				x	x	
FR	x					
GR	x			x	x	
HU	x			x		
IE	x					
IT	x		x			
LT	x			x		
LU	x			x		
LV	x			x	x	
MT	x			x		x
NL		x			x	x
PL			x		x	x
PT	x					
RO			x			
SE			x		x	
SI	x	x				x
SK	x				x	
UK	x		x		x	

Figura 1.4: Riassunto degli strumenti di supporto per l'energia da rinnovabili negli stati membri dell'EU. Fonte [1].

In Figura 1.4 è possibile osservare una tabella riassuntiva degli strumenti di supporto per l'energia da fonti rinnovabili in uso nei vari stati membri

dell'Unione; come già accennato in precedenza più di un tipo di meccanismo può essere implementato allo stesso tempo.

Member state	Windpower 'On-shore'	Wind power 'Off-shore'	Solar PV	Biomass	Hydro
Austria	0.073	0.073	0.29 - 0.46	0.06 - 0.16	n/a
Belgium	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Bulgaria	0.07 - 0.09	0.07 - 0.09	0.34 - 0.38	0.08 - 0.10	0.045
Cyprus	0.166	0.166	0.34	0.135	n/a
Czech Republic	0.108	0.108	0.455	0.077 - 0.103	0.081
Denmark	0.035	n/a	n/a	0.039	n/a
Estonia	0.051	0.051	0.051	0.051	0.051
Finland	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
France	0.082	0.31 - 0.58	n/a	0.125	0.06
Germany	0.05 - 0.09	0.13 - 0.15	0.29 - 0.55	0.08 - 0.12	0.04 - 0.13
Greece	0.07 - 0.09	0.07 - 0.09	0.55	0.07 - 0.08	0.07 - 0.08
Hungary	n/a	n/a	0.097	n/a	0.029 - 0.052
Ireland	0.059	0.059	n/a	0.072	0.072
Italy	0.3	0.3	0.36 - 0.44	0.2 - 0.3	0.22
Latvia	0.11	0.11	n/a	n/a	n/a
Lithuania	0.1	0.1	n/a	0.08	0.07
Luxembourg	0.08 - 0.10	0.08 - 0.10	0.28 - 0.56	0.103 - 0.128	0.079 - 0.103
Malta	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Netherlands	0.118	0.186	0.459 - 0.583	0.115 - 0.177	0.073 - 0.125
Poland	n/a	n/a	n/a	0.038	n/a
Portugal	0.074	0.074	0.31 - 0.45	0.1 - 0.11	0.075
Romania	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Slovakia	0.05 - 0.09	0.05 - 0.09	0.27	0.072 - 0.10	0.066 - 0.10
Slovenia	0.087 - 0.094	0.087 - 0.095	0.267 - 0.414	0.074 - 0.224	0.077 - 0.105
Spain	0.073	0.073	0.32 - 0.34	0.107 - 0.158	0.077
Sweden	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
United Kingdom	0.31	n/a	0.42	0.12	0.23

Figura 1.5: Tariffe incentivanti distinte per paese e tecnologia (Aprile 2010). Fonte [2]

Tariffe di incentivazione

Le tariffe incentivanti sono correntemente in uso in diversi paesi. Nella Figura 1.5 si possono osservare le tariffe usate, distinte per paese e tecnologia; i prezzi sono espressi in Euro per kilowattora (€/kWh).

Tariffe di incentivazione Premium

I sistemi premium forniscono un ritorno aggiuntivo sicuro ai produttori, pur esponendoli al rischio del prezzo dell'elettricità, poiché, a differenza del caso delle tariffe semplici con le quali la remunerazione dipende solo dalla quantità di energia prodotta, il premio va a sommarsi al prezzo di vendita del mercato. Rispetto alle tariffe semplici, quelle premium danno meno garanzie agli investitori e quindi comportano un rischio maggiore ed un maggiore costo complessivo del capitale. Per questi sistemi sono possibili diversi tipi di design, tra i quali possiamo ricordare quelli in cui i premi sono collegati all'andamento del prezzo dell'elettricità (ad esempio con limiti sui prezzi massimi e minimi) forniscono maggiori certezze e minor rischio di eccessiva compensazione rispetto alle tariffe fisse.

Quote obbligatorie da rinnovabili

Come già spiegato, con questo meccanismo i governi impongono ai fornitori (o consumatori e produttori) delle quote minime di energia proveniente da fonti rinnovabili, aumentandole nel tempo. Se le obbligazioni non vengono rispettate è necessario pagare una multa, il cui ricavato può essere poi riciclato e distribuito ai fornitori sulla base dell'elettricità prodotta. Le obbligazioni sono combinate con i relativi certificati (Renewable Obligation Certificate, ROC) che possono essere scambiati, garantendo quindi un supporto in aggiunta al prezzo dell'elettricità e sono usati come prova del rispetto delle norme; un ROC rappresenta il valore dell'energia da rinnovabili e facilita lo scambio nel mercato dell'elettricità sostenibile.

Un vantaggio delle quote rispetto ai sistemi con tariffe incentivanti fisse o premium, è il fatto che il supporto cessa una volta che la tecnologia abbia raggiunto la maturità necessaria per competere. Poiché i certificati rappresentano il valore dell'elettricità rinnovabile in un determinato momento, quando il costo delle tecnologie rinnovabili scende grazie all'apprendimen-

to questo si ripercuote con un aggiustamento del prezzo dei ROC. D'altro canto, ciò potrebbe essere un problema per gli impianti già in funzione che non hanno beneficiato di tale apprendimento tecnologico e inoltre i certificati sono volatili a causa delle altre influenze del mercato (esercizio del potere di mercato).

Sussidi agli investimenti

I sussidi e le sovvenzioni per gli investimenti sono a volte messi a disposizione e spesso concepiti allo scopo di stimolare la crescita iniziale e lo sviluppo di tecnologie meno mature come il fotovoltaico.

Incentivi o esenzioni per le tasse

Alcuni paesi prevedono incentivi sulla tassazione in relazione agli investimenti effettuati (ad esempio, deduzioni dall'imposta sul reddito o crediti per una parte del capitale investito in progetti per l'energia da fonti rinnovabili, o ammortamento accelerato). Altri paesi hanno ideato incentivi per le tasse sulla produzione che prevedono deduzioni o crediti sulla base della quantità di elettricità generata, consentendo quindi di ridurre i costi operativi.

Incentivi fiscali

Gli incentivi fiscali includono prestiti a tasso di interesse agevolato, cioè inferiore al tasso correntemente in uso nel mercato. A coloro che richiedono un prestito possono anche essere fornite ulteriori concessioni, come consentire un allungamento dei tempi per la restituzione del mutuo.

Fondi d'asta

I meccanismi ad asta sono a volte usati per progetti di grandi dimensioni e più comunemente per l'eolico offshore. Tra i suoi vantaggi vi sono la quantità di attenzione che attrae sulle opportunità di investimento nel campo delle energie rinnovabili e l'elemento di competizione incorporato nello schema di questo incentivo; un aspetto certamente negativo è lo scarso numero complessivo di progetti che sono stati effettivamente realizzati con questo metodo fino ad ora.

1.3.3 Incentivi in Italia

Il settore dell'energia italiano, storicamente dominato da Enel (l'Ente Nazionale per l'energia ELettrica, con una quota di partecipazione diretta e indiretta dello stato italiano pari al 31%), è stato riformato nel 2005, ma nonostante le misure del governo la forza di Enel nella generazione di energia rimane preponderante. Il mercato della vendita dell'energia è stato liberalizzato nel 2007 ma i prezzi dell'elettricità restano tra i più alti in Europa; questi prezzi sono fissati sulla base dei prezzi all'ingrosso, contratti bilaterali, tariffe di trasmissione e distribuzione (dove rilevante) e tassazione.

Nel 2011 circa il 24% della produzione totale di energia è provenuto da fonti rinnovabili; la capacità totale installata da rinnovabili è stata 812MW e 84GWh sono stati prodotti da fonti rinnovabili (Figura 1.6)

	Capacity (MW)		Energy (GWh)	
	2010	2011	2010	2011
hydro	17.8	17.9	51.1	46.3
Wind	5.8	6.8	9.1	10.1
Solar	3.4	12.7	1.9	10.7
Geothermal	772	772	5.3	5.6
Bioenergy	2.35	3	9.4	11.3
Total	801.35	812.4	76.8	84
Gross domestic consumption GWh			342	344
Percentage Renewable/Gross domestic consumption			22%	24%

Figura 1.6: Fonti rinnovabili in Italia (2011)

Il Piano Nazionale di Azione per l'Energia Rinnovabile Italiano ha come scopo quello di portare la quota totale di energia rinnovabile al 26% - 39% nel settore dell'elettricità, 17% nel riscaldamento/raffreddamento e 14% nel settore dei trasporti entro il 2020.

L'Italia dispone di un buon sistema di incentivi per l'energia rinnovabile generata dal solare, l'eolico e la biomassa. In particolare, il Decreto sull'Energia

Rinnovabile, entrato in vigore il 29 Marzo 2011, revisiona il sistema degli incentivi per la produzione di elettricità da fonti rinnovabili e semplifica il processo di autorizzazione per la costruzione di nuovi impianti.

Tariffe incentivanti Premium

L'applicazione di questo meccanismo può essere osservata negli ambiti dell'energia fotovoltaica e dell'energia solare termodinamica.

Il Decreto Ministeriale del 19 Febbraio 2007 ha introdotto in Italia ha introdotto una nuova versione dello schema a tariffa premium applicato agli impianti fotovoltaici connessi alla rete elettrica di potenza nominale superiore a 1kWp installati da individui, compagnie registrate, condomini ed enti pubblici (lo stimolo per questa politica è la Direttiva Europea sulla promozione dell'uso di energia rinnovabile, 2009/28/EC); il decreto ha fornito un insieme di tariffe, valide per un periodo di vent'anni, con un bonus nel caso di un alto grado di integrazione fotovoltaica negli edifici - vengono considerati tre sistemi, non integrati, parzialmente integrati e pienamente integrati.

Per il 2010 il premio per l'integrazione degli edifici variava da un minimo di €0.346/kWh (impianti non integrati con capacità minore di 20kWh) fino a un massimo di €0.471/kWh (impianti pienamente integrati con capacità compresa tra 1MW e 3MW). Una tariffa bonus del 5% è fornita a scuole e strutture sanitarie pubbliche, produttori di energia per autoconsumo, installazioni realizzate per sostituire tetti in amianto e centri abitati con meno di 5000 residenti.

Il criterio con cui stimolare la produzione energetica con tecnologia solare termodinamica è stato identificato dal Decreto dell'11 Aprile 2008 (ancora seguendo la Direttiva Europea 2009/28/EC); gli impianti devono essere provvisti di impianti ad accumulazione termica.

L'energia elettrica ricavata da impianti solari termodinamici consente di ottenere un premio per 25 anni, oltre alla normale vendita a prezzo di mercato; fino al 2012 il bonus variava tra €0.22 e €0.28 per kWh in base al livello di integrazione degli impianti. In caso di impianti ibridi la tariffa incentivante diminuisce in relazione al rapporto tra la quantità di energia prodotta da

fonti solari e l'energia prodotta totale.

Per gli impianti solari occorre distinguere tra quelli che hanno iniziato ad operare prima del 31 Maggio 2011 e quelli avviati nel periodo compreso tra il 31 Maggio 2011 e il 31 Dicembre 2012.

Nel primo caso, il Decreto Ministeriale del 6 Agosto 2010 (il "Terzo Conto Energia") prevede un premio fisso, sommato al prezzo di vendita, la cui entità dipende dal tipo di impianto, la sua potenza nominale e la data di entrata in funzione. Il premio varia da €0.251 a €0.402, pagato per 20 anni dopo che l'impianto inizia a produrre energia.

Per tutti gli impianti solari entrati in funzione dopo il 31 Maggio 2011, la direttiva a cui fare riferimento è invece il Decreto Ministeriale del 5 Maggio 2011 ("Quarto Conto Energia"). Questo decreto prevede un premio fisso, calcolato in base al tipo e alla potenza dell'impianto, che per i primi sei mesi del 2012 varia tra €0.148 per kWh e €0.274 per kWh, mentre nei secondi sei mesi varia tra €0.133 per kWh e €0.252 per kWh. Questo sussidio è cessato il 31 Dicembre 2012, sostituito da un sistema a tariffa incentivante senza premio.

Tariffe incentivanti

Per gli impianti solari che hanno iniziato la loro attività tra il 31 Maggio 2011 e il primo Gennaio 2013 vengono applicate tariffe incentivanti senza premio; in accordo al Quarto Conto Energia una tariffa basata sul tipo e la potenza dell'impianto sarà disponibile fino al 31 Dicembre 2016, andandosi a sommare al premio descritto in precedenza. Per i primi sei mesi del 2013 la tariffa incentivante, sommando anche il premio, varierà tra €0.121 per kWh e €0.375 per kWh.

Lo schema di incentivazione per gli impianti eolici prevede due meccanismi, una tariffa onnicomprensiva per gli impianti di dimensione minore (cioè con una produzione fino a 200kWp) e "certificati verdi" per impianti più grandi; questi certificati sono distribuiti gratuitamente ai produttori di energia eolica e possono essere rivenduti al prezzo di mercato per consentire ai produttori di energia da fonti convenzionali (non rinnovabili) di aumentare la loro pro-

duzione.

La tariffa onnicomprensiva include sia un premio che il prezzo di vendita dell'elettricità e verrà pagata per 15 anni a partire dall'entrata in funzione dell'impianto, a patto che ciò avvenga entro il 31 Dicembre 2012.

I certificati verdi saranno aboliti dopo il 2015 e ci si attende che futuri decreti ministeriali definiranno come dovrà avvenire il passaggio dal sistema dei certificati a uno incentrato sulle tariffe incentivanti.

Similmente al settore dell'eolico anche nel caso della produzione di energia da biogas e biomassa i meccanismi incentivanti sono una tariffa onnicomprensiva per impianti con potenza fino a 1MWp e i certificati verdi per quelli di dimensione maggiore - come prima, se l'entrata in funzione avviene entro il 31 Dicembre 2012 la tariffa sarà pagata per i 15 successivi.

Anche per il biogas e la biomassa si attende l'introduzione di una nuova tariffa per l'incentivazione a partire dal 1 Gennaio 2013. I decreti che implementeranno il nuovo sistema terranno conto dell'origine e della tracciabilità delle materie prime allo scopo di indirizzare ogni prodotto verso il proprio utilizzo più produttivo; sarà anche considerato in che modo promuovere un uso efficiente dei prodotti di scarto, la costruzione di impianti di cogenerazione e la costruzione di impianti di piccola e microcogenerazione (intendendo l'applicazione della cogenerazione a abitazioni singole o piccoli uffici).

L'Atto di Liberalizzazione dell'Energia del 1999 e Decreti dei Ministeri Italiani dell'Industria e Commercio e dell'Ambiente (Decreto MICA 11/11/99) introdussero un meccanismo per la compravendita delle emissioni - mercato cap and trade - per promuovere le fonti rinnovabili di energia. Esso richiedeva che i produttori o importatori di energia italiani (per quantità di energia da fonti convenzionali superiori a 100GWh/anno) assicurassero che una certa quota della produzione energetica immessa nella rete elettrica provenisse da fonti rinnovabili. La legge di bilancio del 2008 (N 244 24-12-2007) ha imposto queste quote minime:

- 2007 - 3.8%
- 2008 - 4.6%
- 2009 - 5.3%

- 2010 - 6.1%
- 2011 - 6.8%

Produttori e importatori possono rispettare le quote obbligatorie anche per mezzo dei certificati verdi, comprandoli attraverso accordi bilaterali o partecipando alla piattaforma per i certificati gestita da GME, l'operatore del mercato energetico. I fornitori possono soddisfare le obbligazioni sulle quote comprando certificati verdi dai nuovi impianti autorizzati che producono energia da fonti rinnovabili, costruendo impianti per l'energia rinnovabile o importando elettricità da fonti rinnovabili da paesi che dispongono di strumenti simili per la regolamentazione delle emissioni.

Gli impianti che producono energia rinnovabile entrati in funzione prima del 31 Dicembre 2007 possono ottenere certificati verdi per 15 anni.

Il Decreto Legislativo n. 28, conosciuto anche come "Decreto sulle Rinnovabili", è entrato in vigore il 29 Marzo 2011 e costituisce l'implementazione della Direttiva 2009/28/EC sulla promozione delle energie da fonti rinnovabili; questo decreto riforma fundamentalmente il sistema di gestione dei certificati verdi in Italia (per impianti precedenti al Dicembre 2012 lo schema corrente continuerà ad essere usato ma sarà sostituito entro il 2015 da un sistema a tariffe incentivanti).

1.3.4 Incentivi in Emilia-Romagna

La regione Emilia-Romagna (situata in Nord Italia, capoluogo Bologna) è stata scelta come caso di studio per il progetto ePolicy, in particolare considerando le modalità con cui incoraggiare lo sviluppo del settore fotovoltaico.

Meccanismi incentivanti regionali

La regione ritiene implementabili i seguenti meccanismi di incentivazione:

- *Conto capitale* (in seguito riferito anche come *Fondo Asta*) - gli incentivi sono dati sotto forma di sovvenzioni e i fondi spesi non sono restituiti alla regione, i fondi concessi rappresentano una percentuale del costo totale dell'impianto;
- *Conto interessi* - gli incentivi sono distribuiti per coprire parte (o tutti) gli interessi applicati dalle banche all'accensione di un mutuo, finalizza-

to a coprire i costi dell'investimento, anche in questo caso alla regione non ritornano i fondi stanziati;

- *Fondo rotazione* - è la regione a prestare il capitale per avviare la costruzione degli impianti, in genere con mutui a tasso agevolato, ricevendo dopo un certo tempo i soldi prestati e i relativi interessi;
- *Fondo garanzia* - la regione garantisce per coloro che vogliono contrarre un prestito presso una banca, rendendo più facile l'accensione di un mutuo.

Fino ad ora l'Emilia-Romagna ha implementato solamente la prima metodologia, organizzando delle aste nel 2001, 2003 e 2009, mentre i meccanismi restanti sono stati considerati ma non ancora messi in pratica. In seguito sono descritti brevemente i programmi incentivanti del 2001 e 2003, non essendo disponibili i dati per il 2009.

Fondi stanziati

Nel 2001 la regione Emilia-Romagna indisse un'asta per l'assegnazione degli incentivi stanziati per la costruzione di pannelli fotovoltaici. Le richieste potevano essere fatte in quattro settori:

1. aree residenziali (privati cittadini o imprese che raccogliessero le richieste di privati);
2. scuole e servizi per studenti universitari;
3. alberghi e attività correlate, strutture turistiche (in aree rurali e zone di montagna);
4. infrastrutture per attività sportive, culturali e d'intrattenimento.

Il budget disponibile fu suddiviso tra i quattro settori tenendo conto del numero di proposte ricevute.

Complessivamente 779 proposte erano selezionabili; l'investimento richiesto da tutte queste proposte era pari a 22.3 milioni di euro mentre i fondi disponibili ammontavano a 1.8 milioni, divisi quindi tra i vari settori (settore 1, €1236000; settore 2, €177000; settore 3, €282000; settore 4, €134000).

Scegliendo tra tutte quelle pervenute, vennero finanziate 122 richieste, scegliendo quali per mezzo di questo criterio: per ogni gruppo di proposte le applicazioni furono ordinate in senso crescente sulla base della percentuale di finanziamento richiesta, successivamente i fondi furono assegnati ai progetti che richiedevano le percentuali minori fino a esaurimento del budget. In Figura 1.7 sono riportati i valori medi, massimi e minimi delle percentuali delle richieste accettate durante l'asta del 2001, suddivisi per settore; come si può osservare, le richieste soddisfatte variano da una percentuale minima del 4% fino ad un massimo del 63%.

Quasi tutti i progetti finanziati avevano una potenza nominale inferiore ai 2kW (ad esempio, pannelli fotovoltaici installati nelle abitazioni). La Figura 1.8 mostra la distribuzione dei progetti finanziati, in base alle dimensioni e al contributo richiesto; si può notare come più dell'80% dei progetti finanziati avesse una capacità minore di 10kW e richiedesse un contributo inferiore a €50000.

Sector	Average Capacity kWp	Average %	Max %	Min %
1	3	52	63	40
2	7	42	50	4
3	12	48	63	10
4	20	31	40	13

Figura 1.7: Valori medi, minimi e massimi delle richieste accettate per il programma per le energie rinnovabili del 2001

Nel 2003 fu lanciato il secondo programma regionale, con un budget disponibile di 3.3 milioni di euro (principalmente tramite fondo capitale). Alcuni dei criteri per l'elezione dei progetti sono i seguenti:

- gli impianti dovevano essere di dimensioni comprese tra 1kWp e 20kWp;
- l'integrazione architeturale sarebbe stata un vantaggio;
- gli impianti dovevano rispettare delle specifiche tecniche definite dall'ENEA (l'Ente italiano per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente);

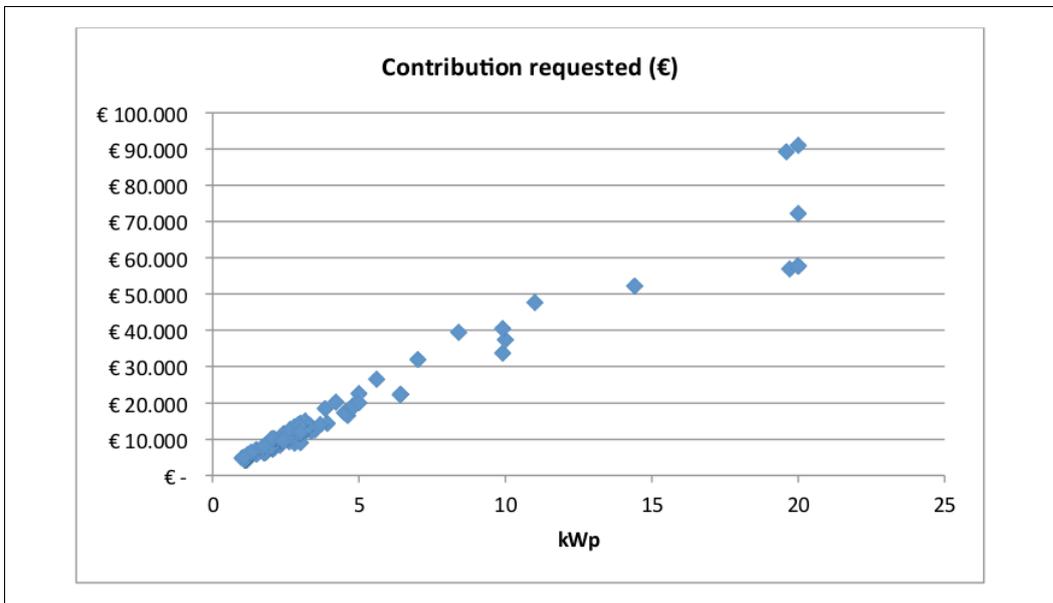


Figura 1.8: Distribuzione dei progetti PV finanziati, in base alle dimensioni e al contributo richiesto, 2001

- la connessione alla rete di distribuzione elettrica sarebbe stata presa in considerazione.

Un criterio di valutazione fu sviluppato ed espresso dalla seguente equazione:

$$x = 100 \times K \times (C \times P) \div (Y \times Z) \quad (1.1)$$

, dove C è il costo per unità €/kW, P è la potenza nominale dell'impianto compresa tra 1kW e 20kW, Y è la spesa prevista, Z è la percentuale di incentivi richiesta e K è un fattore moltiplicativo (può essere 1 o 3, se l'integrazione architettonica è effettuata o meno).

2 | Simulazione

In questo capitolo verrà illustrato in che modo abbiamo studiato le relazioni che legano i diversi aspetti del piano energetico regionale, concentrandoci particolarmente su come la creazione di meccanismi di incentivazione da parte della regione Emilia-Romagna possa influenzare la produzione di energia elettrica proveniente da impianti fotovoltaici. Per capire queste relazioni abbiamo scelto un approccio basato sulle simulazioni. Abbiamo quindi creato un modello della realtà (o almeno l'aspetto da noi preso in esame) e attraverso esso esaminato le dinamiche del sistema di nostro interesse.

Ora saranno presentati gli strumenti di cui ci siamo serviti implementare il modello sopra citato e in seguito il simulatore vero e proprio, spiegandone caratteristiche, funzionalità e limitazioni.

2.1 Strumenti

Lo strumento che abbiamo utilizzato per realizzare il simulatore è *Netlogo*, un software che offre un ambiente di sviluppo ideale per la realizzazione di modelli di simulazioni ad agenti, di networks e di sistemi dinamici (sviluppato nel presso il Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling della Northwestern University).

2.1.1 Netlogo

Netlogo è un linguaggio di programmazione e ambiente di sviluppo open source che permette la modellazione di sistemi complessi formati da molteplici agenti che interagiscono tra loro, studiandone l'evoluzione e visualizzandola in tempo reale.

L'ambiente di sviluppo è scritto in Java (con il vantaggio quindi di ottenere una grande portabilità del software stesso) e il linguaggio eredita ed estende le caratteristiche del linguaggio di programmazione multiparadigma Logo, realizzato negli anni '60 presso il Massachusetts Institute of Technology e caratterizzato dalla sua derivazione dal Lisp e le numerose applicazioni in ambito educativo. Il codice che definisce il comportamento degli agenti è interpretato senza necessità di essere compilato e questa caratteristica permette un'interazione a run time con il modello stesso (modificare parametri di controllo attraverso pulsanti e sliders, visualizzare dinamicamente variabili o grafici relativi alla simulazione in corso, etc..).

Ambiente di sviluppo

All'interno di Netlogo un elemento fondamentale è il mondo virtuale, ovvero l'ambiente della simulazione all'interno del quale i diversi agenti agiscono. Gli agenti, le entità che possono eseguire istruzioni, possono essere di quattro tipi (Fig. 2.1):

- *turtles* (tartarughe), gli agenti che possono muoversi all'interno del mondo;
- *patches*, le aree quadrate che costituiscono il mondo bidimensionale di Netlogo e sopra le quali si possono spostare le turtles;
- *links*, i collegamenti tra due diverse turtles, non hanno una posizione né risiedono su patches e possono essere orientati o non orientati;
- *observer*, il quale rappresenta concettualmente la vista complessiva del modello visto da fuori e contiene tutte le informazioni macro del modello e, quindi, tutte le variabili globali che lo caratterizzano.

Le tartarughe popolano il modello ed operano in parallelo, interagendo tra loro e con le patches su cui si muovono; possono essere specificate diverse tipologie di turtles che, nel linguaggio Logo, prendono il nome di breed, ovvero razza, caratteristica che in parte richiama il concetto di classe nel paradigma della programmazione ad oggetti, in quanto ogni razza possiede una lista di attributi e variabili proprietarie comuni solo agli agenti che vi appartengono.

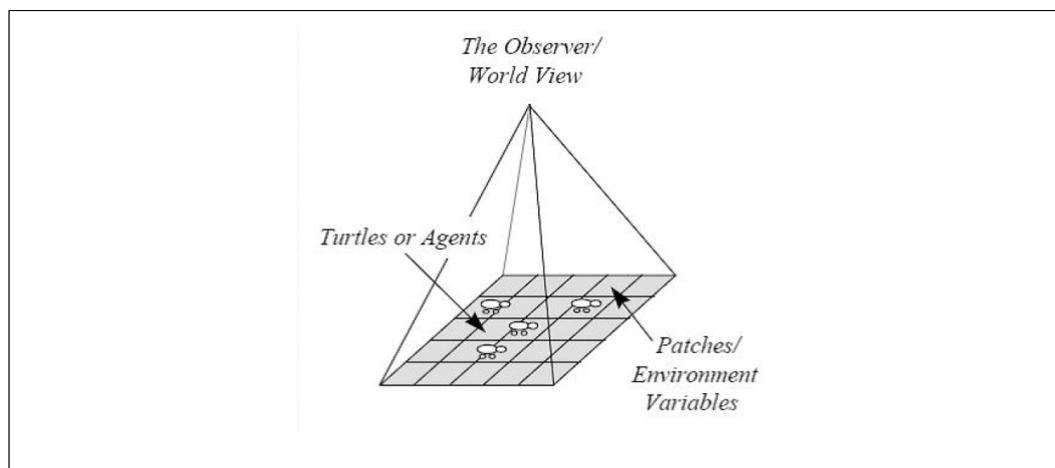


Figura 2.1: Il mondo virtuale di Netlogo

L'ambiente di sviluppo è costituito da un'interfaccia grafica che consente di interagire intuitivamente con i parametri che regolano il modello o eseguire specifiche azioni, attraverso l'uso di determinati pulsanti, sliders o altri elementi inseriti durante lo sviluppo del modello; questa interfaccia ha anche l'importante funzione di mostrare in tempo reale i movimenti degli agenti all'interno del mondo virtuale e presentare durante e dopo la simulazione le informazioni relative alla stessa, sotto forma di grafici, tabelle, etc...

Accanto all'interfaccia grafica è ovviamente presente la sezione che riguarda il codice, il quale definisce i comportamenti delle entità che agiscono dentro il mondo virtuale. Il codice della simulazione risiede tutto all'interno di un unico listato, suddiviso in diverse procedure che sono destinate all'esecuzione da parte degli agenti o, in maniera del tutto generale, di tutte le istanze che costituiscono il modello. Le procedure, in NetLogo, vengono suddivise in due diverse tipologie, ovvero *commands*, azioni che devono essere portate a termine da un agente producendo un qualche risultato, e *reporters*, istruzioni per calcolare un determinato valore che verrà riportato dall'agente a chiunque lo richieda.

In Figura 2.2 sono mostrati un esempio di una parte di interfaccia grafica con relativi selettori e rappresentazione del mondo virtuale e il codice relativo al pulsante *setup* di tale interfaccia.

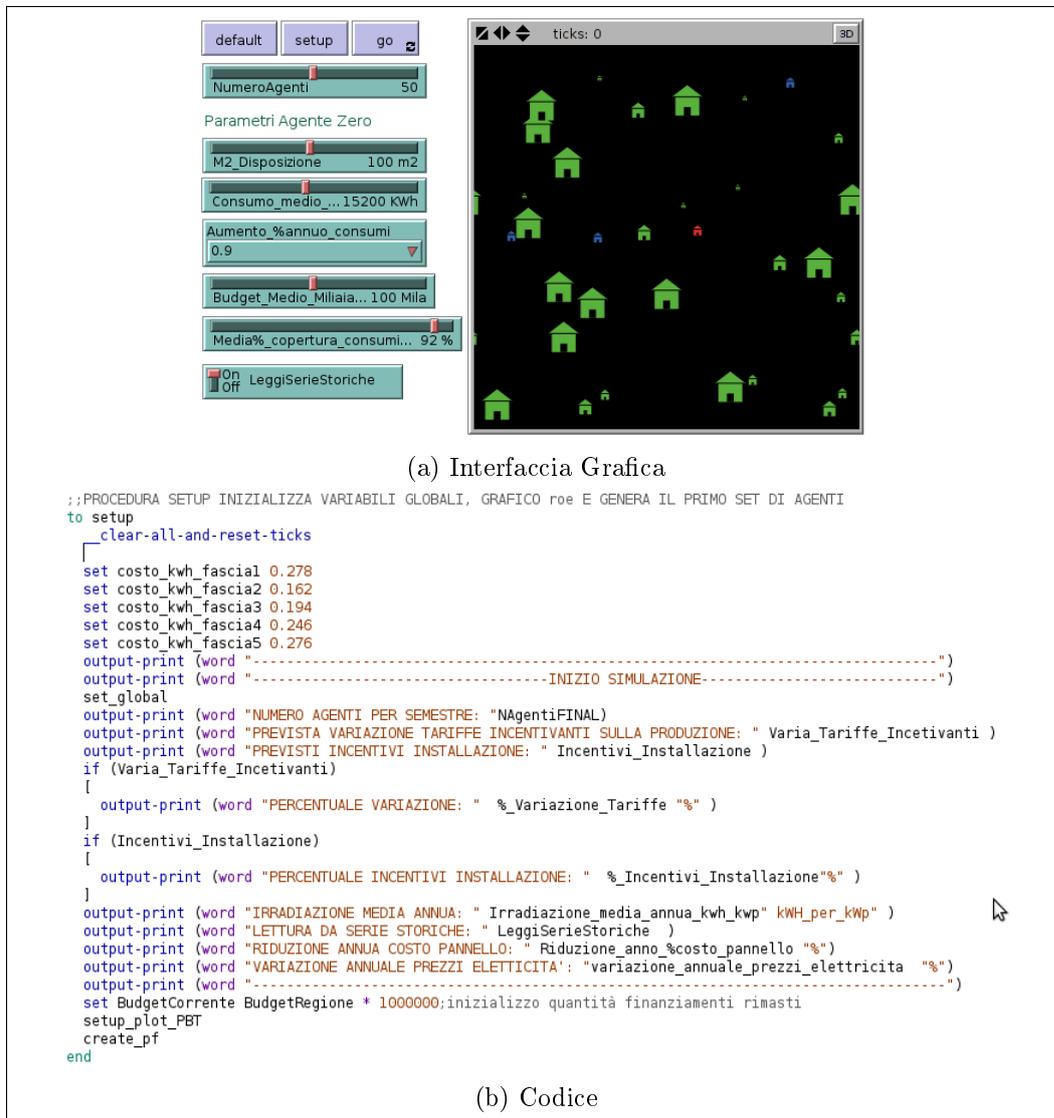


Figura 2.2: Esempio dell'ambiente di sviluppo di NetLogo

Un altro elemento fondamentale dell'ambiente di sviluppo è rappresentato dalla gestione delle variabili aggregate e le relative statistiche. Poiché lo scopo di un modello di simulazione ad agenti è spesso rappresentato dalla necessità di comprendere a livello globale il comportamento di un sistema descritto nelle sue singole componenti ne deriva la necessità di calcolare e rappresentare l'andamento nel tempo di variabili aggregate per valutare qualitativamente il modello. In NetLogo ad ognuna delle variabili del modello è possibile associare un oggetto monitor, che ne mostra dinamicamente le variazioni,

oppure un grafico, che ne raffigura l'andamento nel tempo. Gli oggetti che permettono la gestione dei grafici sono *plot* e *histogram*, entrambi da definire sia a livello d'interfaccia grafica come avviene anche per le procedure, sia nel codice della simulazione.

2.2 Modello ad agenti

Dopo aver mostrato di quali strumenti software ci siamo serviti per sviluppare un modello che permetta di esaminare la produzione di energia da fonti rinnovabili nella regione Emilia-Romagna, introdurremo ora la metodologia scelta per realizzare la nostra modellazione di realtà.

In generale esistono numerose tecniche di simulazione che si differenziano per i diversi metodi di formalizzazione dei modelli, i linguaggi simbolici usati e i gli ambiti di applicazione più indicati (tecniche matematiche, statistiche, sperimentali,..). In questo lavoro abbiamo scelto di sviluppare un modello basato sul paradigma della simulazione ad agenti, il quale trae origine dall'unione della teoria della complessità con l'intelligenza artificiale distribuita.

Riprendendo la definizione di Russel e Norvig ([50]) un *agente* è qualsiasi cosa possa essere vista come un sistema che percepisce il suo ambiente attraverso sensori e agisce su di esso mediante attuatori, in particolare un agente software è un'istanza di una classe del paradigma della programmazione ad oggetti, ovvero un oggetto indipendente che incapsula proprietà e funzioni autonome ed interagisce, secondo protocolli di comunicazione, con altri oggetti/agenti altrettanto autonomi. Sempre secondo Russel e Norving, ogni agente è in grado di percepire le sue stesse azioni ma non sempre gli effetti che ne derivano.

Gli autori descrivono accuratamente quattro tipi di agenti differenti:

- agenti reattivi semplici;
- agenti reattivi basati sul modello;
- agenti basati su obiettivi;
- agenti basati sull'utilità.

Gli agenti reattivi semplici basano le loro azioni e decisioni solo sulla base dello stato attuale del modello, ovvero sulla percezione corrente, ignorando tutta la storia precedente. Agiscono quindi sulla base di una determinata regola la cui condizione corrisponde allo stato corrente.

Gli agenti basati sul modello invece devono memorizzare un stato interno che dipende dalla storia delle percezioni: questo tipo di agente deve, prima di compiere un'azione, aggiornare lo stato interno in funzione di quello presente, del tipo di azione che deve compiere e delle percezioni che rileva dall'ambiente, dopodiché si comporterà come un normale agente reattivo.

Gli agenti basati su obiettivi sono definiti così poiché oltre alle informazioni sullo stato corrente hanno bisogno di informazioni riguardanti i propri obiettivi. Infatti quest'ultimi, oltre a tenere traccia dell'ambiente nel quale agiscono, devono memorizzare un insieme di obiettivi e scegliere l'azione opportuna che li porterà a soddisfarli. Tale scelta è piuttosto semplice quando l'obiettivo può essere raggiunto con un solo passo esecutivo; diversamente, quando l'agente deve considerare lunghe sequenze di azioni alternative per poter scegliere il cammino che porta al risultato prefissato, può dotarsi di tecniche dell'intelligenza artificiale (IA) come la ricerca e la pianificazione.

Nella maggioranza dei casi reali non è sufficiente specificare degli obiettivi da raggiungere, ma occorre anche specificare quali stati siano maggiormente utili e quindi preferibili ad altri; è quindi opportuno considerare una funzione di utilità (detta funzione di fitness) che permetta di assegnare ad un determinato stato il relativo grado di utilità di quest'ultimo al fine del raggiungimento dell'obiettivo finale. Una specifica completa della funzione di utilità permette di effettuare scelte razionali nel caso in cui i soli obiettivi non bastano (es. più obiettivi in conflitto fra loro, confronto probabilità di successo e importanza degli obiettivi). Gli agenti che si servono della funzione di utilità per valutare il giusto cammino sono chiamati agenti basati sull'utilità.

Dopo la breve panoramica sulle diverse tipologie di agenti che possono popolare un ambiente simulato, definiamo il concetto di sistema multi agente (*MAS* Multi Agent System) come un insieme di agenti collocati in un determinato ambiente ed interagenti tra loro mediante una specifica organiz-

zazione. Questi sistemi sono oggetto di ricerche da lunga data nell'ambito dell'intelligenza artificiale e costituiscono un'interessante tipologia di modellazione di società e proprio per questo troviamo diversi campi dove vengono utilizzati.

Da un punto di vista meno tecnico ma più sociologico, un modello ad agenti consente di “indagare un dato fenomeno sociale macro attraverso la rappresentazione di regole di comportamento micro seguite da agenti che interagiscono all'interno di vincoli ambientali macro, siano essi di tipo geografico, spaziale, strutturale e/o istituzionale” (Squazzoni, [54])

Una delle principali caratteristiche degli agenti è rappresentata dalla eterogeneità di questi ultimi che permette ai MAS di fornire nell'ambiente simulato una rappresentazione più inerente possibile della realtà, tenendo ovviamente in considerazione le inevitabili semplificazioni da apportare al modello. Inoltre nei sistemi MAS un altro vantaggio è la possibilità di rappresentare l'ambiente macro in maniera esplicita attraverso la definizione di vincoli e regole che ben si adattano ad essere modellate in un sistema software; a questo si possono aggiungere le tecniche di IA attraverso le quali gli agenti, all'interno della simulazione, possono apprendere (ad esempio sistemi a classificazione e alberi decisionali) ed evolvere nel medio/lungo periodo (algoritmi genetici).

Per concludere possiamo affermare che i sistemi multi agente si adattano molto bene a modellare fenomeni macro (prospettiva globale) attraverso l'utilizzo di condizioni micro che definiscono il comportamento dei singoli agenti. Scegliendo di utilizzare le simulazioni ad agenti tentiamo quindi di riprodurre un contesto di interazione da cui i fenomeni sociali emergono secondo un approccio bottom-up.

2.3 Simulatore base

Dopo aver introdotto nei paragrafi precedenti gli strumenti software che abbiamo utilizzato e il tipo di metodologia scelta, è giunto ora il momento di illustrare come il modello da simulare sia stato realizzato. Ci concentreremo prima sulla versione iniziale della simulazione ad agenti che ha lo scopo di modellare, individuare ed analizzare le principali caratteristiche che influenzano

la scelta di un investimento nel settore dell'energia da fonti rinnovabili sul territorio della regione Emilia-Romagna, ed in particolare nel fotovoltaico.

Dalla prospettiva degli agenti (privati, aziende,...) prima di realizzare un investimento in questo settore è necessario effettuare alcuni studi relativi al luogo di installazione, all'irraggiamento solare, alla potenza dell'impianto ed al suo rendimento e contestualmente è di fondamentale importanza effettuare un'analisi approfondita che consenta di verificare con esattezza la convenienza ed il ritorno economico dell'investimento.

La simulazione è stata pensata con lo scopo di analizzare le esigenze connesse allo sviluppo di un nuovo progetto fotovoltaico in fase di pianificazione e verificare la fattibilità dell'idea, fornendo quindi un utile strumento di valutazione per i singoli investitori, ma allo stesso tempo consente di ricavare informazioni di natura più globale, come la quantità totale di energia prodotta con tecnologie fotovoltaiche o le spese sostenute dalla regione, grazie alle quali è possibile integrare i risultati delle simulazioni all'interno del problema di ottimizzazione che ha come obiettivo la creazione di un piano energetico regionale.

La descrizione che segue non entrerà troppo nel dettaglio poiché l'implementazione vera e propria del simulatore è stata oggetto di un lavoro precedente [24], ma una panoramica generale è necessaria per comprendere le dinamiche dell'ambiente simulato e comprendere quindi i risultati ottenuti.

2.3.1 Descrizione simulatore

Come molte simulazioni ad agenti la gestione del tempo simulato rappresenta un elemento fondamentale nella costruzione di un buon modello e nell'applicazione sviluppata si è deciso di riprodurre lo scorrere del tempo e quindi, di conseguenza, degli eventi ad esso legati con cadenza semestrale (questa scelta è dovuta alla natura della normativa Italiana sugli incentivi nel settore fotovoltaico). Secondariamente si è dovuto determinare l'arco temporale in cui sviluppare le simulazioni: il modello simula la creazione di nuovi impianti fotovoltaici a partire dal primo semestre del 2012 sino al secondo semestre del 2016 e, poiché la tariffa incentivante applicata all'energia prodotta dagli impianti, a partire dalla data di entrata in esercizio, è garantita per un periodo di 20 anni, ne consegue che la durata delle simulazioni si estende dal

primo semestre del 2012 fino al secondo semestre del 2036.

Per modellare correttamente le dinamiche del sistema complesso studiato è stato necessario introdurre diversi parametri che regolano diversi aspetti della simulazione. Ad esempio, l'energia elettrica che ogni impianto è capace di generare è strettamente legata alla posizione geografica e all'orientamento dei pannelli fotovoltaici che lo compongono (per semplificare l'orientamento e l'angolo d'inclinazione dei pannelli sono state considerate ottimali, ovvero verso Sud e inclinazione 30°). Per poter realizzare un modello che simuli la nascita di nuovi impianti in qualsiasi zona del territorio italiano l'irradiazione media annuale è un parametro globale del modello il cui valore è possibile variare l'interfaccia grafica. Ancora, il parametro che controlla il costo medio al kWp in funzione di quelli che sono i relativi costi degli impianti è regolabile tramite l'interfaccia, anche dinamicamente durante la simulazione in modo tale che il costo degli impianti vari nel tempo (generalmente tenderà a diminuire nel corso degli anni). Altre variabili globali legate agli impianti sono la perdita di efficienza annuale dei pannelli fotovoltaici e il costo di manutenzione.

Una volta stabiliti parametri fondamentali e costi di un impianto avviene, ogni anno, la valutazione economica legata al rendimento di quest'ultimo e quindi relativa all'investimento sostenuto per realizzarlo. Questa fase prende in considerazione fattori strettamente legati all'andamento del costo dell'elettricità oltre che alla tariffa incentivante riconosciuta per l'energia prodotta dall'impianto. Infatti i ricavi derivanti da un impianto fotovoltaico sono sia diretti, ovvero derivanti da incentivi e dall'eventuale vendita dell'energia in eccesso, ma anche indiretti come l'autoconsumo; per semplificare il modello è stata prevista una sola modalità di valorizzazione dell'energia prodotta e non direttamente consumata, ovvero il ritiro dedicato da parte del Gestore della Servizi Energetici (GSE).

2.3.2 Agenti del modello

Per ogni step esecutivo, compreso tra il 2012 e il 2016 il sistema genera un determinato numero di agenti, numero che può essere anche fatto variare dinamicamente tramite un opportuno selettore dell'interfaccia di Netlog;

questi agenti rappresentano gli attori del modello interessati a investire in un impianto fotovoltaico. Ognuno di essi è caratterizzato da diversi parametri, tra i quali è opportuno ricordare:

- *Id*, identificativo univoco agente;
- *Superficie a disposizione*, metri quadri disponibili per installare l'impianto fotovoltaico;
- *Budget*, importo dedicabile all'investimento;
- *Consumo medio annuale di elettricità*, espresso in kWh annui;
- *Percentuale di copertura consumi richiesta*, obiettivo di copertura in percentuale dei consumi di elettricità tramite la produzione di energia dall'impianto fotovoltaico;
- *Aumento percentuale dei consumi annuali*, poiché tendenzialmente ogni anno i consumi tendono a variare, di solito aumentando;
- *Ostinazione*, nell'effettuare l'investimento, intervallo [1..100].

Questi parametri sono fondamentali per far sì che l'agente possa valutare la fattibilità di realizzazione dell'impianto. Ad esempio nel caso di un agente che abbia come obiettivo la copertura del 100% dei consumi annuali di elettricità ma abbia a disposizione una superficie che può ospitare un impianto che al massimo garantirebbe una produzione di energia pari al 50% del fabbisogno, questo agente sarebbe costretto ad abbandonare l'idea di un investimento a meno di non ridurre i propri obiettivi di produzione energetica e quindi di copertura dei consumi risultando particolarmente ostinato ad effettuare l'investimento. Oppure potrebbero comparire considerazioni legate a questioni economiche: nel caso in cui il budget a disposizione dell'agente non sia sufficientemente a garantire la copertura dei costi di realizzazione e installazione dell'impianto potrebbe risultare obbligatorio abbandonare il progetto a meno di non ricorrere a un prestito.

Gli agenti che optano per abbandonare l'idea di un investimento vengono eliminati dal modello mentre quelli che, a margine dello studio di fattibilità, decidono di effettuare l'investimento daranno vita alla generazione di un nuovo impianto. Come per gli agenti, gli impianti possiedono attributi che li

caratterizzano: data di entrata in funzione, tipologia, tecnologia di realizzazione, costo, fascia potenza, tariffa incentivante riconosciuta e dimensione.

Oltre agli agenti che modellano i possibili investitori appena descritti, abbiamo aggiunto al simulatore anche un altro tipo di entità, cioè un unico agente che rappresenta la regione Emilia-Romagna e ci ha permesso di implementare alcune politiche centralizzate anche nel mondo totalmente distribuito di Netlogo (ad esempio è stato così possibile fare in modo che il budget che la regione mette a disposizione per gli incentivi non dovesse essere fissato all'inizio del periodo compreso tra 2012 e 2016, ma fosse frazionato in diversi budget annuali).

2.3.3 Valutazione fattibilità

Sulla base dei parametri che definiscono il modello ogni agente è in grado di valutare la fattibilità economica dell'investimento calcolando il VAN (il Valore attuale netto dell'investimento) per l'impianto da realizzare; da questo valore è possibile individuare il PBT (Pay Back Time), il periodo necessario per il "ritorno" dell'investimento iniziale, e il ROE (Return On Equity), l'indice di redditività del capitale investito.

Alcune variabili globali usate per la valutazione di fattibilità sono:

- i prezzi dell'energia elettrica praticati all'utente finale (distinti in cinque fasce di consumo);
- la variazione annuale prezzi elettricità, parametro modificabile dinamicamente, incide sia sui prezzi dell'energia elettrica sia sui prezzi minimi garantiti dal GSE per il ritiro dedicato;
- costo medio al kWp, cioè il costo medio per ogni kWp installato;
- incentivi installazione e percentuale incentivi installazione, rappresentano il meccanismo principale con cui la regione può tentare di influenzare le scelte degli agenti sottraendo dal costo sostenuto per l'impianto una percentuale del costo stesso;

- tasso lordo rendimento BOT, utilizzato per il calcolo dei flussi di cassa ed avere un parametro di confronto per quanto concerne la redditività del capitale investito;
- prezzi minimi garantiti dal GSE per il ritiro dedicato (sulla base della potenza minima dell'impianto).

Una volta assegnati i parametri globali e i parametri individuali (con valori casuali o a partire da serie storiche) per ogni agente vengono individuate le caratteristiche di potenza che l'impianto fotovoltaico dovrà soddisfare, in particolare per determinare la quantità di energia elettrica che l'impianto dovrà produrre al fine di soddisfare l'esigenze dell'agente. Sulla base di tali esigenze si può individuare quale sarà la dimensione dell'impianto, dalla quale è poi facile dedurre i costi di realizzazione dello stesso.

Una volta che tutte queste informazioni sono a disposizione degli agenti essi possono effettuare la valutazione della fattibilità dell'investimento, procedimento che può essere riassunto nel flow chart di Figura 2.3.

Nel momento in cui un agente valuta la fattibilità dell'investimento si possono verificare i seguenti scenari:

- le dimensioni e il costo dell'impianto sono inferiori rispettivamente alla superficie e al budget a disposizione, l'investimento può essere fatto e l'agente valuta se aumentare eventualmente le dimensioni dell'impianto;
- le dimensioni dell'impianto e il costo sono superiori alla superficie e al budget a disposizione quindi l'agente viene eliminato dal modello in quanto non ci sono le condizioni per effettuare l'investimento;
- le dimensioni dell'impianto sono superiori alla superficie disponibile ma il budget a disposizione è sufficiente a coprire il costo di realizzazione, l'agente decide se accettare una riduzione di potenza dell'impianto e quindi della sua dimensione;
- le dimensioni dell'impianto sono inferiori alla superficie disponibile ma il budget non è sufficiente a coprire i costi dell'investimento, l'agente considera l'ipotesi di prendere in prestito la somma residua.

In tutti casi, a esclusione dell'eliminazione dal modello, il comportamento successivo dell'agente dipende, oltre che da fattori economici, anche da un

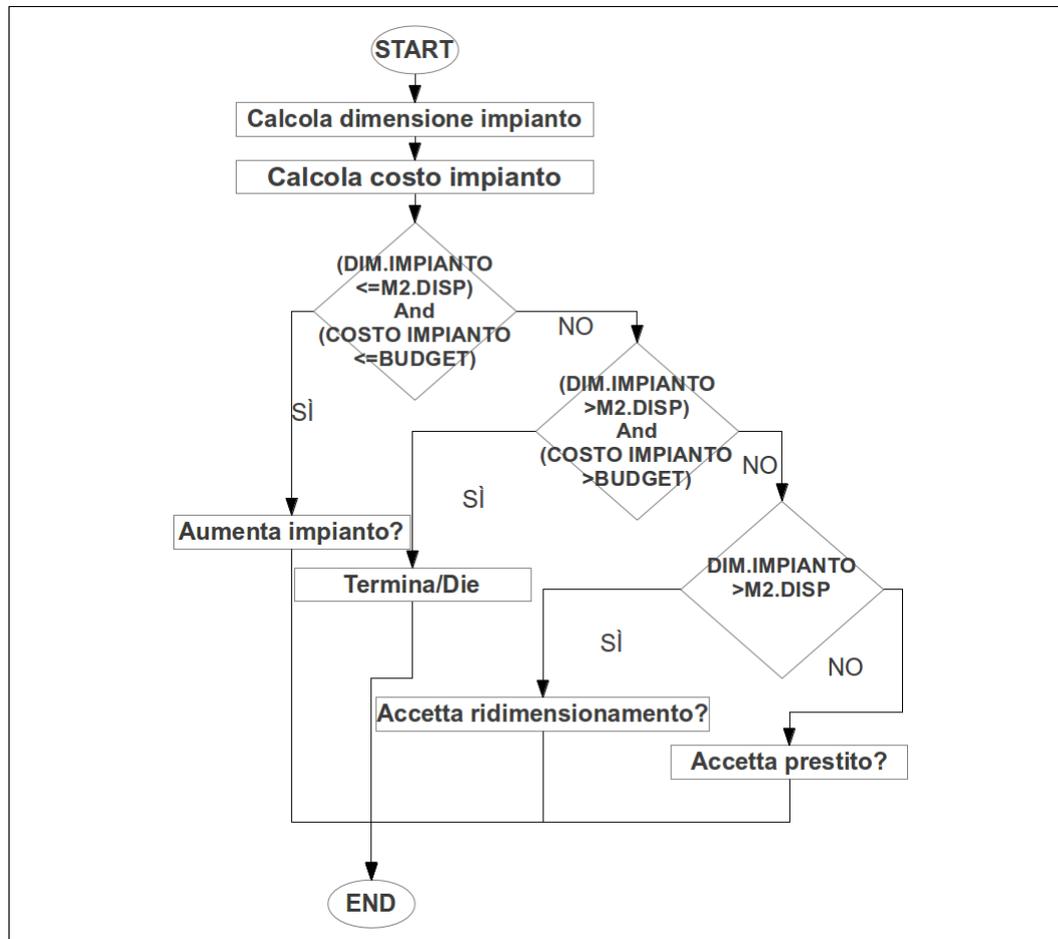


Figura 2.3: Flow chart della valutazione degli investimenti

parametro, l'*ostinazione*, che simula la determinazione a installare un impianto fotovoltaico (ad esempio per motivazioni legate a considerazioni ecologiche), ed entra in gioco per le decisioni inerenti l'aumento delle dimensioni dell'impianto, il suo ridimensionamento o l'accettazione di un prestito.

In Figura 2.4 possiamo osservare il mondo virtuale di Netlogo popolato di agenti che hanno deciso di effettuare l'investimento e realizzare un impianto fotovoltaico; in verde troviamo gli agenti che non hanno avuto problemi di budget o spazio a disposizione, in blu quelli che hanno accettato il ridimensionamento e in rosso quelli che hanno accettato un prestito.

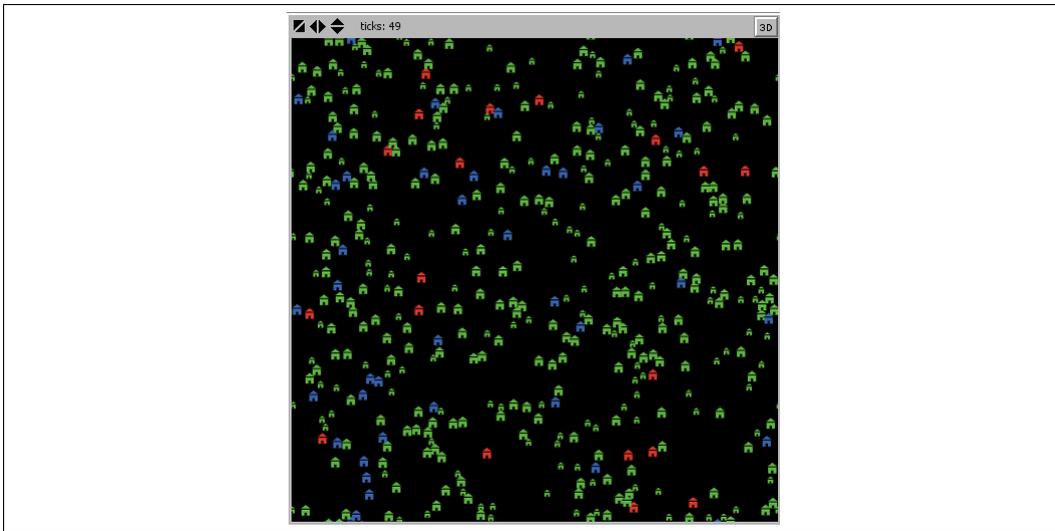


Figura 2.4: Mondo virtuale di Netlogo

2.3.4 Esecuzione del modello

Una volta popolato il modello con un certo numero di agenti (nell'intervallo $[0..100]$) viene avviata l'esecuzione della simulazione, per tutta la durata della quale continueranno ad essere svolte azioni come l'aggiornamento degli impianti (anni di vita, rendimento, calcolo energia prodotta), aggiornamento dei consumi di elettricità degli agenti, calcolo dei ricavi connessi alla produzione energetica, aggiornamento dei parametri globali del modello che cambiano insieme allo scorrere del tempo simulato.

Una volta terminata l'esecuzione della simulazione vengono prodotte e comunicate tramite l'apposita interfaccia grafica una serie di informazioni, alcune di maggior interesse per i singoli investitori, come ad esempio il PBT ed il ROE medio per i diversi semestri in cui è prevista la creazione di un impianto, altre utili per determinare le grandezze caratteristiche dell'ambiente simulato, come ad esempio la potenza installata nel complesso e quella nei relativi anni (espressa in kWp), spesa complessiva per gli incentivi all'installazione ed alla produzione, spesa totale e percentuale di impianti realizzati (cioè quanti agenti tra quelli generati all'inizio della simulazione hanno effettivamente portato a termine un impianto.)

Questo tipo di informazioni (mostrate in Figura 2.5) sono molto impor-

tanti per politici o aziende del settore, per valutare nel complesso quale potrebbe essere la risposta degli investitori al variare di determinate grandezze quali, ad esempio, le tariffe incentivanti o i costi di realizzazione.

kw INSTALLATI 2012 905.75	INCENTIVI INSTALLAZIONE 2012 0	INCENTIVI 2012 4144419	TOTALE SPESA 2012 4144419
kw INSTALLATI 2013 890	INCENTIVI INSTALLAZIONE 2013 0	INCENTIVI 2013 3979587	TOTALE SPESA 2013 3979587
kw INSTALLATI 2014 780.25	INCENTIVI INSTALLAZIONE 2014 0	INCENTIVI 2014 2890517	TOTALE SPESA 2014 2890517
kw INSTALLATI 2015 1114.25	INCENTIVI INSTALLAZIONE 2015 358610	INCENTIVI 2015 3054324	TOTALE SPESA 2015 3412934
kw INSTALLATI 2016 749.25	INCENTIVI INSTALLAZIONE 2016 282087	INCENTIVI 2016 960720	TOTALE SPESA 2016 1242807
kw INSTALLATI TOT 4439.5	INCENTIVI INSTALLAZIONE TOTALI 640697	INCENTIVI 15029567	SPESA TOTALE 15670264

Figura 2.5: Grandezze caratteristiche della simulazione

Ricordiamo che in questa prima versione del simulatore lo strumento unico attraverso cui la regione può intervenire direttamente (senza considerare, ad esempio, miglioramenti nelle tecnologie utilizzate che possano diminuire i costi di un impianto a pannelli fotovoltaici) al fine di incrementare la produzione energetica da tecnologia fotovoltaica, consiste nel coprire una percentuale della spesa sostenuta dagli agenti all'atto dell'installazione di un impianto.

La cosa principale da capire riguardante il comportamento degli agenti è il fatto che essi prendano le loro decisioni in maniera individuale sulla base delle proprie considerazioni di fattibilità economica, guadagno o ostinazione personale e alla fine le loro scelte singole concorrono a generare una certa produzione totale di energia da impianti fotovoltaici. Dal punto di vista della regione Emilia-Romagna il valore della produzione di energia fotovoltaica totale è fondamentale in quanto è il parametro osservabile in uscita dal simulatore che rivela se il piano energetico regionale, il quale prevede che certe quote di energia debbano essere prodotte da fonti rinnovabili, sia fattibile, o se invece sia necessario un investimento maggiore fornendo ad esempio in-

centivi di entità maggiore, grazie ai quali un maggior numero di agenti possa effettuare la scelta di installare un impianto fotovoltaico.

2.4 Simulatore esteso

Dopo aver realizzato il primo modello descritto nel paragrafo precedente [24], ci è sembrato utile estenderlo con nuove funzionalità nella direzione di rendere le simulazioni maggiormente realistiche rispetto alle dinamiche del sistema complesso reale e fornire modalità di incentivazione più avanzate con le quali i decisori politici possano intervenire per ottenere la produzione energetica da energia fotovoltaica desiderata [18].

Le estensioni introdotte e di cui andremo ora a discutere sono quindi due: quattro distinte modalità di incentivazione e l'inclusione all'interno del modello dell'aspetto legato all'iterazione sociale.

2.4.1 Modalità incentivanti

La regione deve destinare un budget per gli incentivi, esaurito il quale nessuno può usufruire di tali facilitazioni economiche. Le varie tipologie d'incentivi sono tra loro alternative e prima della partenza della simulazione è necessario scegliere quale applicare; non è quindi possibile studiare attraverso il simulatore quali possano essere le interazioni tra diverse metodologie incentivanti. Un agente non è tenuto ad usufruire degli incentivi, ad esempio può non essere a conoscenza di tali iniziative regionali, o può non avere intenzione di accendere un mutuo (per questo un parametro della simulazione è la probabilità che un agente voglia ricorrere all'incentivo).

Assegnazione di fondi

In questo caso ogni agente chiede alla regione di finanziargli una percentuale dell'investimento da effettuare per installare l'impianto (le percentuali massima e minima che è possibile richiedere sono parametri della simulazione). Nella nostra implementazione la regione considera le richieste nel semplice ordine di arrivo e assegna i fondi fino ad esaurimento del budget dedicato agli incentivi (nella realtà sicuramente potrebbero essere implementate

politiche più complesse ed elaborate per scegliere quali richieste soddisfare e in che ordine). Questo tipo di incentivo è definito a fondo perduto poiché non prevede nessun ritorno economico per la regione.

Conto interessi

Gli agenti possono decidere ora di accendere un mutuo presso una banca e gli interessi relativi saranno pagati dalla regione, attingendo dal budget dedicato agli incentivi (perciò anche in questo caso a fondo perduto); da questo consegue che gli agenti hanno la possibilità di rateizzare l'investimento iniziale ed essere quindi influenzati positivamente verso la scelta di procedere con l'istallazione dell'impianto, anche sulla base di un parametro della simulazione che modella quanto sia importante poter pagare a rate.

Anche in questo caso nella nostra implementazione di questa metodologia prevede che i primi agenti a presentare richiesta siano i primi ad essere soddisfatti fino a esaurimento dei fondi; ulteriori semplificazioni sono dati dal fatto di aver inserito solo due parametri che rappresentino gli interessi di una generica banca e la probabilità che la stessa non permetta sempre di stipulare un mutuo.

Fondo Rotazione

La regione permette agli agenti di realizzare mutui presso di sé, offrendo tassi ad interesse agevolato; questo è l'unico metodo di incentivazione grazie al quale la regione può ricavare nuovi fondi, dal momento che gli incentivi, seppur bassi, che dovranno essere pagati garantiscono una fonte di guadagno.

Anche in questo caso l'eventuale numero maggiore di impianti realizzati è correlato all'ostinazione degli agenti, oltre che a parametri strettamente di natura economica come gli interessi applicati dalla regione e il numero di anni concessi per la restituzione del mutuo.

Fondo Garanzia

Con quest'ultimo metodo, ancora a fondo perduto, abbiamo considerato il caso in cui un'ipotetica banca non conceda ad un cliente di accendere un

mutuo per mancanza di garanzie economiche: l'incentivo *Fondo Garanzia* prevede che la regione fornisca le garanzie richieste dalla banca, ovvero è sempre possibile per un agente accendere un mutuo presso la banca, ma nel caso in cui tale agente si trovi nell'impossibilità di continuare a pagare le rate (la probabilità che questo accada è un parametro del modello), sarà la regione a intervenire coprendo le spese rimanenti, attingendo al fondo stanziato per gli incentivi fino al suo esaurimento.

Lo studio della fattibilità di un investimento nel caso del simulatore esteso con i tipi di incentivi sopra citati possiede lo stesso schema di quello presente nel primo modello implementato (Fig. 2.3). Le differenze si possono riscontrare, ad esempio, nel diverso valore della variabile *Costo impianti*, che ora deve tenere in considerazione il costo degli interessi di eventuali mutui e le riduzioni derivanti dalla presenza di tecniche incentivanti, o ancora nel fatto che il parametro che *Ostinazione* (caratteristico di ogni agente e che influisce sulla determinazione a realizzare un impianto nei casi dove sia necessaria la richiesta di un prestito o il ridimensionamento) sia ora costituito da tre diverse componenti, cioè il valore originario di ostinazione, il livello di influenza delle rate (o meglio la possibilità di rateizzare le spese) e il livello di influenza dell'iterazione sociale (descritto nel paragrafo successivo).

2.4.2 Interazione sociale

Poiché il simulatore iniziale aveva un comportamento esclusivamente deterministico col quale la produzione di energia fotovoltaica degli agenti era condizionata unicamente da fattori di tipo economico, abbiamo deciso di estenderlo verso una direzione più realistica, dove considerare le interazioni sociali tra i diversi agenti. Il tentativo è stato fatto col fine di approssimare una rete *small world*, un sistema cioè in cui se un agente prende una decisione, anche i suoi vicini ne sono influenzati.

In sintesi è stato assegnato ad ogni agente un valore (una componente dell'ostinazione vista in precedenza) che rappresenta quanto sia significativa l'influenza del comportamento dei vicini, cercando di riflettere la tendenza a seguire il comportamento del gruppo in cui ci si trova tipica degli esseri umani del mondo reale. In particolare le decisioni di ogni agente sono

modificate dalla sua personale sensibilità ai comportamenti dei vicini e dalle dimensioni dell'area di influenza, ovvero dal raggio che determina la zona circolare all'interno della quale le scelte fatte da un agente possono influenzare il comportamento degli altri.

In Figura 2.6 possiamo osservare un esempio di come si formino le aree di influenza tra agenti all'interno del mondo virtuale di Netlogo - le aree di influenza sono le zone chiare di forma quasi circolare centrate sulle case che rappresentano gli agenti.

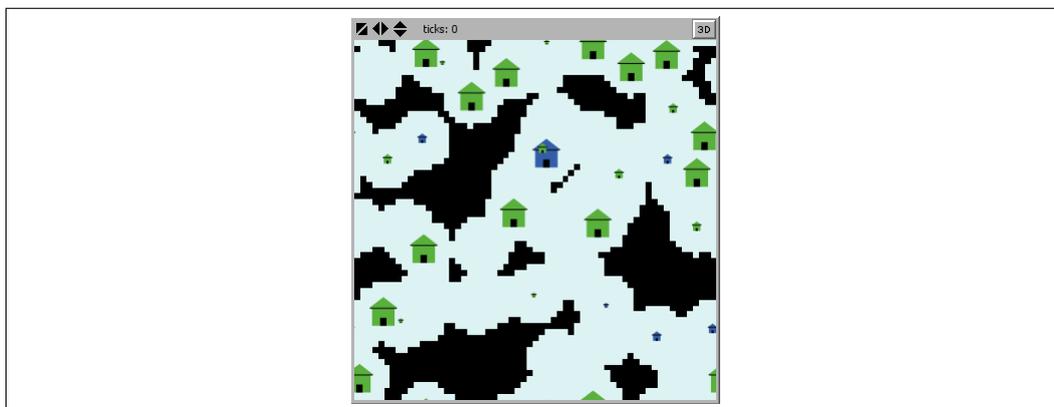


Figura 2.6: Mondo virtuale, area interazione sociale

2.5 Limiti simulatore

Il modello implementato presenta al suo interno diverse assunzioni e approssimazioni effettuate per semplificarne l'implementazione, ma al tempo stesso consente di effettuare uno studio accurato delle proprietà interessanti nell'ambito di questo lavoro, come ad esempio l'analisi delle risposte degli agenti di fronte alla presenza di diverse tipologie di incentivi e al variare del fondo destinato all'incentivazione delle tecnologie fotovoltaiche stanziato dalla regione Emilia-Romagna. Vogliamo quindi precisare che per il caso di studio considerato, ovvero le interazioni tra simulazione e ottimizzazione per la realizzazione di un piano energetico regionale, il modello utilizzato soddisfa i requisiti necessari ad una corretta trattazione.

Dopo questa debita premessa è comunque utile presentare brevemente quali possono essere alcuni limiti del simulatore realizzato e in che direzione

possano procedere eventuali futuri lavori.

Innanzitutto occorre precisare che le grandezze prodotte dal simulatore, come la produzione energetica totale o la spesa, non siano quantitativamente confrontabili con i corrispondenti valori nel mondo reale, non fosse altro per il fatto che il nostro simulatore prevede un numero di agenti compreso tra nell'intervallo [1..100] e quindi sicuramente un valore minore rispetto ai possibili privati e aziende interessati a realizzare impianti fotovoltaici in Emilia-Romagna; questo limite può essere facilmente affrontato applicando un fattore di scala, opportunamente calcolato, ai risultati generati durante le simulazioni.

Per quanto riguarda la gestione degli incentivi, possiamo far notare che un meccanismo di assegnazione di fondi ad asta nella realtà prevederebbe sicuramente modalità più complesse (ad esempio la presenza di intervalli temporali in cui i potenziali investitori comunichino alla regione la percentuale loro necessaria, un ordinamento della richieste secondo qualche criterio, una negoziazione sulla percentuale da finanziare) e analogamente anche per le restanti modalità d'incentivazione.

Sempre considerando gli incentivi, un'estensione molto utile sarebbe la possibilità di effettuare simulazioni con diversi tipi di incentivazione contemporaneamente, poiché invece al momento è selezionabile un solo tipo per volta; per ora le metodologie incentivanti sono considerate come indipendenti, mentre nel mondo reale la situazione è certamente più complessa per via di eventuali interazioni tra tali metodologie.

Un altro punto importante è il meccanismo con cui viene effettuata la valutazione di fattibilità dell'investimento, cercando di renderlo più realistico implementando una strategia decisionale più elaborata che tenga conto del budget di partenza dei potenziali investitori, la possibilità di pagare a rate e la presenza di interazione sociale.

Per quanto riguarda l'interazione sociale qui implementata, essa considera semplicemente l'influenza dei vicini, cioè all'aumentare dei vicini che hanno realizzato l'investimento aumenta anche la probabilità dell'agente stesso di realizzarlo, mentre esistono ovviamente modelli sociologici molto più complessi, completi e realistici che possono essere presi in considerazione. Tra

le altre cose potrebbe essere introdotto un altro fattore che agisca parallelamente all'ostinazione, all'influenza delle rate e quella sociale, in particolare uno che tenga in conto il fatto che all'aumentare di risorse che fornite dalla regione vi possa essere un maggior desiderio di intraprendere l'investimento; o ancora, nel nostro caso abbiamo solamente considerato l'effetto positivo dell'iterazione sociale, mentre un modello più accurato potrebbe anche tenere conto di chi non effettua l'investimento e scoraggia così i restanti investitori del vicinato.

3 | Risultati simulazioni

Nel capitolo precedente abbiamo descritto il modello ad agenti implementato, evidenziandone le finalità e le caratteristiche fondamentali, accennando brevemente alle informazioni ricavabili dal simulatore.

Lo scopo di questo capitolo sarà quindi la dettagliata analisi dei dati prodotti dalle simulazioni, l'individuazione delle relazioni che legano le grandezze in gioco all'interno dell'ambiente simulato, la presentazione e discussione dei risultati ottenuti.

Inizialmente presenteremo gli strumenti utilizzati per effettuare l'analisi sopra descritta, per poi passare alla discussione vera e propria nei paragrafi successivi.

3.1 Strumenti

Per esaminare i dati prodotti dalle simulazioni effettuate e visualizzare i risultati ottenuti abbiamo utilizzato *R* [47], un ambiente di sviluppo specifico per l'analisi statistica dei dati, basato sull'omonimo linguaggio di programmazione.

3.1.1 R

R è un linguaggio di programmazione open source e un ambiente software usato per la manipolazione di dati, calcolo e analisi statistica e presentazione grafica dei risultati. Il design di R è stato ampiamente influenzato da due linguaggi preesistenti, S sviluppato da J.Chambers e colleghi presso i Bell Laboratories negli anni '70 e Scheme creato presso il MIT AI Lab sempre negli anni settanta da G.L.Steele e G.J.Sussman.

Il nucleo di R consiste di un linguaggio interpretato a cui sono state aggiunte numerose funzionalità per un grande numero di procedure statistiche; tra queste è possibile ricordarne alcune: modelli di regressione lineare, lineare generalizzata e non lineare, analisi di serie temporali, classici test parametrici e non, clustering, classificazione e altre. R è facilmente estendibile grazie alla presenza di numerosi pacchetti software creati dagli utenti e dedicati a specifiche aree di studio e possiede inoltre un grande insieme di funzioni indicate per una presentazione flessibile ed efficiente dei dati e la produzione di grafici di qualità.

Per interagire con l'interprete del linguaggio R è possibile fornire le istruzioni direttamente da riga di comando oppure appoggiarsi a interfacce grafiche, ma per le nostre necessità è stato sufficiente utilizzare la riga di comando.

Per via della sua derivazione da S, R presenta alcune caratteristiche che lo fanno rientrare all'interno del paradigma dei linguaggi Object Oriented, almeno parzialmente, e al tempo stesso possiede alcuni aspetti che lo avvicinano alla natura dei linguaggi funzionali (come Scheme), come ad esempio la possibilità di trattare le funzioni stesse come oggetti. Le principali strutture dati sono le seguenti:

- *vettori*, singole entità costituite da una collezione di valori di un certo tipo come ad esempio numerici, logici o caratteri;
- *matrici (arrays)*, generalizzazioni multi-dimensionali di vettori;
- *liste*, forme di vettori più generali nelle quali gli elementi non devono necessariamente essere dello stesso tipo;
- *fattori*, oggetti simili ai vettori usati per specificare una classificazione (raggruppamento) delle componenti di altri vettori con la stessa lunghezza;
- *data frames*, strutture simili alle matrici in cui le colonne possono essere di tipi diversi;
- *funzioni*, le quali sono esse stesse oggetti e forniscono così un modo semplice e flessibile di estendere R.

Come in ogni linguaggio di programmazione è poi ovviamente possibile manipolare queste strutture dati attraverso operatori, strutture di controllo, funzioni, etc.

Illustreremo ora un brevissimo esempio per far capire un possibile utilizzo di R per effettuare una semplice analisi statistica. Supponiamo di voler studiare la relazione che lega due variabili, a e b , i cui valori si trovano in un file di tipo *Comma Separated Values*. Il primo passo è importare tali valori dal file e inserirli in una struttura dati, in questo caso una matrice con due colonne (una per ogni variabile) e ordinarli in base ai valori della prima variabile.

```
1 > matrice.dati <- read.csv("file.csv")
2 > matrice.ordinata <- matrice_dati[order(matrice.dati$a),]
```

A questo punto sarebbe possibile svolgere diverse operazioni sui dati (ad esempio calcolare per ogni valore di ogni variabile i valori medi,...) ma ci limiteremo a effettuare una semplice regressione lineare.

```
1 > modello.lineare <- lm(matrice$b ~ matrice$a)
```

R ci consente ora di effettuare analisi statistiche sul modello di regressione applicato per stabilirne validità e significatività in rapporto ai dati in nostro possesso e successivamente di presentare graficamente i risultati ottenuti.

```
1 > # analisi statistica minima
2 > summary(modello.lineare)
3 > # disegna i punti corrispondenti ai valori nella matrice
4 > plot(matrice$b ~ matrice$a, type="p", lwd=3, ylab="b", xlab="a")
5 > # disegna la curva di regressione
6 > lines(matrice$a, predict(modello.lineare), lty="solid", col="
    darkred", lwd=2)
```

In Figura 3.1 sono stati riportati il grafico prodotto da questo esempio e i risultati ottenuti dalla semplicissima analisi statistica, tra i quali notiamo il coefficiente di determinazione (R-squared) e l'errore residuo (Residual standard error).

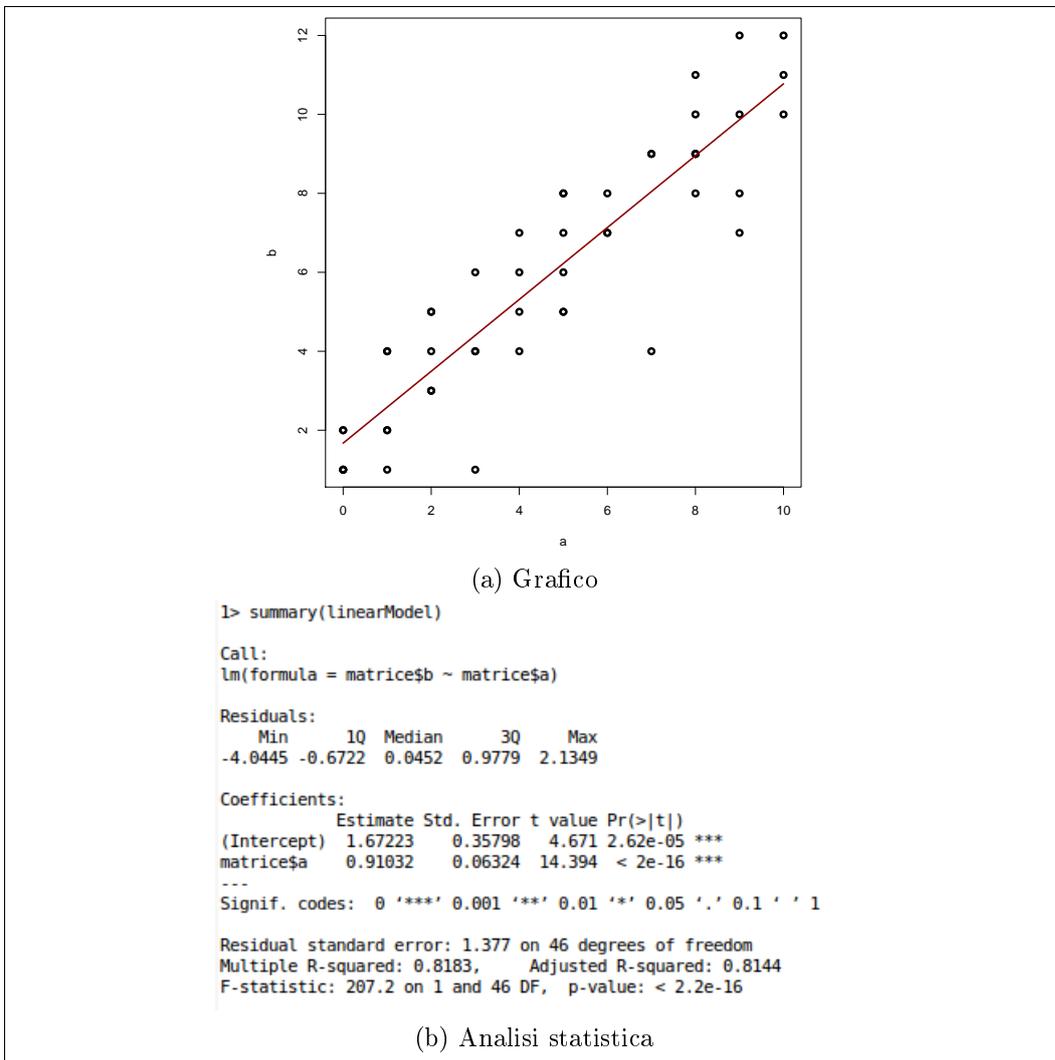


Figura 3.1: Esempio di utilizzo di R

3.2 Metodologia analitica

Illustreremo ora con quali metodi sono stati analizzati i dati ricavati dalle simulazioni; questo comporta anche una rapida descrizione delle tecniche statistiche impiegate e della loro applicazione nel nostro contesto.

3.2.1 Analisi di regressione

Una delle tecniche statistiche maggiormente utilizzate per stimare le relazioni tra variabili è l'*analisi della regressione*; in questa categoria rientrano diversi metodi che hanno come obiettivo quello di trovare un modello che leghi una variabile dipendente ed una o più variabili indipendenti (in particolare l'analisi della regressione consente di capire come cambia il valore di una variabile dipendente al variare del valore di una variabile indipendente, mantenendo fisse le restanti); seguendo la terminologia di uso comune in seguito le variabili indipendenti saranno chiamate anche *predittori*. I modelli con i quali si tenta di approssimare le relazioni studiate possono essere di numerosi tipi, tra i quali è possibile ricordare quelli parametrici (come la regressione lineare e più in generale tutte le forme di regressione polinomiale), nei quali la funzione di regressione è definita attraverso un certo numero di parametri stimati a partire dai dati, e quelli non parametrici, poi ancora modelli locali (regressione LOESS), Bayesiani, segmentati, etc..

In genere la scelta del giusto modello da applicare ai propri dati è un procedimento empirico che prevede di tentare differenti tecniche di regressione sulla stessa serie di dati per poi valutare quale fosse la scelta migliore, ovvero quale sia il modello di regressione che presenta la maggiore bontà di adattamento (in inglese "goodness of fit"), cioè una misura che riassume la discrepanza tra i valori osservati e i valori attesi sotto il modello in questione. Una volta scelto il modello migliore, questo può essere usato per fare predizioni, comprendere in che modo in che modo certe variabili o aspetti di un problema ne influenzino altri, essere integrato all'interno di un sistema informatico attraverso tecniche di apprendimento automatico (come sarà mostrato nel prosieguo di questa trattazione).

Un aspetto di grande importanza è quindi la validazione del modello, valutare cioè se è in accordo con i dati presi in esame. Tra i diversi metodi di validazione possibili alcuni prevedono metodi numerici, come ad esempio il calcolo del coefficiente di determinazione, altri richiedono l'uso di tecniche più qualitative, ad esempio l'analisi grafica dei valori residuali; in genere per effettuare una validazione completa e affidabile vengono impiegate tecniche appartenenti ad entrambe le categorie ed anche in questo lavoro abbiamo

agito in questo modo.

Uno dei principali indicatori numerici usati per valutare la bontà di un modello di regressione è il calcolo del *coefficiente di determinazione*, o R^2 , un numero reale compreso tra 0 e 1 che misura la proporzione di variabilità della risposta dovuta al modello statistico; un valore vicino a 0 indica che la regressione scelta non si adatta ai dati, viceversa valori vicini a 1 indicano che il modello è buono [55, 26].

Un indicatore utile per giudicare se la regressione effettuata abbia significato dal punto di vista statistico è il *valore p* (*p-value* in inglese), il quale viene in genere confrontato con il livello di significatività fissato (in genere indicato con la lettera α e con valori in genere tra 0.05 e 0.001); se il p-value risulta essere minore di α la regressione può essere considerata statisticamente significativa.

Un altro metodo utilizzato per verificare la bontà della regressione effettuata, oltre che per altri diversi scopi, è cosiddetto il *F-test* [27, 13], che, molto brevemente, consente di valutare se la regressione abbia significatività statistica calcolando un valore associato e confrontandolo con un valore critico di una particolare distribuzione di probabilità chiamata distribuzione di Fisher-Snedecor, o *F-distribution* (questo test è utile anche per confrontare tra loro diversi modelli di regressione applicati alle stesse serie di dati).

In genere i metodi numerici da soli non sono ritenuti sufficienti per stabilire la validità di un modello di regressione, in quanto tendono a concentrarsi troppo solamente su alcuni aspetti del rapporto tra modello e dati, tentando di comprimere quelle informazioni in un singolo numero o risultato di un test. Per questo motivo in genere tali metodi vengono spesso affiancati da tecniche di tipo più qualitativo, con le quali è possibile stimare la bontà di adattamento di una regressione osservando determinati grafici relativi a certe caratteristiche del modello di regressione da valutare.

Lo strumento primario per stabilire se un modello di regressione approssima in maniera significativa una serie di dati è il *grafico di dispersione* (in inglese *scatter-plot*) relativo alla distribuzione dei *residuali* rispetto alla variabile usata come predittore [45]. Col termine residuali di un modello si intendono le differenze tra la risposta osservata (il valore della variabile di-

pendente) e la risposta prevista (stimata tramite regressione) per ogni valore della variabile indipendente appartenente al campione di dati. Se il modello si adattasse correttamente ai dati, allora i residuali approssimerebbero gli errori casuali che rendono la relazione tra variabile dipendente e indipendente una relazione statistica, quindi, in sostanza, se i residuali presentano un comportamento casuale, osservabile attraverso i grafici di dispersione, questo suggerisce che il modello abbia un buon adattamento ai dati; se viceversa fosse evidente una struttura non casuale nella distribuzione dei residuali, questo sarebbe un chiaro segnale che il modello non è una buona approssimazione.

Un altro aspetto che è possibile valutare attraverso metodi grafici è se valga o meno *l'assunzione di normalità*, ovvero stabilire se è lecito aspettarsi che gli errori casuali inerenti al processo statistico modellato con la regressione seguano una distribuzione normale; questa assunzione viene generalmente fatta perché spesso una distribuzione normale descrive in maniera ragionevolmente accurata la distribuzione effettiva degli errori casuali di serie di dati nel mondo reale. Per controllare quindi se l'assunzione di normalità della serie di dati sia valida (e potendo poi effettuare previsioni corrette tramite la regressione) vengono utilizzati i *grafici di probabilità normale*, costruiti tracciando i valori ordinati dei residuali e confrontandoli con i valori di una distribuzione normale standard; se i punti tracciati sul piano associati ai residuali giacciono vicini alla linea determinata dalla distribuzione normale, allora si può affermare che gli errori casuali seguono una distribuzione normale.

3.2.2 Implementazione in R

Per studiare le relazioni di nostro interesse la metodologia scelta consiste nell'aver effettuato un grande numero di simulazioni controllate (ovvero fissando tutti i parametri non rilevanti e variando quelli di cui osservare il comportamento, come il budget regionale o il tipo di incentivo), dopodiché abbiamo effettuato un'analisi statistica dei dati e tentato di risalire alle curve relative all'andamento delle relazioni attraverso l'uso di tecniche di regressione lineare e non.

Per effettuare l'analisi della regressione nel nostro caso, il primo passo è consistito nello scegliere le variabili di cui studiare la relazione; per ogni tipologia di incentivazione sono stati considerati tre casi (riportati in seguito in maniera estesa):

- relazione tra il budget che la regione dedica agli incentivi (variabile indipendente) e produzione energetica da impianti fotovoltaici (variabile dipendente);
- relazione tra la sensibilità degli agenti simulati all'influenza dell'interazione sociale e la produzione energetica (variabile dipendente);
- relazione tra il raggio dell'interazione sociale, predittore, e produzione energetica da fotovoltaico.

Spiegheremo ora in che modo siano state implementate le tecniche di regressione statistica e di verifica dei modelli all'interno dell'ambiente fornito da R (i frammenti di codice mostrati sono relativi allo studio della relazione tra budget e produzione energetica, ma il modo di gestire le restanti relazioni è stato assolutamente analogo).

I dati di nostro interesse generati dal simulatore sono serie di coppie di valori budget-produzione elettrica (facilmente rappresentabili in un grafico), vengono letti da file, inseriti in una matrice e ordinati. Dal momento che a causa degli elementi di casualità presenti nel simulatore i dati grezzi presentano un discreto rumore (una non trascurabile variabilità della produzione energetica a fronte degli stessi valori di budget) abbiamo calcolato la media della produzione energetica per ogni valore di budget, ottenendo i dati più puliti con cui tentare la regressione.

```
1 > data.unsorted <- read.csv(nome_file)
2 ># dati grezzi ordinati sul valore di budget
3 > data <- data.unsorted[order(data.unsorted$Budget),]
4 ># aggdata rappresenta la matrice contenente le coppie costituite
   dal valore di Budget e relativo valore medio di produzione
   energetica (Out)
5 > aggdata <- tapply(data$Out, data$Budget, mean)
6 > aggdata <- as.data.frame(aggdata)
7 > head(aggdata)
8 > aggdata$Budget <- seq(from=0, to=(length(aggdata[,1]))-1, 1)
```

Abbiamo tentato con diversi tipi di regressione, a partire dalla versione più semplice ovvero la lineare [49](con la quale cerchiamo di fare previsione

con una funzione lineare della variabile indipendente), fino a modelli più complessi come quella polinomiale [32, 56] o ancora la cosiddetta regressione locale, o LOESS [21] (la quale procede adattando modelli polinomiali di basso grado a sottoinsiemi locali della serie di dati, in pratica costruendo punto per punto la funzione di previsione); per i diversi modelli sono poi stati calcolati la bontà di adattamento ai dati sfruttando le informazioni quantitative fornite da R.

```

1 > #modello lineare
2 > linearModelAgg <- lm(aggdata$Out ~ aggdata$Budget)
3 > # modello quadratico
4 > quadraticModelAgg <- lm(aggdata$Out ~ poly(aggdata$Budget, 2,
5     raw=TRUE))
6 > # modello cubico
7 > cubicModelAgg <- lm(aggdata$Out ~ poly(aggdata$Budget, 3, raw=
8     TRUE))
9 > # modello polinomiale di decimo grado
10 > highPolyModelAgg <- lm(aggdata$Out ~ poly(aggdata$Budget, 10,
11     raw=TRUE))
12 > # LOESS model ( local regression )
13 > loessModelAgg <- loess(aggdata$Out ~ aggdata$Budget, span=0.65)
14 > my.count <- seq(from=0, to=(length(aggdata[,1]))-1, by=1)
15 > pred <- predict(loessModelAgg, my.count, se=TRUE)
16 >
17 > # stampa informazioni relative ai modelli, tra cui misure come
18     il coefficiente di determinazione e F-test
19 > summary(linearModelAgg)
20 > summary(quadraticModelAgg)
21 > # ...

```

Come spiegato nel paragrafo precedente sono stati calcolati anche i residuali per poi analizzarli tramite grafico di dispersione e successivamente è stata verificato se la distribuzione degli errori casuali fosse normale.

```

1 > # calcolo dei valori residuali
2 > modelResidLinear=resid(linearModelAgg)
3 > modelResidQuadratic=resid(quadraticModelAgg)
4 > # ...

```

```

5 > # traccia i grafici di dispersione dei residuali per i diversi
    modelli
6 > plot(aggdata$Budget, modelResidLinear, type="p", lwd=3, ylab="
    Residuals", xlab="Budget Fotovoltaico ( milioni di Euro )",
    xlim=c(0,40), main="Linear Model")
7 > plot(aggdata$Budget, modelResidQuadratic, type="p", lwd=3, ylab="
    Residuals", xlab="Budget Fotovoltaico ( milioni di Euro )",
    xlim=c(0,40), main="Quadratic Model")
8 > # ...
9 > # calcolo errori casuali relativi ai modelli
10 > lmstdres=rstandard(linearModelAgg)
11 > qmstdres=rstandard(quadraticModelAgg)
12 > # ...
13 > # confronto grafico tra errori casuali e la distribuzione
    normale
14 > qqnorm(lmstdres, ylab="Standardized Residuals", xlab="Normal
    Scores", main="Linear Model")
15 > qqline(lmstdres)
16 > # ...

```

Dopo aver scelto quale sia il modello di regressione che meglio si adatta ai dati, è immediato presentare graficamente i risultati ottenuti.

```

1 > # traccia il grafico con i dati grezzi
2 > plot(data$Out ~ data$Budget, type="n", lwd=3, ylab="Produzione
    Energetica ( kW )", xlab="Budget Fotovoltaico ( milioni di
    Euro )", cex.lab=0.9, xlim=c(0,30))
3 > points(data$Out ~ data$Budget, col="blue4", pch=1)
4 > # traccia il grafico per il modello di regressione scelto;
    ovviamente consente anche di confrontare tra loro i diversi
    modelli per avere un riscontro visivo della loro correttezza
5 > plot(aggdata$Out ~ aggdata$Budget, type="p", lwd=3, ylab="
    Produzione Energetica ( kW )", xlab="Budget Fotovoltaico (
    milioni di Euro )", xlim=c(0,60))
6 > grid(lwd=2)
7 > # modello lineare
8 > points(data$Budget, predict(linearModel), type="l", col="red",
    lwd=2)
9 > # modello LOESS
10 > lines(aggdata$Budget, pred$fit, lty="solid", col="darkred", lwd
    =2)

```

3.3 Analisi risultati simulazioni

Dopo aver implementato il simulatore descritto nel precedente capitolo, considerando in particolar modo la versione estesa, siamo passati ad analizzare le relazioni che legano la produzione di energia elettrica alle diverse metodologie di incentivi e relativi fondi stanziati dalla regione. Possiamo subito anticipare che, come era lecito attendersi, la presenza di un qualsiasi tipo di incentivo permette di ottenere una produzione energetica maggiore rispetto al caso di assenza di incentivi regionali e inoltre all'aumentare dei fondi stanziati per finanziare un tipo di incentivo la produzione di energia da impianti fotovoltaici tende ad aumentare.

In un secondo momento siamo passati a studiare la relazione tra produzione energetica e interazione sociale (considerando sia variazioni del raggio che della sensibilità); in modo conforme alle nostre aspettative, anche in questo caso i risultati ottenuti indicano che una maggiore produzione energetica è associata ad un'interazione sociale più intensa.

3.3.1 Comportamento degli incentivi

Il comportamento degli incentivi è stato studiato effettuando numerose simulazioni per ogni tipo di incentivo, variando la dimensione del fondo dedicato agli incentivi per il fotovoltaico. Il fondo è stato aumentato con incrementi di un milione di euro a partire da zero fino a un massimo di 40 milioni (considerando un arco temporale di cinque anni); per ogni valore sono state effettuate 300 simulazioni, per un totale di 48000 simulazioni considerando tutti i diversi incentivi.

Proseguiremo ora esaminando i singoli incentivi per poi concludere confrontandoli tra loro.

Fondo Asta

In Figura 3.2 sono riportati sia i risultati ottenuti da tutte le simulazioni effettuate con l'incentivo Fondo Asta (Fig. 3.2a), sia la linea di regressione associata al modello che meglio vi si adattasse (Fig. 3.2b), rappresentato in questo caso da una funzione quadratica.

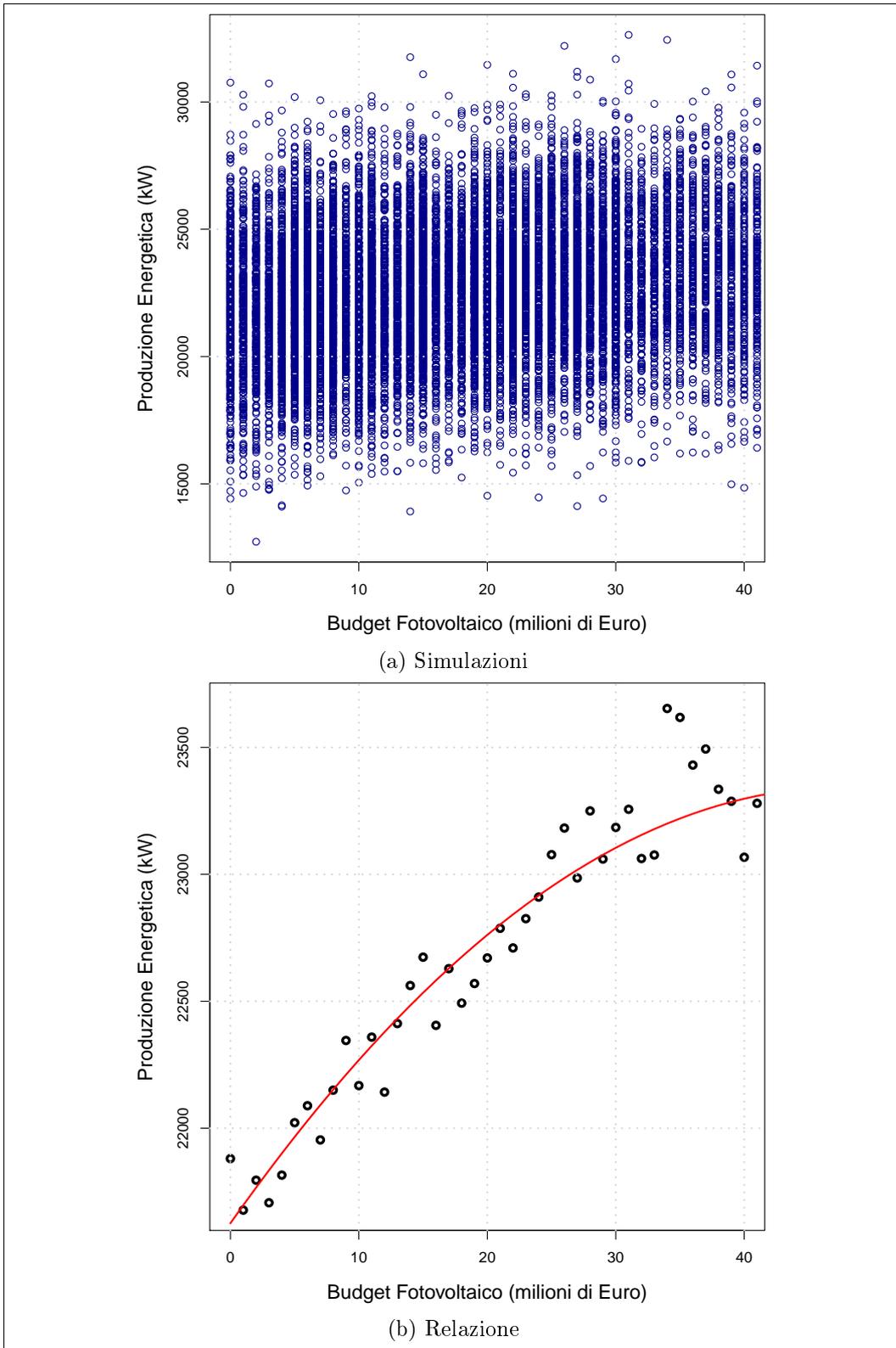


Figura 3.2: Fondo Asta

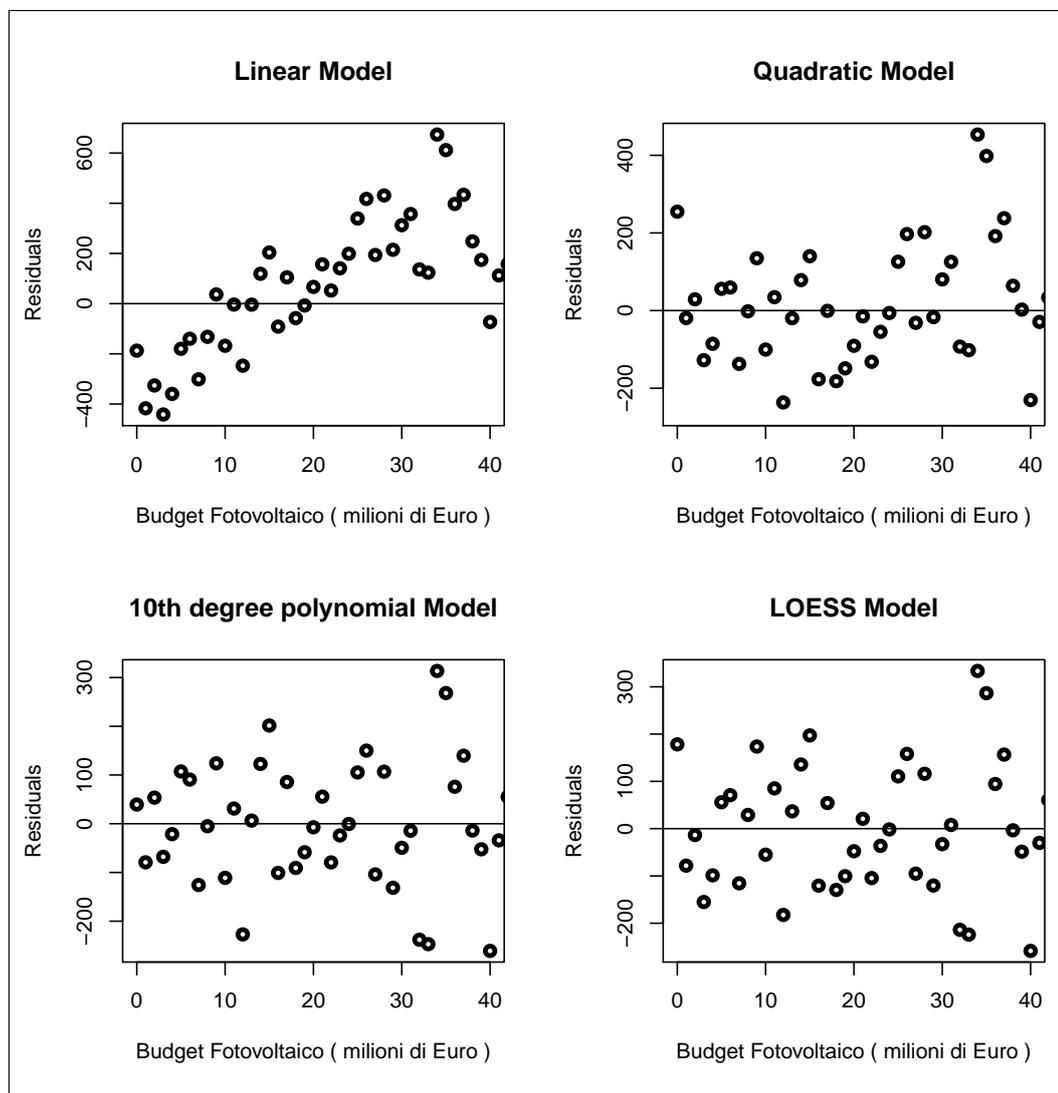


Figura 3.3: Fondo Asta, analisi dei residui

Osservando il grafico possiamo notare quindi che la produzione energetica aumenta insieme all'aumentare del budget dedicato all'incentivazione, con una relazione quasi lineare per valori minori di trenta milioni di euro per poi continuare ad aumentare ma ad un ritmo minore; ciò è dovuto probabilmente al fatto che si raggiunge una specie di "saturazione" nell'accesso agli incentivi, cioè quando la somma stanziata per il Fondo Asta raggiunge valori sufficienti è possibile fornire la percentuale sul costo di costruzione dell'impianto fotovoltaico a quasi tutti gli agenti che ne fanno richiesta, di

conseguenza la produzione energetica inizia a crescere più lentamente.

In questo caso, come anche con gli altri incentivi, la scelta del modello di regressione corretto è stata fatta sulla base dei valori numerici presentati nel paragrafo precedente, cercando comunque di scegliere il modello più semplice a parità di miglioramenti non significativi nelle misure della bontà di adattamento ai dati. Per il questo tipo di incentivo la regressione quadratica ha fornito risultati molto buoni, con un coefficiente di determinazione pari a 0.907 e valori di p-value e F-test che garantiscono la significatività statistica.

In Figura 3.3 sono mostrati i grafici di dispersione dei residuali (asse della ordinate) rispetto al budget (la variabile indipendente, sull'asse delle ascisse) per alcuni dei modelli tentati; risulta evidente un andamento caratteristico della distribuzione solamente nel caso del modello lineare, mentre nei modelli restanti la distribuzione è molto simile e non strutturata, a indicare una maggiore adesione della regressione ai dati sottostanti.

In Figura 3.4 abbiamo infine presentato i grafici della distribuzione degli errori (rappresentati dai cerchi neri) di alcuni modelli, per confrontarli con una distribuzione normale standard (la retta). Come è facile osservare per tutti i modelli la distribuzione degli errori casuali segue piuttosto fedelmente una distribuzione normale, consentendoci di considerare vera l'assunzione di normalità; dal momento che questo avviene anche per tutti le restanti metodologie incentivanti, nei casi restanti, per non appesantire la trattazione, non abbiamo riportato ulteriori grafici di quest'ultimo tipo.

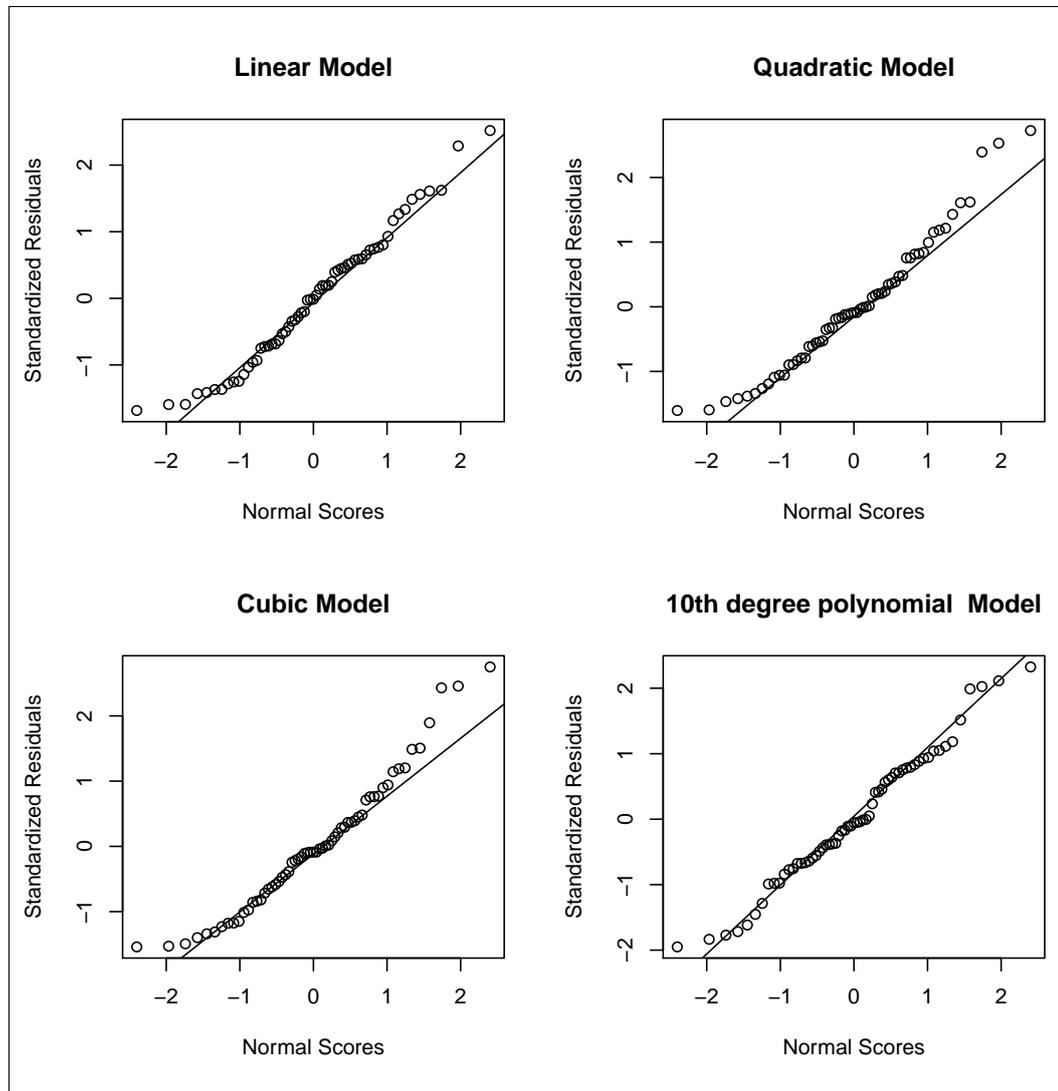


Figura 3.4: Fondo Asta, distribuzione errori

Conto Interessi

L'incentivo Conto Interessi (Fig. 3.5) mostra un andamento decisamente diverso rispetto al caso precedente, in quanto dopo una crescita molto veloce la produzione energetica si stabilizza e non aumenta a prescindere da quanto venga speso.

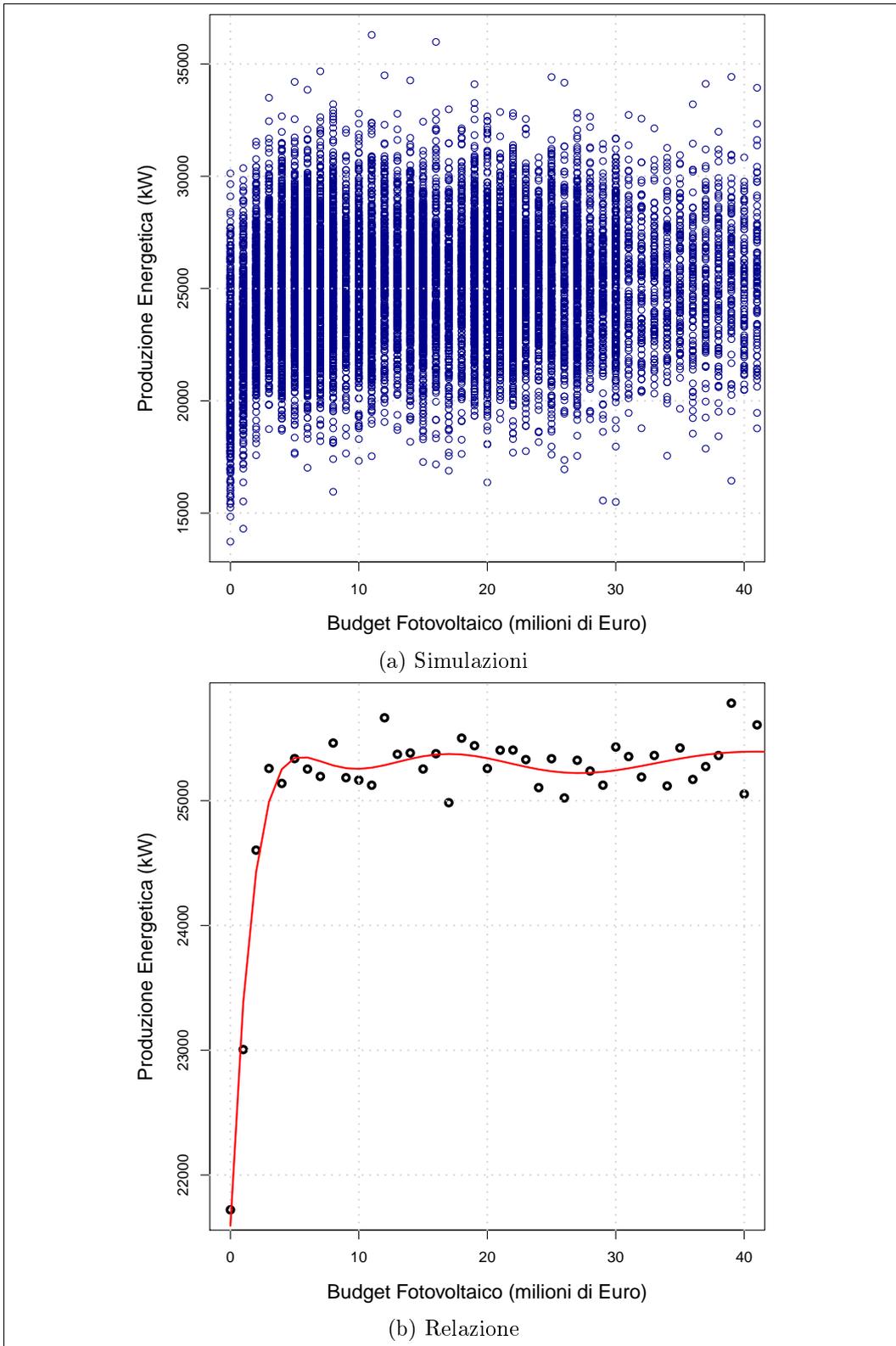


Figura 3.5: Conto Interessi

Questo comportamento è in linea con quanto era lecito attendersi poiché il Conto Interessi è ampiamente la tipologia di incentivazione che richiede meno fondi e una volta che tutti i richiedenti sono stati soddisfatti, per un costo di circa tre milioni di euro, ulteriori aumenti di budget non corrispondono ad aumenti della produzione.

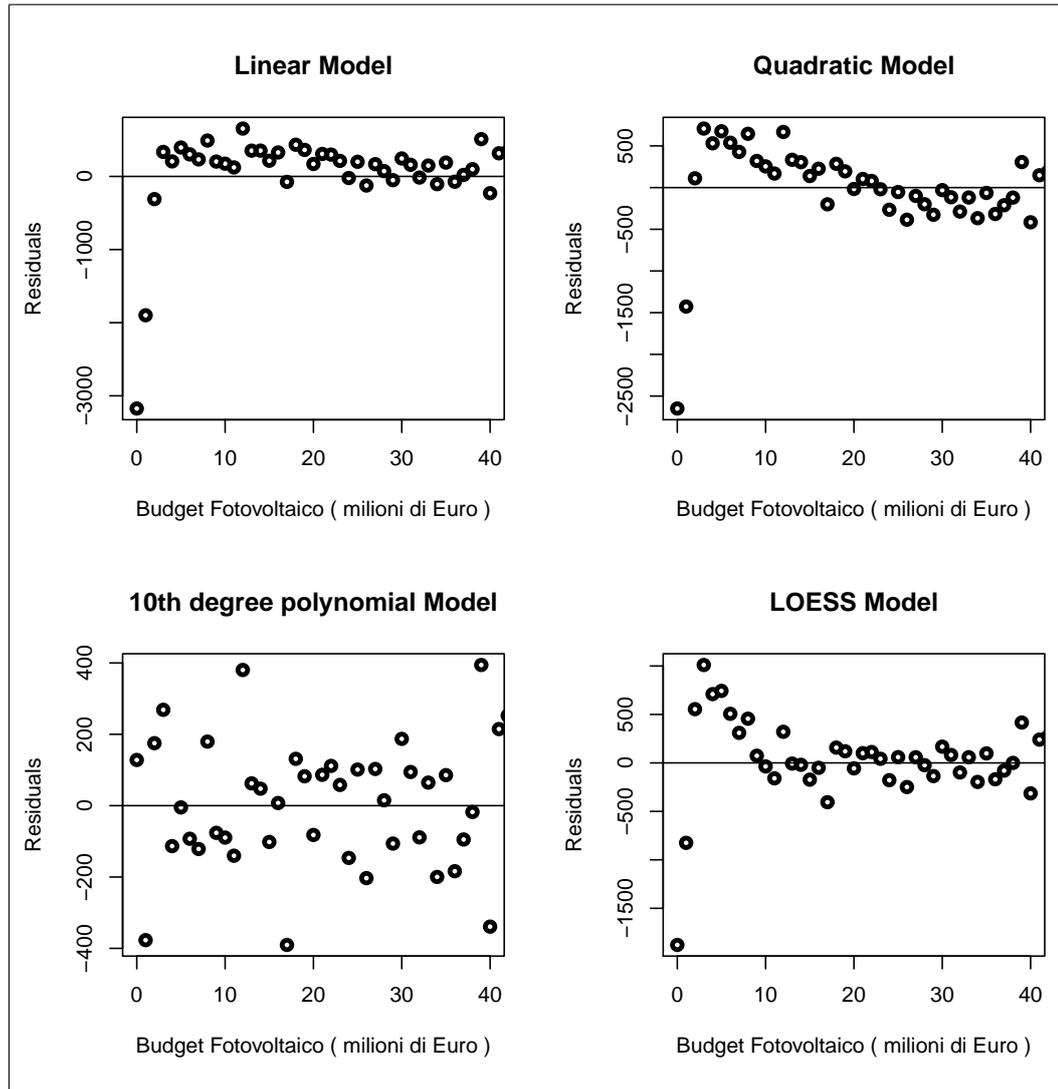


Figura 3.6: Conto Interessi, analisi dei residui

La tipologia di regressione che meglio approssima il comportamento di questo incentivo è costituita da una funzione polinomiale di grado elevato (in particolare il decimo), caratterizzato da un coefficiente di determinazione di

0.901; come in quello precedente in questo caso p-value e F-test garantiscono un'ottima significatività statistica.

Anche dalla Figura 3.6 si può notare come l'analisi grafica dei residui suggerisca che il metodo di regressione migliore sia quello scelto, infatti nei restanti modelli è facilmente riscontrabile una struttura non casuale.

Fondo Rotazione

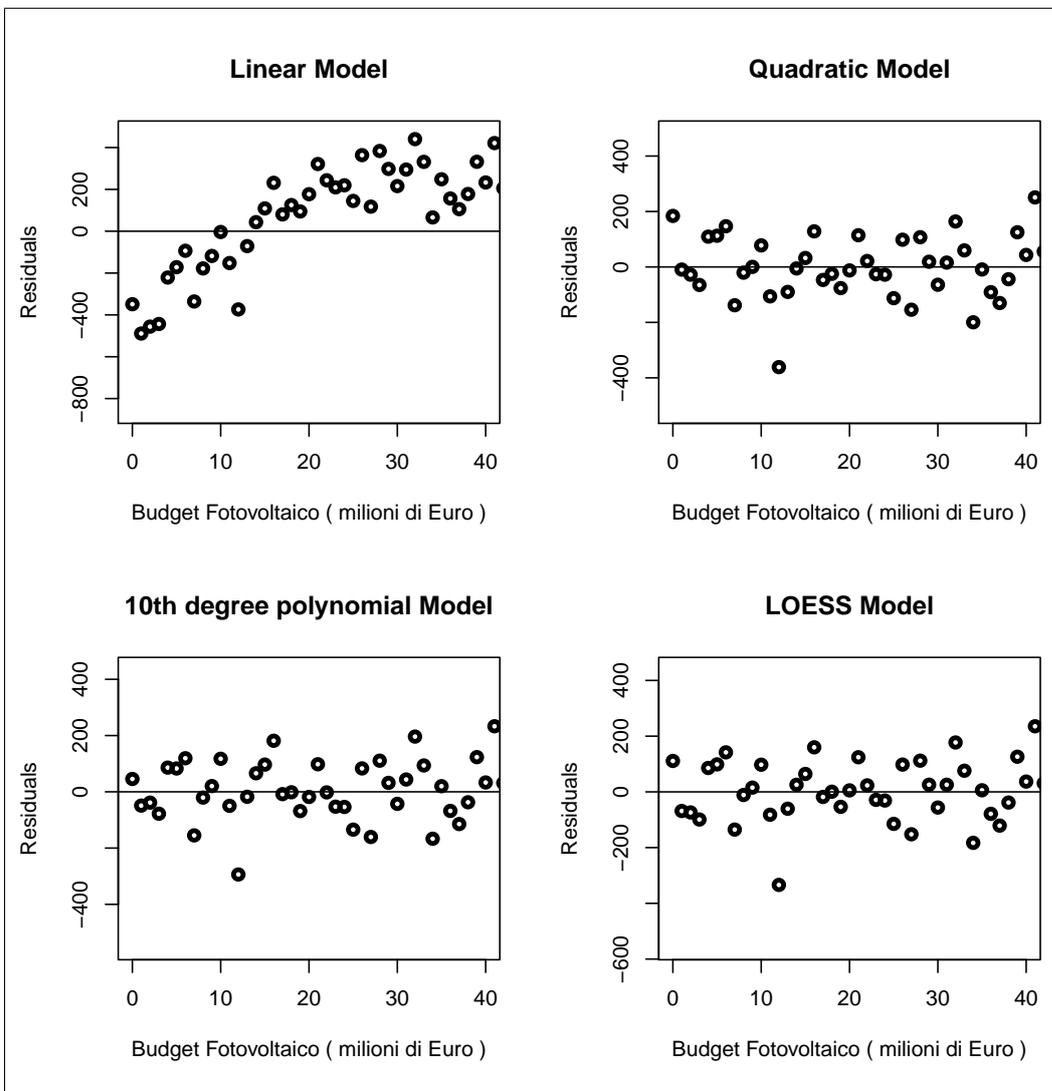


Figura 3.7: Fondo Rotazione, analisi dei residui

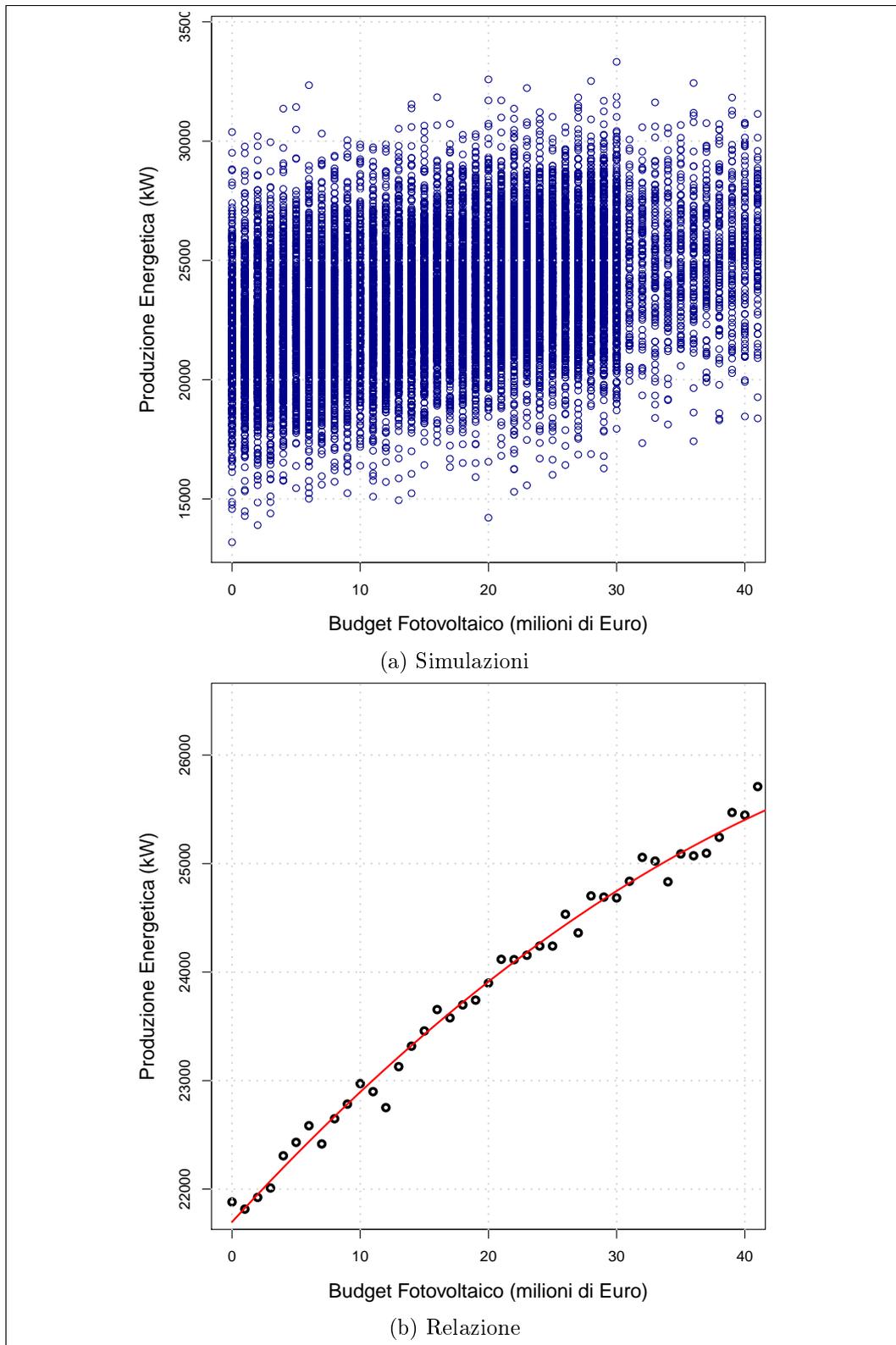


Figura 3.8: Fondo Rotazione

La situazione nel caso del Fondo Rotazione (Fig. 3.8) è simile a quella del Fondo Asta, infatti anche in questo caso il modello di regressione migliore è dato da una funzione quadratica (ancora con ottima significatività statistica e un coefficiente di determinazione pari a 0.983), con la differenza che la crescita della produzione in relazione ai finanziamenti resta più marcata anche per valori di budget più elevati e la pendenza della curva diminuisce più lentamente.

Allo stesso modo la Figura 3.7 mostra come la distribuzione dei residui per il modello scelto sia indicativa di un ottimo adattamento ai dati.

Fondo Garanzia

Infine consideriamo il caso dell'incentivo Fondo Garanzia, mostrato in Figura 3.9. Si nota nuovamente un andamento contraddistinto inizialmente da un aumento della produzione energetica al crescere dei fondi messi a disposizione con una curva quasi lineare (fino a circa quindici milioni di euro), per poi osservare una stabilizzazione nella produzione energetica dopo che un certo valore di budget è stato raggiunto (circa venti milioni di euro), probabilmente, in maniera simile al Conto Interessi, anche con questa metodologia incentivante è possibile soddisfare quasi tutti i richiedenti con una spesa sensibilmente minore rispetto ai casi Asta e Rotazione.

Il modello di regressione che è risultato essere il più opportuno con i dati del Fondo Garanzia, è il cosiddetto LOESS (modello locale); per questo tipo di modello non è possibile riportare dati come il coefficiente di determinazione in quanto non produce una funzione di regressione facilmente rappresentabile tramite una formula matematica, ma in ogni caso il confronto con altri tipi di modelli sulla base di analisi di tipo grafico ci ha fatto propendere verso la sua scelta (anche se lo stesso modello polinomiale usato per il Conto Interessi aveva mostrato un buon adattamento ai dati).

In Figura 3.10 è possibile vedere anche per il Fondo Garanzia quali siano i grafici di dispersione dei residui per alcuni modelli di regressione, dalla cui osservazione si può dedurre che il modello LOESS sia stato una buona scelta.

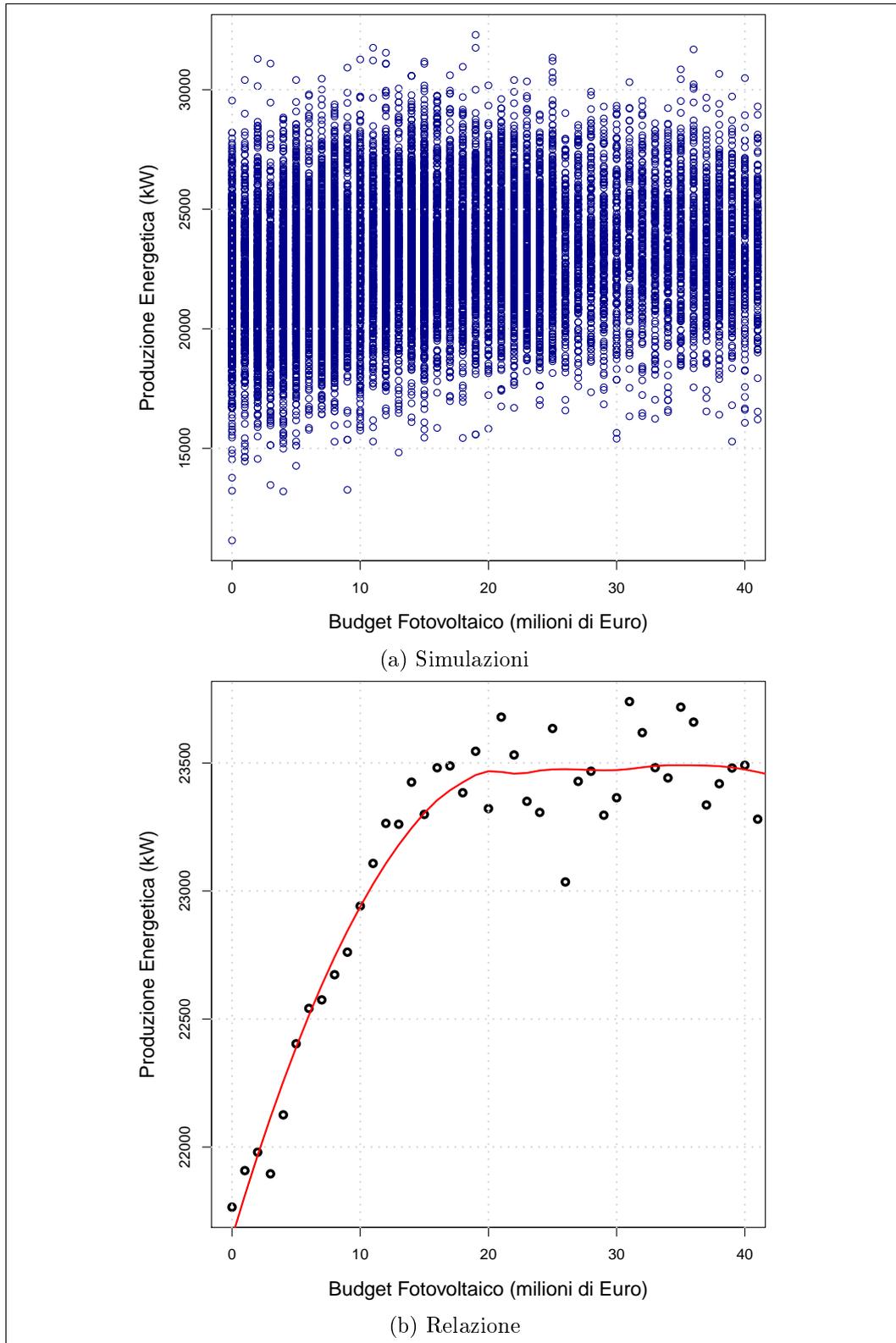


Figura 3.9: Fondo Garanzia

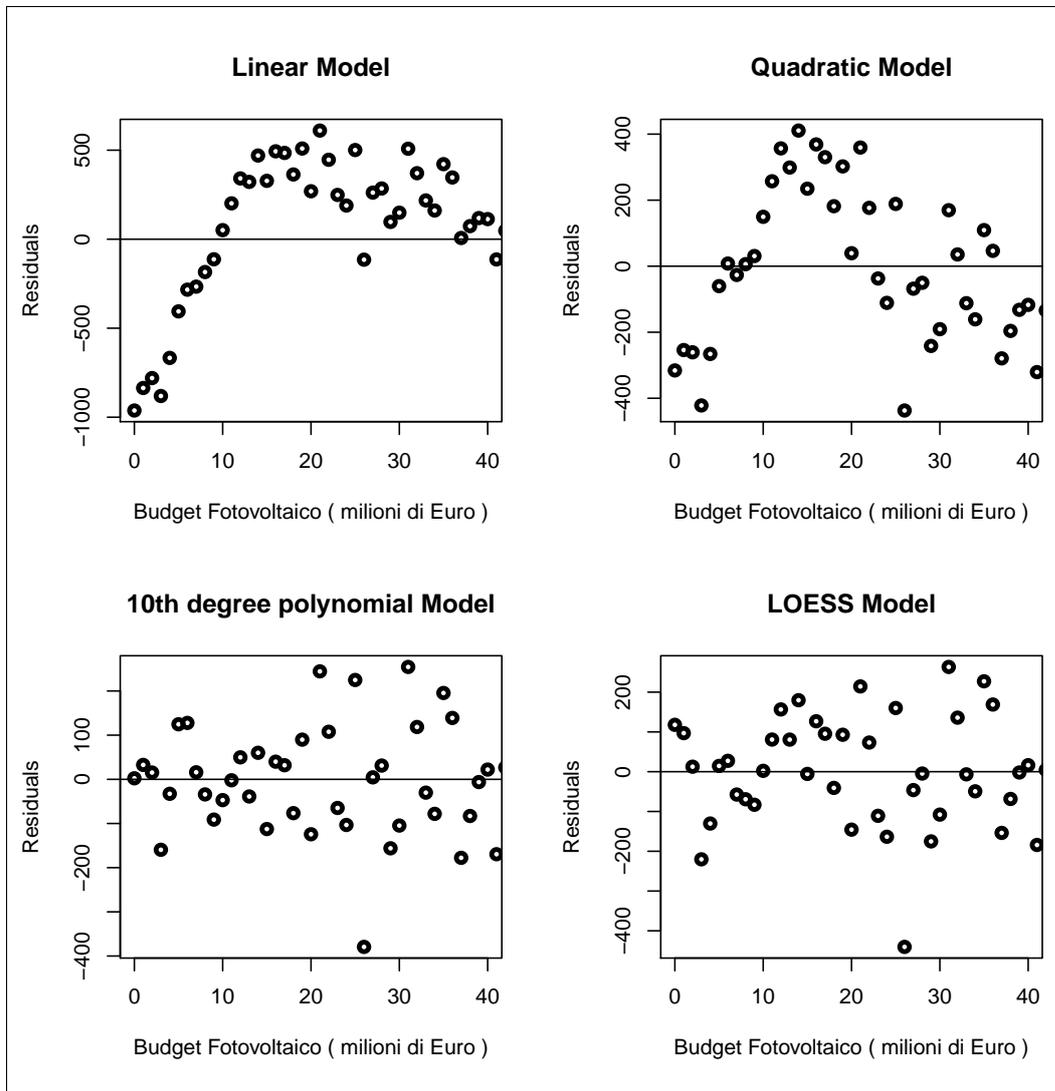


Figura 3.10: Fondo Garanzia, analisi dei residuali

Confronto Incentivi

Infine in Figura 3.11 sono confrontati i differenti comportamenti dei vari incentivi. Si nota facilmente come il Conto Interessi sia il tipo di incentivo migliore per quasi tutto l'intervallo considerato per il budget (che possiamo ritenere sensato in quanto compatibile con gli investimenti realmente effettuati dalla regione), leggermente superato dal Fondo Rotazione solamente con un fondo incentivi maggiore di quaranta milioni di euro. Il Fondo Garanzia

e il Fondo Rotazione hanno un andamento equiparabile per finanziamenti non elevati, ma il secondo si comporta decisamente meglio in caso di forti investimenti (occorre comunque ricordare che in questo grafico non viene tenuto conto di quanta parte di budget viene effettivamente consumata dall'incentivo, fattore che viene invece considerato nella valutazione dell'efficacia impiegata nel modello a vincoli del problema). Il Fondo Asta risulta essere la metodologia di incentivo meno efficiente per la produzione di energia elettrica.

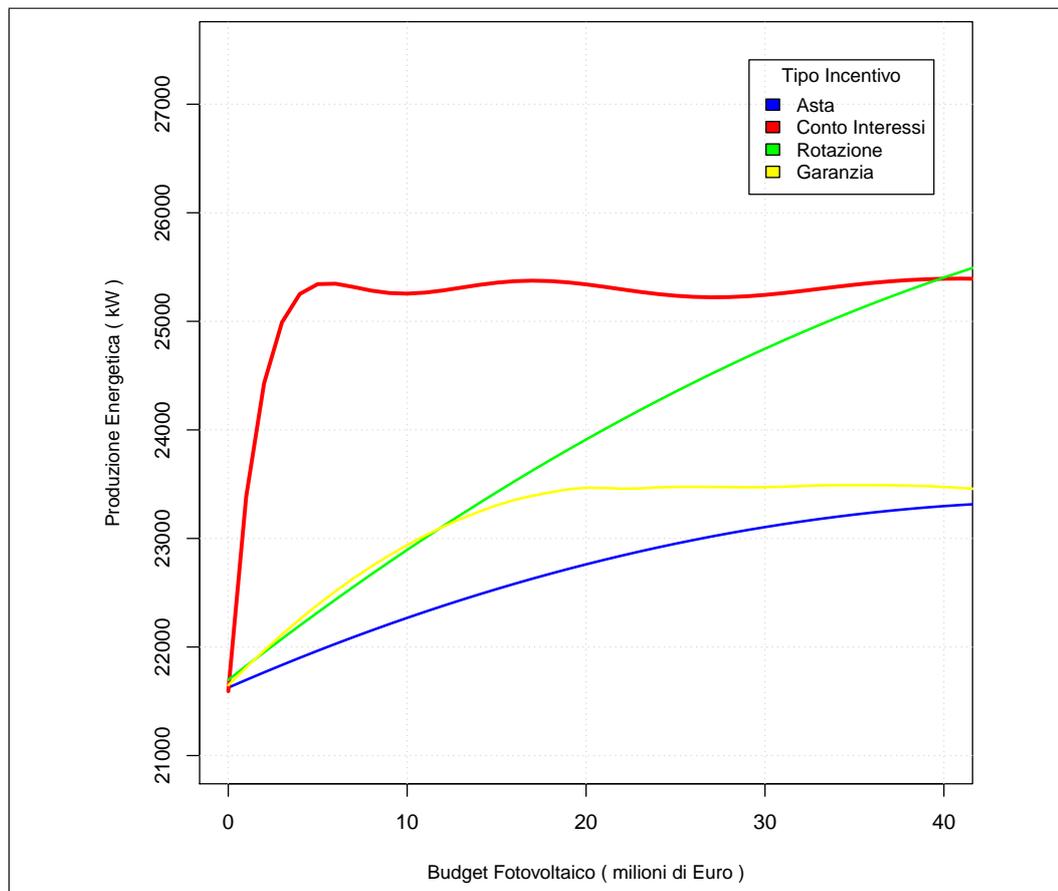


Figura 3.11: Confronto tra i diversi incentivi

3.3.2 Effetti dell'interazione sociale

Gli effetti dell'iterazione sociale sulla produzione energetica sono stati studiati agendo sui due parametri che possono influenzarla, il raggio dell'in-

terazione (misurato in patches) e la sensibilità all'influenza (adimensionale) derivante dal comportamento dei vicini, ed effettuando numerose simulazioni controllate: per ricavare la relazione tra produzione energetica e raggio questo è stato fatto variare da 1 fino a 40 (valori espressi con un'unità di misura interna al simulatore, la patch del mondo virtuale), con incrementi di una unità e 200 prove per valore, per un totale di 32000 simulazioni; per la relazione tra produzione e sensibilità questa è stata fatta crescere da 0 fino a 20 a intervalli di 0.5, ancora con un totale di 32000 simulazioni.

Sensibilità a interazione

In questo paragrafo verranno mostrate le relazioni che legano la sensibilità degli agenti nei confronti dell'interazione sociale e la produzione energetica, distinguendo i quattro tipi di incentivi. Per ogni tipologia è stata effettuata un'analisi della regressione analoga a quelle effettuate in precedenza e, per maggiore concisione, esaminiamo ora direttamente i risultati ottenuti con il modello di regressione da noi ritenuto migliore, senza riportare i passaggi che ci hanno permesso di stabilire quale fosse (coefficiente di determinazione, analisi grafica dei residuali,...); il modello da noi scelto in quanto miglior approssimazione dei dati è stato quello LOESS, anche se la regressione con una funzione polinomiale di alto grado presentava una bontà di adattamento pressoché identica.

Osserviamo che la produzione energetica è positivamente correlata all'incremento della sensibilità all'influenza sociale. Si possono notare alcune somiglianze nell'andamento delle curve di regressione dei Fondi Asta e Rotazione (Fig. 3.12 e Fig. 3.14), infatti in entrambi i casi dopo una relazione quasi lineare per valori della sensibilità inferiori a 10, si nota una leggera diminuzione della pendenza della curva.

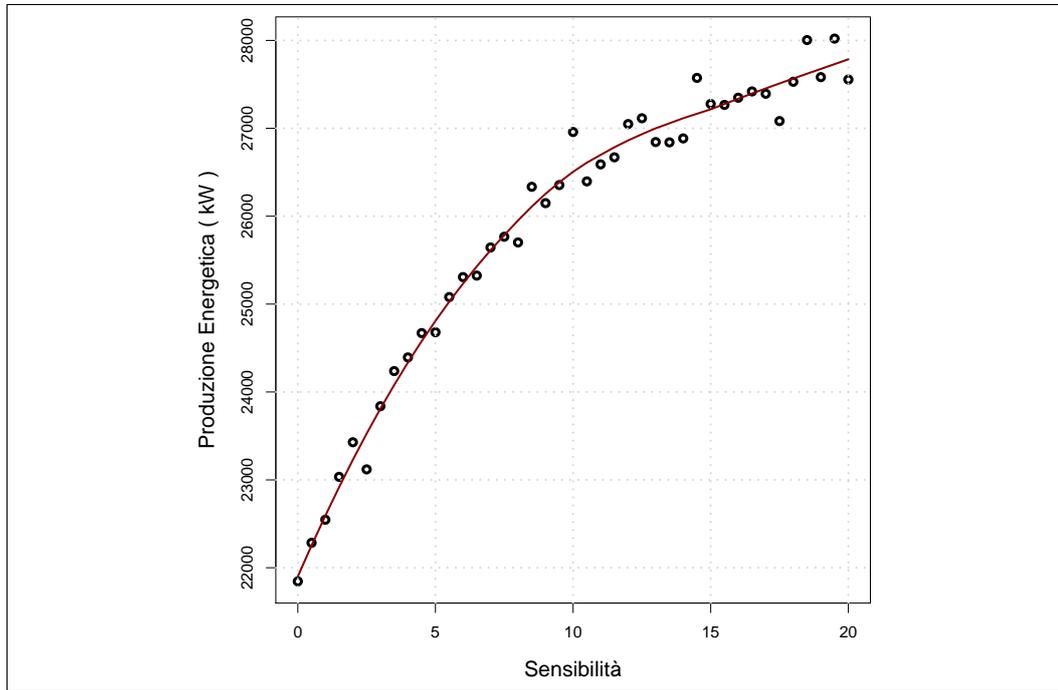


Figura 3.12: Fondo Asta, sensibilità a influenza sociale

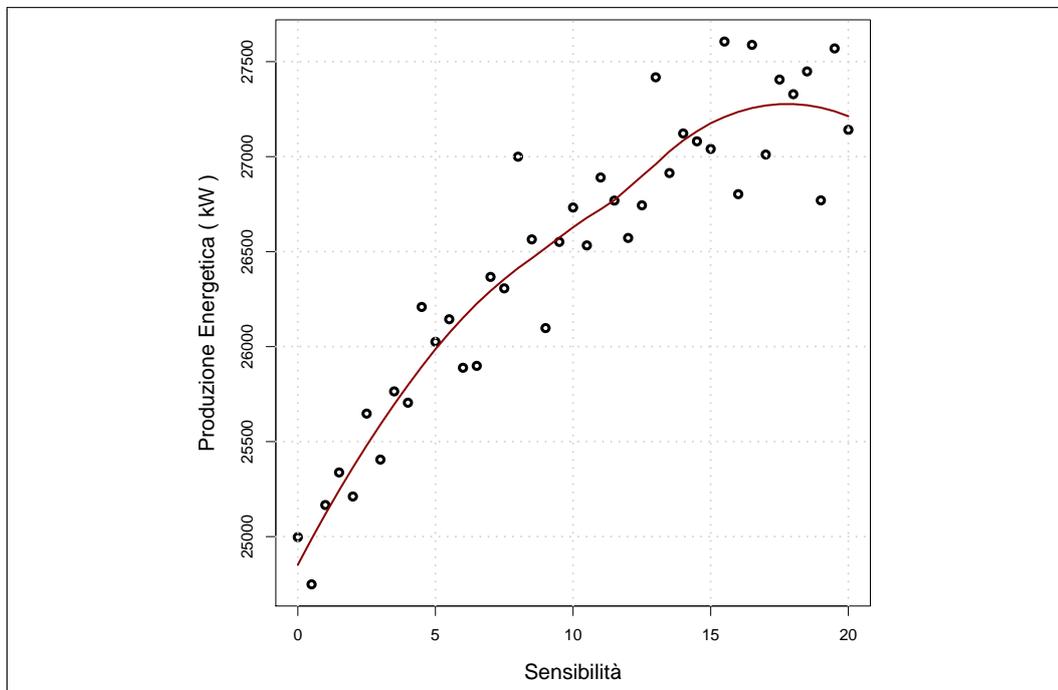


Figura 3.13: Conto Interessi, sensibilità a influenza sociale

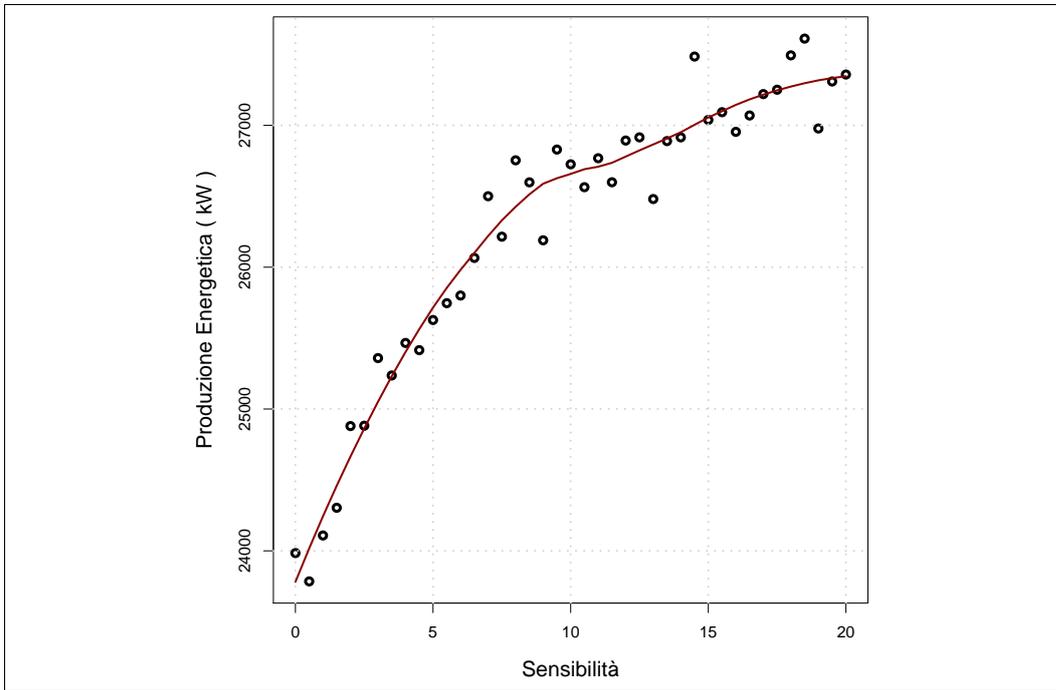


Figura 3.14: Fondo Rotazione, sensibilità a influenza sociale

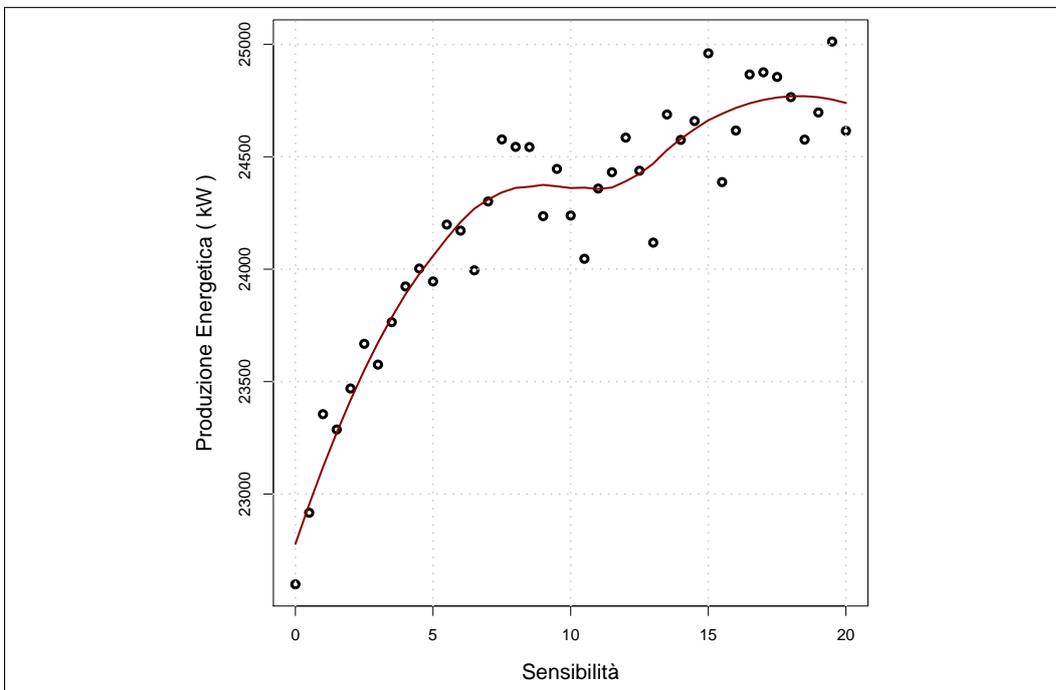


Figura 3.15: Fondo Garanzia, sensibilità a influenza sociale

Nel caso del Conto Interessi e Fondo Garanzia (Fig. 3.13 e Fig. 3.15) la linea di regressione presenta un comportamento più irregolare (specialmente nel caso del Fondo Garanzia) e sembra suggerire che aumentando la sensibilità oltre al valore 20 la corrispondente produzione energetica diminuisca, ma questa inversione di tendenza è apparente e con ulteriori simulazioni abbiamo provato che la funzione continua ad essere crescente, anche se poco e con notevoli oscillazioni, per valori di sensibilità maggiori.

Raggio dell'interazione

Come nel caso della sensibilità, anche per valutare la relazione tra produzione energetica e raggio dell'iterazione sociale abbiamo applicato i metodi di analisi della regressione visti in precedenza, quindi anche in questo caso abbiamo riportato direttamente i risultati con il modello migliore; la scelta è ricaduta nuovamente sul modello LOESS, nonostante la buona approssimazione fornita anche dal modello polinomiale (uno dei motivi che ci ha fatto propendere verso la nostra scelta è il fatto che una funzione di regressione definita da un polinomio di grado elevato fosse troppo sensibile alla presenza di valori anomali, outliers, e presentasse quindi un andamento più irregolare).

Per tutti tipi di incentivo possiamo osservare che la produzione energetica è positivamente correlata all'incremento del raggio dell'iterazione sociale, in particolare fino a un certo valore di raggio l'aumento di quest'ultimo provoca un rapido miglioramento della produzione, ma oltre tale valore la produzione incrementa più moderatamente; in ogni caso, pur con le dovute differenze tra le pendenze, le curve dei vari incentivi indicano che l'interazione sociale è influenzata maggiormente dall'aumento del raggio piuttosto che dalla sensibilità ad essa, anche se entrambi i fattori concorrono ad aumentare l'effetto positivo dell'interazione stessa (può essere utile anche notare che un valore di 40 patches per il raggio in un mondo virtuale a forma di quadrato di lato 60 patches è chiaramente un valore non riscontrabile nel mondo reale).

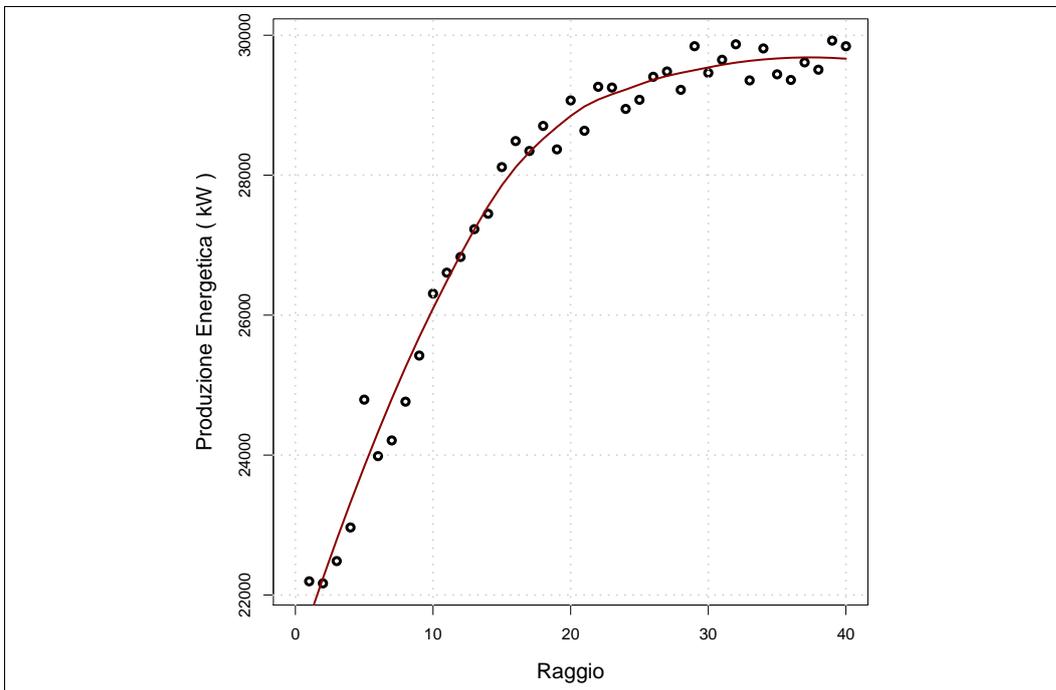


Figura 3.16: Fondo Asta, sensibilità a raggio interazione

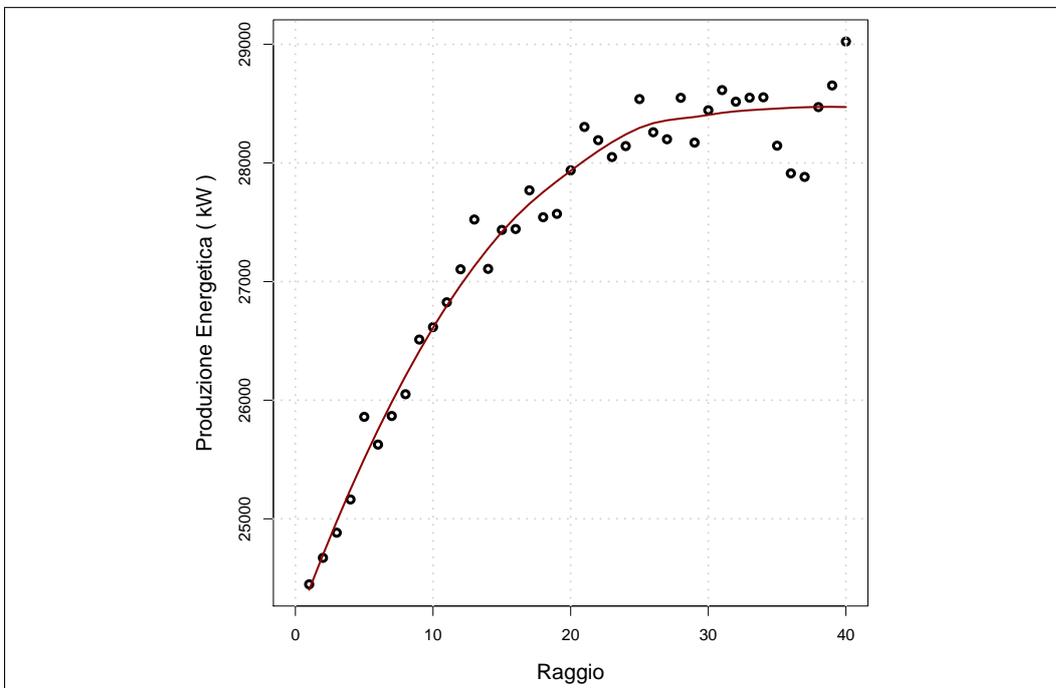


Figura 3.17: Conto Interessi, sensibilità a raggio interazione

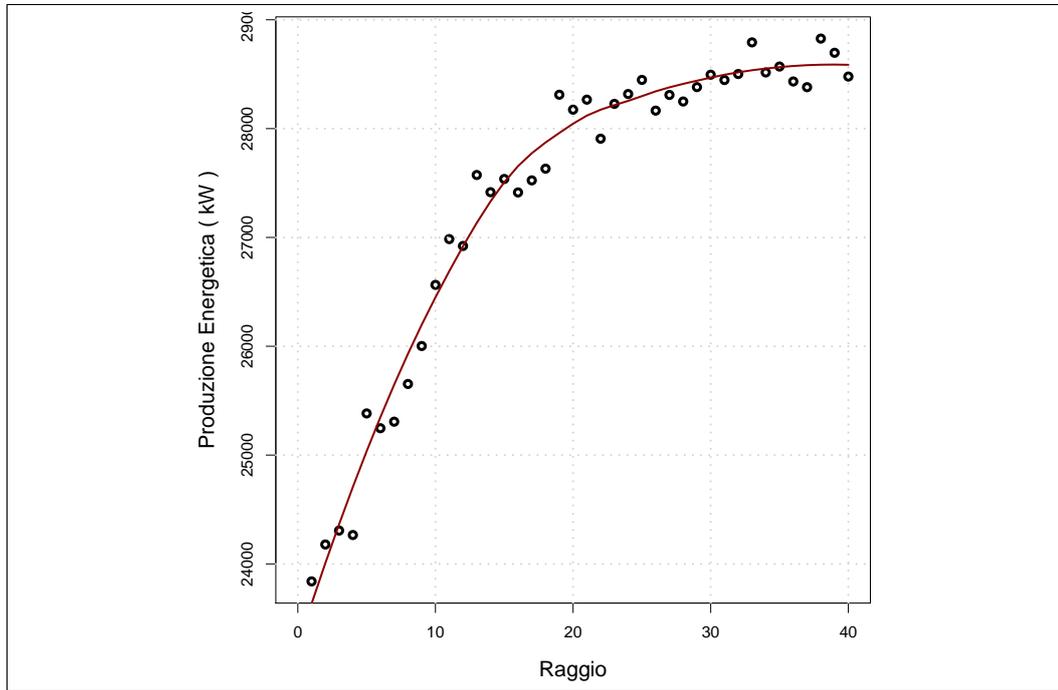


Figura 3.18: Fondo Rotazione, sensibilità a raggio interazione

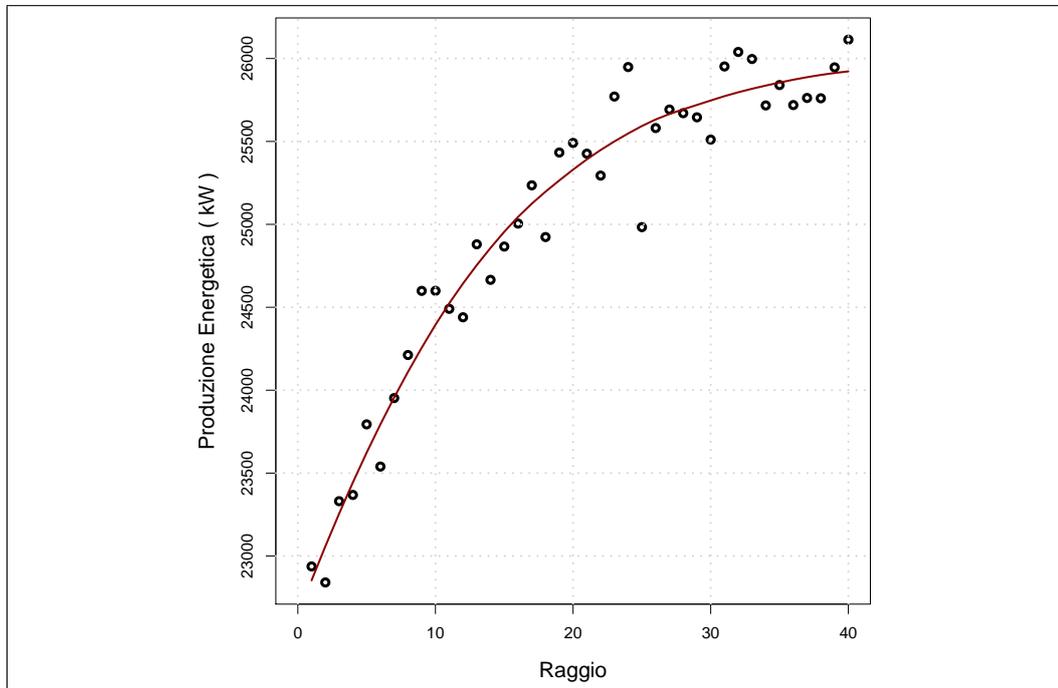


Figura 3.19: Fondo Garanzia, sensibilità a raggio interazione

4 | Ottimizzazione

In aggiunta al modello di simulazione ad agenti, con la relativa prospettiva individuale, il progetto ePolicy ritiene necessario considerare anche una prospettiva globale (regionale nel caso della Regione), in grado di affrontare il problema della pianificazione e dalla valutazione degli impatti dei piani da un punto di vista più ampio, mantenendo al tempo stesso una stretta integrazione con il livello individuale.

La pianificazione delle attività regionali può essere vista come un complesso problema di ottimizzazione combinatoria; i decisori politici devono prendere decisioni e soddisfare un insieme di vincoli, tentando al tempo stesso di realizzare un certo numero di obiettivi, come ad esempio ridurre gli effetti negativi e incrementare i positivi su ambiente, società ed economia. La fase di valutazione, in cui si considerano quali siano gli impatti delle politiche scelte sull'ambiente ed in misura minore in ambito economico e sociale, è ora in genere effettuata in sequenza dopo la creazione di un piano, con lo svantaggio che se questo contenesse impatti negativi sull'ambiente potrebbero venire applicate solo delle contromisure correttive; per evitare ciò, nell'approccio di ePolicy la valutazione e la pianificazione sono condotte allo stesso tempo.

Per la valutazione ambientale sono stati proposti diversi metodi: un modello probabilistico [28], un modello fuzzy (la logica fuzzy prevede che si possa attribuire a una proposizione un grado di verità compreso tra 0 e 1) [29] e un modello lineare a vincoli (*Constraint Logic Programming*, programmazione logica a vincoli, chiamata in seguito anche CLP) [31]. Il motivo per sperimentare diversi tipi di modello è che le matrici usate dagli esperti ambientali si prestano a differenti interpretazioni, quindi era importante capire quale fosse la migliore scelta possibile. Il modello CLP è risultato essere il più veloce -

a livello computazionale - in quanto per la programmazione lineare esistono tecniche di risoluzione molto efficienti. In secondo luogo, questo modello può essere facilmente esteso aggiungendo nuovi vincoli, per risolvere nuovi tipi di problemi; ad esempio se le attività da pianificare fossero variabili decisionali (invece che valori fissi) potremmo svolgere la pianificazione contemporaneamente alla valutazione ambientale. Dal momento che questo era uno degli scopi del progetto si è scelto di utilizzare l'approccio CLP.

In questo capitolo introdurremo molto brevemente la programmazione logica a vincoli, con una breve panoramica e citando gli strumenti software di cui ci siamo serviti, passeremo poi a presentare il modello sviluppato che incorpora al suo interno le attività di pianificazione e valutazione e infine mostreremo i risultati ottenuti applicando il modello al caso di studio scelto, ovvero il piano energetico 2011-2013 per la regione Emilia-Romagna.

4.1 Programmazione logica a vincoli

Come abbiamo già ampiamente spiegato in precedenza il problema della creazione di un piano regionale può essere considerato come un problema caratterizzato da un insieme di vincoli e una funzione obiettivo. Nell'ambito dell'Intelligenza Artificiale i problemi per cui è richiesto soddisfare un insieme di vincoli sono definiti come *Problemi di Soddisfacimento di Vincoli* (in inglese Constraint Satisfaction Problem, da cui l'acronimo *CSP*). Un CSP è definito da una terna $\langle X, D, C \rangle$, dove X è un insieme di variabili $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, D è un dominio discreto per ogni variabile $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ e C è l'insieme di vincoli - un vincolo è una relazione tra variabili che definisce un sottoinsieme del prodotto cartesiano dei domini $D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n$; con queste premesse una soluzione di un problema di soddisfacimento di vincoli è data da un assegnamento di valori alle variabili consistente con i vincoli [58]. Analogamente, un problema di ottimizzazione con vincoli (Constraint Optimization Problem, *COP*) è definito da $\langle X, D, C, f \rangle$, cioè un CSP più una *funzione obiettivo* $f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, la cui soluzione è un assegnamento di valori alle variabili compatibile con i vincoli del problema che ottimizza la funzione obiettivo. Le metodologie risolutive impiegate per risolvere problemi a vincoli attingono in buona parte

alle tecniche di Ricerca Operativa e Intelligenza Artificiale, in particolare noi considereremo la *Programmazione Logica a Vincoli*.

La programmazione logica a vincoli [36] (in inglese *Constraint Logic Programming* da cui CLP) è una classe di linguaggi di programmazione che estendono la classica Programmazione Logica - il paradigma di programmazione basato sulla logica del primo ordine implementato da linguaggi come ad esempio Prolog [23, 39, 22], sviluppato nei primi anni settanta e ampiamente diffuso ancora oggi. Alle variabili possono essere assegnati sia termini (i tipi di dato e le strutture riconosciute in Prolog) sia valori interpretati, appartenenti a una determinata *classe*, un parametro caratteristico dello specifico linguaggio CLP; per esempio è possibile avere $\text{CLP}(\mathcal{R})$ [37], in grado di operare sui valori reali, oppure $\text{CLP}(\mathcal{FD})$, in cui le variabili appartengono a domini finiti. All'interno di una classe sono definite le funzioni interpretate (che possono essere nei domini numerici i soliti operatori $+$, $-$, \times , etc.) e i predicati (ad esempio, $<$, \neq , \geq , etc.), che sono chiamati *vincoli*. La semantica dichiarativa consente l'interpretazione intuitiva per i vincoli e i termini, relativamente al dominio considerato: ad esempio, $1.3 + 2 < 5$ è *vero* in $\text{CLP}(\mathcal{R})$; ciò è un'estensione molto significativa rispetto alla programmazione logica standard in quanto i linguaggi logici operano in domini non interpretati ("Universo di Herbrand") e quindi le relazioni tra variabili possono essere solamente verificate a posteriori e non trattate come vincoli veri propri. La semantica operativa estende quella di Prolog per atomi costruiti sui predicati usuali - quelli definiti da un insieme di clausole - ma conserva quelli da interpretare, i vincoli, in una struttura dati speciale, chiamata *constraint store*; essa è in seguito interpretato e modificato da un meccanismo esterno, il *constraint solver*, il risolutore dei vincoli. Il risolutore è in grado di controllare se una combinazione di vincoli è soddisfacibile o meno, e può modificare lo store, sperabilmente per semplificarne lo stato. Generalmente il solver non effettua una propagazione *completa*: se una valutazione ha come risultati *falso*, allora sicuramente la soluzione è impossibile, anche se in certi casi può capitare che il risolutore non rilevi l'impossibilità di un problema anche se non esistono soluzioni.

$\text{CLP}(\mathcal{R})$ è una classe di programmazione logica a vincoli in cui le variabili

appartengo all'insieme dei numeri reali, i vincoli disponibili sono uguaglianze e disuguaglianze lineari e generalmente il risolutore è implementato tramite l'algoritmo del simplesso [25], molto veloce e completo per (dis)equazioni lineari (cioè è sempre in grado di restituire *vero* o *falso*). In alcuni sistemi, grazie alla disponibilità di risolutori efficienti per la programmazione lineare intera, certi vincoli non lineari sono accettati nel linguaggio, in particolare è possibile imporre che certe variabili assumano esclusivamente valori interi; in casi come questo la complessità del problema passa da P a NP-hard e il risolutore deve spesso ricorrere a tecniche di branch-and-bound. Ad ogni modo, l'utente può specificare anche una funzione obiettivo, un termine lineare che dovrebbe essere massimizzato o minimizzato garantendo al tempo stesso che tutti vincoli siano soddisfatti.

4.2 Strumenti

Al giorno d'oggi esistono numerose implementazioni di $\text{CLP}(\mathcal{R})$ [38] e diverse versioni di Prolog dispongono di una propria libreria per $\text{CLP}(\mathcal{R})$. Per il progetto ePolicy si è scelto di adottare il software open source ECL^iPS^e [10, 52].

4.2.1 ECL^iPS^e

ECL^iPS^e è un sistema software per lo sviluppo di applicazioni di programmazione a vincoli e indicata per lo studio di aspetti relativi alla risoluzione di problemi combinatori, come appunto la programmazione vincolata, modellazione di problemi, programmazione matematica, tecniche di ricerca di soluzioni, etc. Al suo interno sono contenute librerie per risolutori a vincoli, un linguaggio di alto livello (derivato da Prolog), interfacce per risolutori esterni e altre funzionalità. In Figura 4.1 mostriamo come si presenta l'interfaccia utente di ECL^iPS^e .

Tra le diverse librerie disponibili, ne esiste una denominata *Eplex* [51] che interfaccia ECL^iPS^e a un risolutore lineare intero, il quale può essere sia uno strumento commerciale, come CPLEX o Xpress-MP, che open source. A default Eplex nasconde molti dei dettagli del risolutore, ma nondimeno, quando richiesto, l'utente può regolare diversi parametri per migliorare le

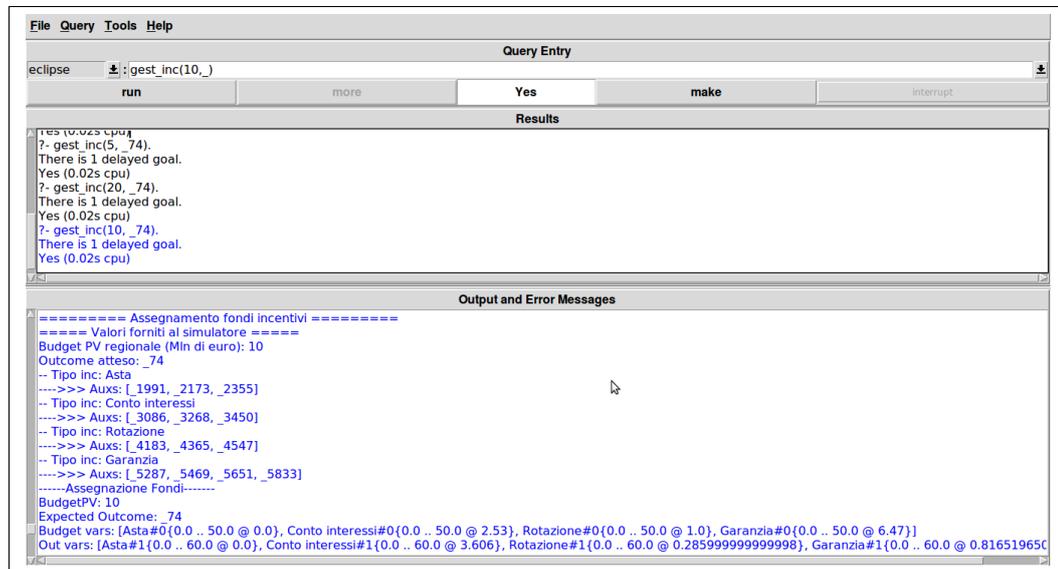


Figura 4.1: ECLⁱPS^e, Interfaccia Utente

prestazioni ed esaminare lo stato interno del solver. Nell'ambito del progetto ePolicy ci siamo serviti di questa libreria, insieme alle altre funzionalità offerte da ECLⁱPS^e, per modellare e risolvere i problemi relativi alla pianificazione energetica regionale.

4.3 Modellazione problema

Passeremo ora ad occuparci dell'implementazione dell'ottimizzatore impiegato nell'ambito del progetto ePolicy per fornire supporto alle decisioni per lo sviluppo del piano energetico regionale.

In Figura 4.2 è presentata una visione generale e di alto livello dei fattori che entrano in gioco durante la creazione la fase di pianificazione, come i costi e la capacità produttiva degli impianti, gli impatti economici e ambientali delle azioni intraprese, i vincoli di budget e gli obiettivi di produzione energetica, etc. (benché non siano oggetto di discussione in questo capitolo sono inclusi per completezza nella figura anche gli impatti sociali e le modalità di incentivazione, gestite rispettivamente dal componente di Opinion Mining e dal simulatore).

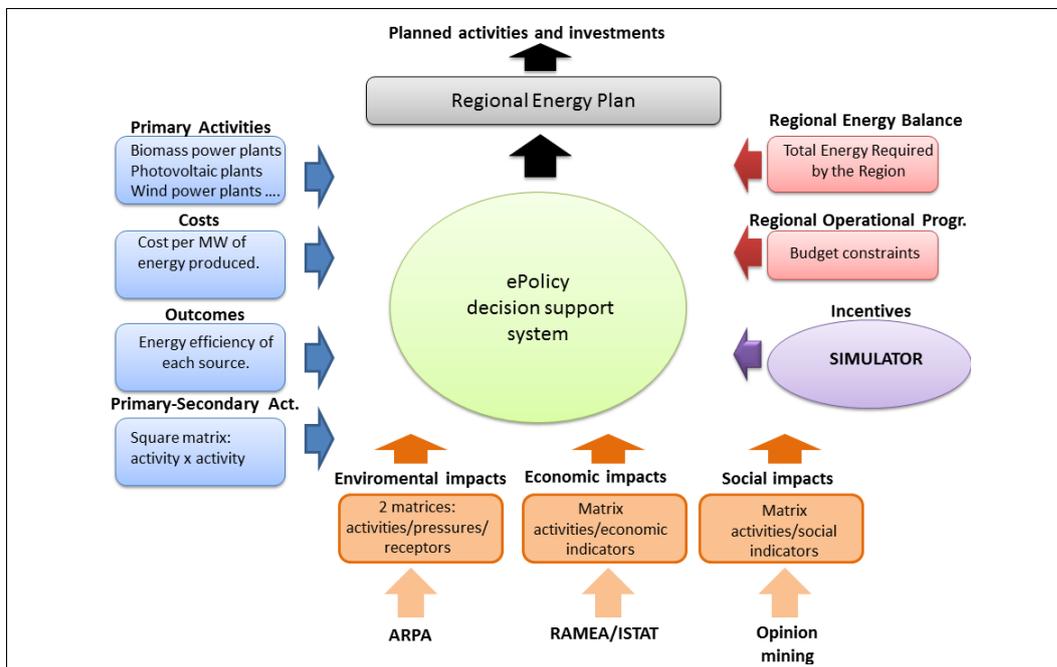


Figura 4.2: Panoramica di Input e Output del DSS di ePolicy

4.3.1 Perché un approccio basato sui vincoli

L'attività di pianificazione regionale è al momento svolta da esperti umani che costruiscono un singolo piano, considerando gli obiettivi strategici regionali che seguono le direttive nazionali ed europee. Dopo che il piano è stato ideato l'ente per la protezione ambientale è chiamata a valutarne la sostenibilità dal punto di vista ambientale. In genere non c'è nessuna retroazione, la valutazione può solamente stabilire se il piano sia ecocompatibile o meno ma senza poterlo per modificare; in rari casi può proporre alcune misure correttive, le quali possono però solamente mitigare gli effetti negativi di decisioni di pianificazione sbagliate.

Oltre a ciò, sebbene le normative prevedano che una valutazione ambientale significativa debba confrontare due o più opzioni (piani differenti), questo è fatto raramente in Europa poiché la valutazione è tipicamente fatta a mano e richiede un lungo lavoro; anche nei pochi casi in cui due opzioni vengano considerate, solitamente una è il piano e l'altra è l'assenza di pianificazione.

La modellazione a vincoli supera le limitazioni dei processi manuali per di-

versi motivi. In primo luogo, essa fornisce uno strumento che automaticamente prende decisioni di pianificazione, tenendo in considerazione il budget allocato sulla base sia del piano operativo regionale che delle linee guida nazionali/europee.

Secondo, gli aspetti ambientali sono considerati durante la costruzione del piano, evitando di procedere per tentativi ed errori.

Come terza ragione, il ragionamento con i vincoli è uno strumento potente nelle mani di un decisore politico in quanto la generazione di scenari alternativi è estremamente semplificata ed il confronto e valutazione seguono naturalmente. Nel caso in cui i risultati non soddisfino coloro che stabiliscono le politiche o gli esperti ambientali gli aggiustamenti possono essere introdotti molto facilmente all'interno del modello; ad esempio, nel settore della pianificazione energetica regionale, cambiando i limiti della quantità di energia che ogni fonte può fornire, possiamo correggere il piano considerando l'andamento del mercato e anche la potenziale ricettività della regione.

4.3.2 Modello CLP

Il Piano Regionale è il risultato della principale attività di definizione delle politiche in cui le regioni europee siano coinvolte. Ogni regione dispone di un budget distribuito sulla base del Programma Operativo, il quale specifica le priorità di ogni regione per l'assegnamento dei fondi (nel campo dell'energia una esempio di priorità è l'incremento della produzione da fonti rinnovabili).

Partendo dalla struttura per il sistema di supporto alle decisioni descritta nel primo capitolo, ci accingiamo ora a illustrare il modello per l'ottimizzazione globale ideato per prendere in considerazione la prospettiva regionale.

Nella fase di pianificazione occorre decidere quali attività debbano essere svolte, distinguendo a grandi linee sei tipologie: infrastrutture e impianti, edifici e trasformazioni sul territorio, estrazione delle risorse, modifiche del regime idrico, trasformazioni industriali, gestione dell'ambiente. Per ogni attività dovrebbe essere inoltre deciso un ordine di grandezza che descriva in quale quantità un'attività venga portata a termine.

Abbiamo quindi N_a attività rappresentate con $a_i (i = 1..N_a)$ e distinguiamo tra *attività primarie* e *attività secondarie*, nel caso del piano energetico esse sono rispettivamente quelle che producono direttamente energia e quel-

le che supportano le prime fornendo le necessarie infrastrutture. Possiamo quindi immaginare i seguenti tipi di input, collegati alla nozione di attività:

1. lista delle *attività primarie* (impianti a biomassa, impianti fotovoltaici, impianti eolici, etc.) e *quantità minime/massime* per ogni attività (es., aumento del 10% la produzione di energia fotovoltaica);
2. *funzione di costo*: consideriamo un vettore di costi $C = (c_1, \dots, c_{N_a})$ dove ogni elemento è associato ad una specifica attività e rappresenta il costo unitario della stessa - sostanzialmente si tratta di determinare il costo per MWatt di energia prodotta in base all'attività¹;
3. *funzione di efficienza*: tramite un vettore per le produzioni energetiche $Out = (out_1, \dots, out_{N_a})$ determiniamo l'energia generata per ogni MWatt di potenza installata di ogni attività - questa funzione dipende dalla località geografica (ad esempio nell'Italia meridionale per via del clima soleggiato l'efficienza del fotovoltaico è maggiore rispetto alle aree settentrionali);
4. *la matrice delle attività primarie-secondarie* D , usata per stabilire quali attività secondarie e in quale misura sono necessarie per realizzare un determinato ammontare di attività primaria, ovvero una matrice di dipendenze tra le attività.

¹Il costo di un impianto dipende principalmente dalla potenza installata: il costo di installazione di un impianto solare dipende dalla dimensione in metri quadri dei pannelli installati, da cui deriva di conseguenza una certa potenza massima. Notare come il costo considerato sia il costo totale per il sistema regionale, che non è lo stesso costo sostenuto dai contribuenti della regione Emilia-Romagna, poiché la regione può attuare le proprie politiche in diversi modi, convincendo i privati a investire nella produzione energetica. Ciò può essere fatto tramite una leva finanziaria oppure garantendo condizioni favorevoli (economiche o di altro tipo) agli investitori. Alcune fonti energetiche sono economicamente redditizie e quindi non richiedono sussidi da parte della regione. Ad esempio, le centrali a biomassa in Italia al giorno d'oggi sono economicamente vantaggiose per gli investitori, quindi i privati stanno proponendo diversi progetti per la costruzione di tali impianti; d'altra parte le biomasse producono anche inquinanti, non sono sempre sostenibili (vedere [17] per una discussione ulteriore), quindi è probabile la nascita di comitati locali contrari alla costruzione di nuove centrali. Per queste ragioni, c'è un limite al numero di licenze che la regione concede agli investitori privati per la realizzazione di impianti a biomassa

Ogni regione ha i propri obiettivi, alcuni intrinsecamente determinati dalla regione stessa altri conseguenze di decisioni politiche.

1. *produzione richiesta/attesa*: in un piano energetico la produzione energetica attesa all'interno dei confini regionali è basata sulle stime dei consumi energetici;
2. *vincoli di budget*: ogni regione dispone di una certa quantità di fondi da destinare a incentivi con i quali indirizzare il mercato dell'energia nella direzione desiderata - dato un budget disponibile per il piano, questo è vincolato in termini di costo totale (questo vincolo può essere applicato sia al piano complessivo sia a parti di esso);
3. *obiettivi politici*: sono forniti dai decisori politici, come ad esempio la priorità di conformarsi alla linea guida europea come l'iniziativa 20-20-20², e possono essere traslati in vincoli che specificano la minima quantità di energia prodotta da fonti rinnovabili.

Infine occorre tenere in considerazione gli input relativi alla configurazione geofisica della regione e alla buona norma.

1. *diversificazione delle fonti energetiche*: l'allocazione dei fondi non dovrebbe essere diretta verso un'unica fonte di energia ma coprire diverse risorse energetiche. Questo requisito è considerato come buona norma e supportato da numerose considerazioni, per esempio per assicurare "robustezza" nei confronti di fluttuazioni di prezzo e disponibilità delle varie risorse - queste indicazioni possono essere implementate sotto forma di vincoli che impongano che percentuali minime della produzione totale siano soddisfatte da ogni fonte energetica;
2. *limiti sociali e geografici*: ogni regione ha le sue caratteristiche geofisiche (ad esempio, l'essere o meno ventose), che possono porre limiti alla quantità massima di energia generate da determinate risorse - le centrali idroelettriche possono essere costruite con un'attenta valutazione degli impatti ambientali che possono avere sul territorio, come, ovviamente, l'allagamento di vaste aree.

²L'iniziativa 20-20-20 mira a raggiungere tre obiettivi entro il 2020: ridurre del 20% l'emissione di gas serra, produrre il 20% dell'energia consumata attraverso fonti rinnovabili e migliorare del 20% l'efficienza energetica.

Un altro aspetto che i decisori politici devono considerare sono le ripercussioni su ambiente, società ed economia. Come già descritto nel primo capitolo uno degli strumenti per effettuare questa valutazione in Emilia-Romagna prevede l'impiego di matrici coassiali che definiscono le relazioni tra le attività primarie di un piano e gli impatti ambientali (o pressioni) positivi o negativi e in che modo tali attività influiscano sui recettori ambientali (anche essi introdotti in precedenza)³.

Lo scopo finale di un piano energetico può essere definito, più o meno, come il tentativo di guidare il mercato libero della produzione di energia verso la copertura del fabbisogno energetico regionale e il soddisfacimento di alcuni obiettivi politici. Per questo fine un piano consiste in un insieme di *decisioni* riguardanti i seguenti aspetti:

1. quali tipi⁴ (attività) di produzione energetica sia necessario impiegare e in che ordine di grandezza;
2. quanti fondi debbano essere assegnati per spingere il mercato verso la produzione desiderata (attraverso l'implementazione di meccanismi incentivanti). Questa decisione può essere separata in due sotto-problemi:
 - (a) la quantità di finanziamenti da allocare per promuovere ogni sistema di generazione di energia diverso, sotto forma di incentivi;
 - (b) i meccanismi per assegnare tali incentivi.

4.3.3 Implementazione modello

Illustreremo ora come sono stati modellate le problematiche introdotte precedentemente all'interno del paradigma della Programmazione Logica a Vincoli, in particolare sul dominio dei numeri reali.

³La matrice correntemente utilizzata per la valutazione ambientale contiene 93 attività, 29 impatti negativi, 19 positivi e 23 recettori e valuta 11 tipi di piano. Queste matrici prendono in esame anche in che modo le attività secondarie richieste impattino sui recettori

⁴Per la precisione i tipi di energia sono influenzati anche da alcuni obiettivi politici, presi come ingressi

Matrici coassiali in CLP(\mathcal{R})

Le matrici coassiali possono essere interpretate facilmente come modelli di programmazione lineare. Più in dettaglio, rappresentiamo le attività e i loro ordini di grandezza attraverso il vettore $A = (a_1, \dots, a_{N_a})$, dunque gli impatti ambientali causati dall'attività i possono essere stimati col sistema di equazioni lineari:

$$\forall j \in \{1, \dots, N_p\} \quad p_j = m_j^i a_i \quad (4.1)$$

Quando consideriamo un intero piano regionale, sommiamo i contributi di tutti le attività e otteniamo la stima dell'influenza esercitata su ogni impatto/pressione:

$$\forall j \in \{1, \dots, N_p\} \quad p_j = \sum_{i=1}^{N_a} m_j^i a_i \quad (4.2)$$

Allo stesso modo, dato il vettore delle pressioni ambientali $P = (p_1, \dots, p_{N_p})$, è possibile calcolare l'influenza sul recettore ambientale r_i per mezzo della matrice N , che collega pressioni e recettori:

$$\forall j \in \{1, \dots, N_r\} \quad r_j = \sum_{i=1}^{N_p} n_j^i p_i \quad (4.3)$$

L'obiettivo finale della valutazione di una politica ambientale è stimare l'impronta ambientale di un piano. Poiché il piano è definito da un insieme di valori che rappresentano l'ordine di grandezza delle attività previste, è possibile calcolare l'impronta ambientale $R = (r_1, \dots, r_{N_r})$ semplicemente applicando le equazioni (4.2) e (4.3). Un altro importante interrogativo che potrebbe interessare l'utente del sistema di supporto alle decisioni è sapere quali attività, tra quelle possibili, abbiano un maggiore impatto sul recettore r_i . Dal momento CLP(\mathcal{R}) prevede di poter massimizzare o minimizzare una funzione obiettivo, il modello diventa:

$$\begin{aligned} & \max(r_i) \\ \text{s.t.} & \quad (4.2)(4.3) \\ & \quad \sum_j a_j = 1 \\ & \quad \forall j, a_j \text{ è intero} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Infine, se ci sono leggi che impongono limiti per alcuni recettori (ad esempio sulla CO_2), è immediato imporre tali restrizioni sui recettori (es. $r_{CO_2} \leq \text{limite}_{CO_2}$), scoprendo quindi se un'attività può essere portata a termine o è necessario intraprendere misure correttive (ad esempio stimolare la crescita di nuove foreste per il r_{CO_2}).

Nel casi in cui più attività alternative possano contribuire a soddisfare gli stessi bisogni, la regolamentazione prevede che le alternative debbano essere prese in esame e confrontate. Ad esempio, la necessità di energia elettrica aggiuntiva è soddisfatta dalla costruzione di una nuova centrale; in ogni caso, è possibile scegliere il tipo di impianto da realizzare in base alle condizioni ambientali. In un'area dall'elevato inquinamento atmosferico la costruzione di una centrale termoelettrica rischierebbe di aumentare il livello di inquinamento oltre la soglia imposta dalla legge, quindi sarebbe necessario progettare un tipo di impianto differente, ad esempio uno a energia solare. D'altro canto, un impianto solare potrebbe rivelarsi molto costoso e precludere dunque la realizzazione di altre attività indispensabili nell'area (costruire scuole, ospedali, etc.). In una simile circostanza il responsabile del piano potrebbe imporre un vincolo che afferma che sono necessari almeno k MW di energia elettrica:

$$\sum_{i \in \text{ImpiantiEnergetici}} a_i \geq k \quad (4.5)$$

(dove *ImpiantiEnergetici* è l'insieme degli indici del vettore A corrispondenti agli impianti che producono energia elettrica) e poi ottimizzare per uno dei recettori, es. r_{CO_2} , o qualche somma pesata dei ricettori d'interesse. O ancora, sarebbe possibile chiedere al DSS quale sia la massima produzione energetica possibile nella regione senza violare i limiti imposti dalla legge:

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i \in \text{ImpiantiEnergetici}} a_i \\ \text{s.t.} \quad & (4.2)(4.3) \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\forall i \in \{1, \dots, N_r\} \quad r_i \leq \text{limite}_i$$

In questo modo è possibile trovare il massimo numero di MW che possono essere prodotti e anche l'energia elettrica generata da ogni impianto. Il risolutore del problema CLP può inoltre trovare una soluzione che imponga l'esecuzione di attività di compensazione, come suggerito in precedenza.

Analisi della sensibilità

L'algoritmo del simplesso (applicabile grazie alla linearità dei vincoli del modello) fornisce in modo efficiente - nel nostro modello il tempo di computazione si è rivelato trascurabile - il valore ottimo della funzione obiettivo, l'assegnamento ottimo dei valori alle variabili decisionali, e altre informazioni utili per i decisori politici. In particolare consente di ricavare i cosiddetti *costi ridotti* e la *soluzione duale*. Questi indicatori danno informazioni preziose sulla sensibilità della soluzione trovata nei confronti dei parametri del modello e consentono di fare un tipo di analisi molto interessante per gli utenti del DSS.

La soluzione duale è un insieme di valori che corrispondono ai vincoli e può essere immaginata come la derivata della funzione obiettivo rispetto al lato destro dei vincoli (dall'inglese Right Hand Side, RHS). Ciò implica che attraverso la soluzione duale è immediato rendersi conto di quali siano i vincoli *stretti*, ovvero quali modificherebbero il valore della funzione obiettivo se i coefficienti del lato destro cambiassero. Se ad esempio si cercasse di ottimizzare il numero f_{MW} di MW di potenza elettrica con il vincolo $r_{CO_2} \leq limite_{CO_2}$ e il corrispondente valore duale d_{CO_2} nella soluzione ottima fosse diverso da zero, questo significherebbe che:

$$d_{CO_2} = \frac{\partial f_{MW}}{\partial limite_{CO_2}} \quad (4.7)$$

In altri termini, il valore della variabile d_{CO_2} risponde alla domanda: "Quale sarebbe il decremento della produzione energetica nel caso in cui il limite di CO_2 si abbassasse di un punto?". Questo è un punto molto importante poiché le leggi tendono a cambiare, in genere diventando più severe.

La stessa analisi potrebbe essere effettuata con il problema di ottimizzare alcuni recettori (o la loro somma pesata, dato un numero totale di impianti (o MW richiesti). In questo caso il valore duale associato ad un vincolo rappresenta quanto il recettore migliorerebbe se il vincolo fosse parzialmente rilassato (se il lato destro diventasse meno stringente). Ad esempio, supponiamo di ottimizzare le emissioni di ossidi di azoto (NO_x) e di avere un vincolo che imponga un limite superiore (F , es. in euro) al costo totale delle attività da portare a termine, dove il vettore C specifica il costo di ogni

attività:

$$\sum_{i=1}^{N_a} c_i a_i \leq F \quad (4.8)$$

Dopo aver ottenuto la soluzione ottima, il responsabile del piano potrebbe chiedersi: “*Supponendo ora di disporre di più fondi, se aggiungessi un euro quanto diminuirebbe l'emissione di NO_x ?*”. La risposta sarebbe data dal valore duale d_e del vincolo 4.8.

Pianificazione con $CLP(\mathcal{R})$

Dopo aver visto come effettuare la valutazione ambientale secondo il paradigma della $CLP(\mathcal{R})$, mostriamo ora come sia possibile integrare anche la fase di ideazione del piano regionale sfruttando le stesse metodologie di modellazione.

Rappresentiamo nuovamente le attività tramite il vettore $A = (a_1, \dots, a_{N_a})$ e ad ognuna di esse associamo una variabile G_i che ne descrive la grandezza; questa può essere rappresentata sia in modo assoluto, come quantità di una data attività, che in modo relativo, come percentuale rispetto alla quantità esistente della stessa attività - in seguito faremo riferimento alla prima modalità.

Occorre distinguere tra attività primarie e secondarie: A^P è l'insieme degli indici delle prime, mentre A^S è l'insieme degli indici delle seconde. Le dipendenze tra attività primarie e secondarie sono espresse dal vincolo:

$$\forall j \in A^S \quad G_j = \sum_{i \in A^P} d_{ij} G_i \quad (4.9)$$

Assegnato un valore B_{Piano} al budget disponibile a un determinato piano, si ha un'equazione che limita il costo complessivo di un piano nel seguente modo:

$$\sum_{i=1}^{N_a} G_i c_i \leq B_{Piano} \quad (4.10)$$

Inoltre, data la produzione energetica attesa del piano o_{Piano} , abbiamo un vincolo che garantisce di raggiungere lo scopo prefissato:

$$\sum_{i=1}^{N_a} G_i o_i \geq o_{Piano} \quad (4.11)$$

Ad esempio in un piano energetico, il risultato desiderato potrebbe essere una maggiore disponibilità di energia in regione, così o_{Piano} sarebbe l'incremento di energia elettrica (es. in MW) e o_i sarebbe invece la produzione in MW di ogni attività i .

Per quanto riguarda gli obiettivi esistono diverse possibilità suggerite dagli esperti del settore. Da una prospettiva economica si potrebbe decidere di minimizzare il costo complessivo del piano (il quale sarebbe comunque soggetto ai vincoli sulla disponibilità finanziaria), ma chiaramente in questo caso potrebbero essere preferite le risorse energetiche più economiche, a prescindere dai loro potenziali effetti negativi sull'ambiente (nuovamente, questi potrebbero ad ogni modo essere vincolati). D'altro canto, si potrebbe fissare il budget e massimizzare invece la produzione energetica, prendendo in considerazione le risorse più efficienti. O ancora, si potrebbe decidere di realizzare un piano *verde* e tenere in considerazione i recettori ambientali, ad esempio massimizzando la qualità dell'aria, delle acque superficiali, etc. Ovviamente in casi come questo le decisioni prodotte dalla soluzione ottima prodotta dall'ottimizzatore possono essere meno intuitive e proprio in circostanze simili il modello proposto si dimostra utile, infatti la relazione tra le decisioni riguardanti le attività primarie e secondarie e le conseguenze ambientali sono estremamente complesse da calcolare manualmente. È oggetto di ricerca la possibilità di creare funzioni obiettivo ancora più complicate combinando gli aspetti accennati sopra.

Un aspetto importante da non sottovalutare durante l'ideazione di un piano regionale è la diversificazione delle fonti energetiche, cioè allocare le risorse economiche in fonti di energia diverse, sia rinnovabili che non rinnovabili, per prevenire fluttuazioni di prezzo e disponibilità. Per questo motivo è presente un vincolo sulla frazione minima F_i dell'energia totale prodotta per ogni fonte i :

$$\forall i \in A^P \quad G_i o_i \geq F_i T^0 \quad (4.12)$$

dove la produzione totale è ottenuta come:

$$T^0 = \sum_{j \in A^P} G_j o_j \quad (4.13)$$

Oltre a ciò dobbiamo considerare le caratteristiche geofisiche della regione, come ad esempio il già citato caso delle centrali idroelettriche che possono essere costruite solamente prestando molta attenzione alle conseguenze sul territorio. Possiamo quindi imporre dei vincoli che limitino la massima energia Max_i che può essere prodotta da una fonte energetica i :

$$\forall i \in A^P \quad G_i o_i \leq Max_i \quad (4.14)$$

Infine, le priorità della regione dovrebbero essere conformi alle direttive e linee guida europee, come l'iniziativa 20-20-20. Per questa ragione, possono essere imposti vincoli sulla minima quantità di energia Min_{rin} prodotta attraverso risorse rinnovabili, definendo A_{rin}^P l'insieme di attività relative, ovvero:

$$\sum_{i \in A_{rin}^P} G_i o_i \geq Min_{rin} \quad (4.15)$$

4.4 Il piano regionale 2011-2013

Il modello a vincoli descritto in precedenza in questo capitolo è stato impiegato per la pianificazione del piano energetico 2011-2013 della regione Emilia-Romagna. Questo piano aveva come scopo quello di aprire la strada per il raggiungimento dell'obiettivo del 20-20-20, in particolare ottenere il 20% dell'energia prodotta da fonti rinnovabili entro il 2020. Questo valore non si riferisce esclusivamente all'energia elettrica, ma prende in considerazione l'intero bilancio energetico della regione, includendo l'energia termica e i trasporti.

Il settore dei trasporti può usare energia rinnovabile tramite l'uso di combustibili rinnovabili, come il biogas (metano prodotto dalla fermentazione di vegetali o scarti animali) o carburanti ottenuti da varie coltivazioni. L'energia termica può essere usata ad esempio per il riscaldamento delle abitazioni e in questo caso le fonti rinnovabili includono pannelli solari termici (i quali producono acqua calda per usi domestici), pompe geotermiche (impiegate per

riscaldare o rinfrescare le case), impianti a biomassa (che producono acqua calda usata per riscaldare edifici vicini nei periodi invernali).

Nel proseguo ci concentreremo solamente sull'energia elettrica e gli impianti considerati per la produzione di energia da fonti rinnovabili sono centrali idroelettriche, impianti fotovoltaici, impianti solari termodinamici, generatori eolici e, nuovamente, centrali a biomassa. Per ogni fonte energetica il piano dovrebbe fornire:

- la potenza installata in MW;
- l'energia totale prodotta in un anno, in kTOE (TOE è un acronimo per Tonnes of Oil Equivalent, tonnellate di petrolio equivalenti);
- il costo totale in M€.

Il rapporto tra la potenza installata e l'energia totale prodotta è principalmente influenzato dalla disponibilità della risorsa: mentre una centrale a biomassa può produrre energia continuamente (almeno teoricamente), il sole è disponibile solo durante il giorno e il vento solo occasionalmente; per fonti energetiche non affidabili viene considerata una media annuale.

Il costo dell'impianto dipende invece in maniera più significativa dalla potenza installata: un impianto solare ha un costo d'installazione che dipende dalla superficie in metri quadri dei pannelli installati, i quali in cambio producono una certa potenza massima (potenza di picco).

I tecnici della regione hanno stimato (considerando i consumi di energia attuali, le previsioni di crescita, il risparmio energetico previsto) le richieste di energia complessiva per il 2020, di cui il 20% dovrà essere generato a partire da fonti rinnovabili. Per questa quantità gli esperti hanno anche proposto la percentuale da ottenere con il piano 2011-2013, ovvero circa 177kTOE di energia elettrica e 296kTOE di energia termica. A partire da questi dati hanno poi redatto un piano per le energie elettrica e termica.

Abbiamo impiegato il modello a vincoli presentato precedentemente considerando inizialmente casi "estremi", nei quali venisse usata un'unica fonte energetica. Ad esempio se imponiamo di costruire solamente impianti a biomassa il modello fornisce i risultati presentati in Tabella 4.1. Come detto in precedenza, oltre al piano viene fornita anche la valutazione ambientale.

Per meglio comprendere i contributi individuali delle varie forme di energia, in Figura 4.3 sono stati tracciati graficamente i piani che usano una

Impianti Elettrici	Potenza	Potenza	Energia	Investimenti (M€)
	2010 (MW)	2013 (MW)	2013 (kTOE)	
Idroelettrico	300	300	67.06	0
Fotovoltaico	230	230	23.73	0
Solare termodinamico	0	0	0	0
Eolico	20	20	2.58	0
Biomassa	430	724.47	436.13	1030.64
Totale	980	1274.47	529.5	1030.64

Tabella 4.1: Esempio di piano energetico per l'elettricità realizzando unicamente centrali a biomassa

singola fonte energetica e quello sviluppato dagli esperti. Sull'asse delle x è stato scelto il recettore *Qualità dell'Aria*, in quanto tra i più sensibili per la regione Emilia-Romagna, mentre nell'asse delle y è riportato il costo - i piani forniscono la stessa energia in kTOE ma richiedono l'istallazione di potenze diverse.

Notiamo subito che alcuni fonti energetiche migliorano la qualità dell'aria (valori positivi sull'asse delle x) mentre altre la peggiorano (valori negativi). Anche se, ovviamente, nessun impianto per la produzione di energia può migliorare la qualità dell'aria da solo (in quanto non può rimuovere le sostanze inquinanti dall'atmosfera), quello che accade è che gli impianti producono nuova energia elettrica senza introdurre ulteriori sostanze inquinanti, energia che, se non prodotta localmente, sarebbe dovuta essere importata da regioni vicine. In questo caso l'energia sarebbe stata prodotta sfruttando le stesse fonti energetiche della produzione nazionali, incluse quelle con emissioni inquinanti, quindi nel complesso il contributo è positivo per la qualità dell'aria. Sottolineiamo anche che diverse risorse energetiche hanno un diverso impatto sulla qualità dell'aria anche a causa della attività secondarie necessarie.

Come ulteriore considerazione, occorre osservare che i piani "estremi" generalmente non sono fattibili, poiché nel nostro caso il vincolo sulla reale disponibilità di risorse energetiche è stato rilassato. A esempio le turbine eoliche forniscono una qualità dell'aria molto buona ad un costo contenuto, ma la quantità di produzione richiesta non è possibile in regione considerando la

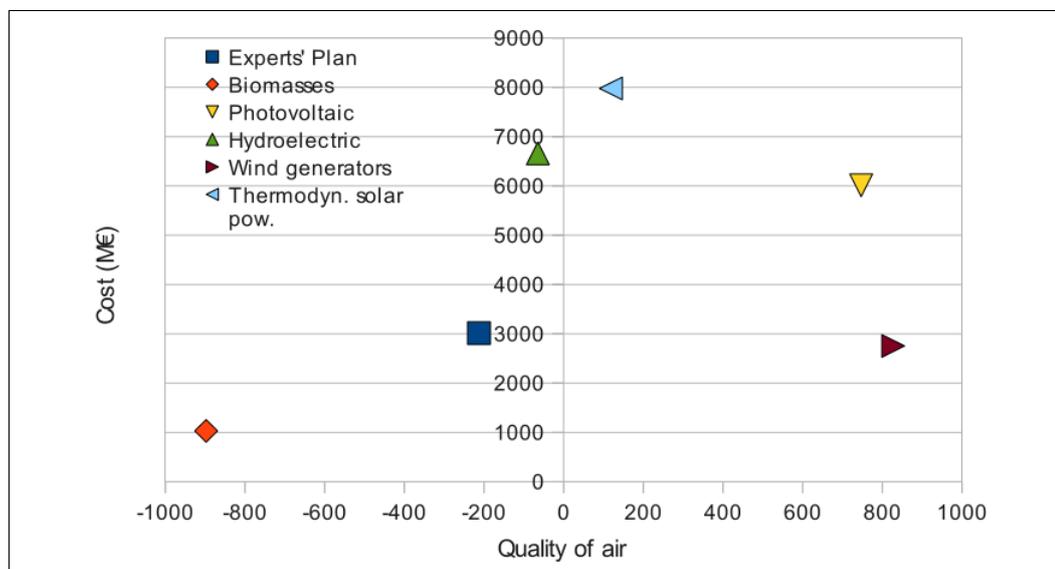


Figura 4.3: Confronto tra il piano degli esperti e quelli estremi che sfruttano un'unica risorsa energetica

presenza media del vento e la disponibilità di aeree per l'istallazione.

Il piano proposto dagli esperti è più *bilanciato*: tiene in considerazione la reale disponibilità della risorsa energetica nella regione e fornisce una combinazione di tutte le possibili fonti di energia - ciò è molto importante soprattutto per le risorse rinnovabili che spesso sono discontinue e quindi disporre di molteplici possibilità garantisce una fornitura elettrica costante e continuata.

Oltre a valutare i piani proposti dagli esperti tramite il nostro modello è stato possibile crearne di alternativi. In particolare, un piano cercato è stato quello ottimale rispetto al costo e alla qualità dell'aria. Avendo una funzione con due obiettivi abbiamo tracciato il fronte ottimo di Pareto (riprendiamo qui la figura già brevemente descritta nel capitolo sul progetto ePolicy); ogni punto del fronte è tale che non è possibile migliorare uno dei due obiettivi senza peggiorare l'altro. Nel nostro caso la qualità dell'aria non può essere migliorata senza aumentare i costi e, viceversa, non è possibile ridurre il costo senza sacrificare il recettore considerato. La frontiera di Pareto è raffigurata in Figura 4.4 insieme al piano realizzato dagli esperti. Benché questo piano sia vicino alla frontiera può comunque essere migliorato - in particolare si possono osservare sul fronte due punti che rappresentano due piani migliori,

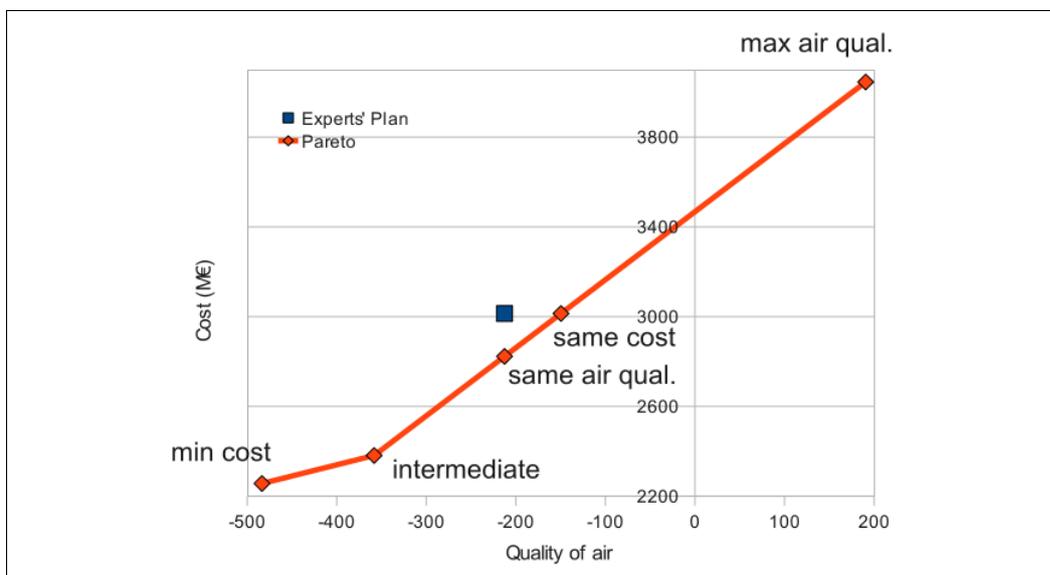


Figura 4.4: Frontiera ottima di Pareto della qualità dell'aria rispetto al costo

uno con costo uguale ma migliore qualità dell'aria, l'altro con qualità uguale ma costo minore.

Impianti Elettrici	Potenza	Potenza	Energia	Investimenti (M€)
	2010 (MW)	2013 (MW)	2013 (kTOE)	
Idroelettrico	300	310	69.3	84
Fotovoltaico	230	850	87.7	2170
Solare termodinamico	0	10	1	45
Eolico	20	80	10.3	120
Biomassa	430	600	361.2	595
Totale	980	1850	529.5	3014

Tabella 4.2: Piano energetico ideato dagli esperti

La Tabella 4.2 mostra il piano degli esperti mentre la Tabella 4.3 presenta un piano che domina quello degli esperti, con la stessa qualità dell'aria ad un costo inferiore. L'energia generata con le turbine eoliche è quasi raddoppiata (poiché forniscono un buon rapporto qualità-aria/costo, vedi Fig. 4.3), c'è un leggero incremento nella produzione da biomassa e le fonti restanti sono parzialmente ridotte di conseguenza.

Impianti Elettrici	Potenza	Potenza	Energia	Investimenti (M€)
	2010 (MW)	2013 (MW)	2013 (kTOE)	
Idroelettrico	300	303	67.74	25.2
Fotovoltaico	230	782.14	80.7	1932.51
Solare termodinamico	0	5	0.5	22.5
Eolico	20	140	18.03	240
Biomassa	430	602.23	362.54	602.8
Totale	980	1832.37	529.5	2823

Tabella 4.3: Piano energetico che domina quello degli esperti, con stessa qualità dell'aria ma costo inferiore

Per quanto riguarda la valutazione ambientale, in Figura 4.5 sono mostrati i valori dei recettori in alcuni punti significativi della frontiera di Pareto. Ogni barra rappresenta un singolo recettore ambientale per un piano specifico sul fronte di Pareto di Fig. 4.4; la barra azzurra è associata al piano che garantisce la migliore qualità dell'aria mentre le barre nei restanti colori sono associate a piani di dal costo inferiore. I recettori mostrano tendenze differenti: alcuni migliorano muovendosi lungo la frontiera verso una maggiore qualità dell'aria (come la qualità del clima, benessere della popolazione, valore dei beni materiali), mentre migliorano procedendo verso soluzioni a costo inferiore (qualità del paesaggio, benessere della fauna selvatica, qualità dei terreni). Questo fatto è dovuto a diverse ragioni, che dipendono sia dal tipo di impianto installato che dalle attività secondarie richieste.

Ad esempio le turbine eoliche hanno un buon effetto sulla qualità dell'aria ma sono al tempo stesso considerato poco piacevoli dal punto di vista estetico, quindi non possono essere installati in determinate zone sensibili, come la cima delle colline, senza dover affrontare proteste dai parte dei residenti (recettore qualità del paesaggio); sfortunatamente, colline sono anche le aree più ventose in Emilia-Romagna.

O ancora, poiché gli uccelli migratori seguono i percorsi dei venti per ridurre la fatica nei loro viaggi su lunghe distanze ma d'altro canto gli impianti eolici devono essere collocati in zone ventose per essere efficaci, si ha come conseguenza che durante la stagione delle migrazioni gli stormi rischierebbero

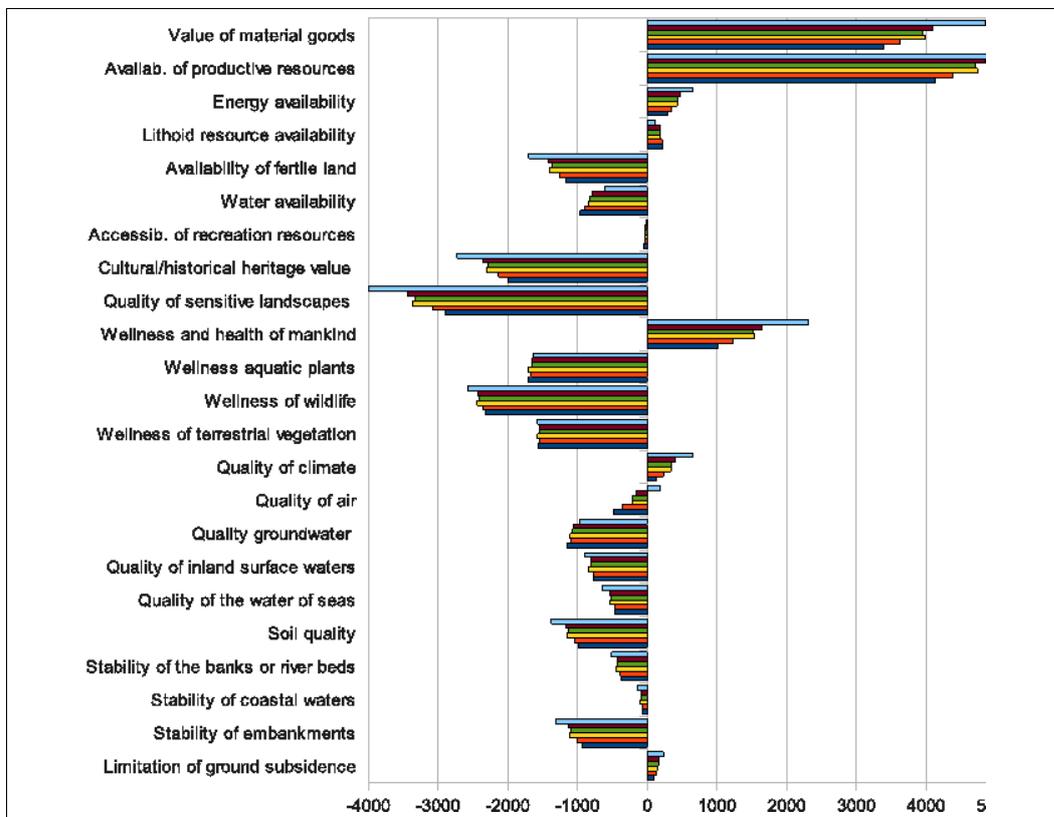


Figura 4.5: Valore dei recettori sulla frontiera di Pareto

di entrare in collisione con le grandi pale dei generatori; questo effetto non può essere ignorato, in particolare per specie a rischio (benessere della fauna selvatica).

5 | Interazione componenti

Nei capitoli precedenti abbiamo descritto gli elementi principali che concorrono a definire l'architettura del sistema ePolicy (certamente all'interno del progetto sono presenti ulteriori componenti, come quello dedicato all'opinion mining, ma in questo caso ci riferiamo a quelli considerati in questo lavoro). Da un punto di vista generale essi sono il modello a vincoli che garantisce una ottimizzazione a livello globale e il simulatore che studia il comportamento delle modalità di incentivazione a livello locale/regionale. Un aspetto molto importante è quindi capire come gestire l'interazione tra ottimizzatore e simulatore in modo ottimale, in modo da integrare le prospettive globale e locale.

Possiamo illustrare la necessità di comprendere a fondo questa interazione con un esempio. Supponiamo che la fase di ottimizzazione abbia prodotto due scenari alternativi, il primo concentrandosi sulla creazione di impianti a biomassa e il secondo sostenendo la costruzione di centrali idroelettriche; entrambi i piani avrebbero un impatto non indifferente sui cittadini. La produzione energetica con la biomassa comporta un impatto sostanziale sulle aree boschive, potenziale inquinamento del suolo e delle coltivazioni, inquinamento dell'aria nelle aree urbane vicine alla centrale; d'altra parte, le centrali idroelettriche prevedono l'allagamento vaste porzioni di territorio. In ogni caso le strategie per implementare il piano, studiate tramite il simulatore, dovrebbero tenere in considerazione questi effetti sugli individui; le attività di implementazione implicherebbero quindi costi aggiuntivi che dovrebbero essere inseriti come nuovi vincoli all'interno dell'ottimizzatore, il quale potrebbe poi effettuare nuovamente la fase di pianificazione, con la possibilità di ottenere risultati diversi.

Un approccio molto basilare sarebbe il semplice scambio di risultati tra i due livelli di pianificazione delle politiche, svolgendo anche diverse iterazioni,

ma questo metodo rischierebbe di non garantire la convergenza. A un certo punto le iterazioni possono essere fermate quando un equilibrio è stato raggiunto o quando il decisore politico valuta che ulteriori aggiustamenti non siano più necessari o richiesti. Citando Clement Attlee¹ *“Democracy means government by discussion but it is only effective if you can stop people talking.”* - democrazia significa governo fondato sulla discussione, ma funziona solamente se si riesce a far smettere la gente di discutere.

Il tema dell'integrazione efficace tra pianificazione regionale e simulazione è oggetto di intensa ricerca per ottenere una soluzione ottimale all'interno del progetto ePolicy (in modo particolare servendosi di metodologie appartenenti alla *teoria dei giochi*); nel resto del capitolo verrà mostrato un possibile approccio, da noi implementato e messo alla prova con il problema dell'assegnazione dei fondi regionali per l'incentivazione della tecnologia fotovoltaica in Emilia-Romagna.

5.1 Integrare DSS e simulazioni

Un primo approccio a cui è possibile pensare, consiste nello sfruttare i metodi e le tecniche dell'*Apprendimento Automatico* (noto in letteratura anche come *Machine Learning*), il quale rappresenta un'area dell'Intelligenza Artificiale che si occupa della realizzazione di sistemi e algoritmi che si basano su serie di osservazioni e dati per la sintesi di nuova conoscenza. Senza voler entrare nel dettaglio, possiamo comunque citare una definizione comunemente accettata di Apprendimento Automatico: *“Un programma apprende da una certa esperienza E se, con rispetto a una classe di compiti T e una misura delle prestazioni P , le prestazioni P nello svolgere un compito dell'insieme T sono migliorate dall'esperienza E ”* [41].

Nel nostro caso abbiamo sfruttato le tecniche di regressione viste nei capitoli precedenti per ricavare le relazioni che legano i fondi destinati agli incentivi regionali con la produzione elettrica di energia elettrica fotovoltaica, partendo dalle serie di dati forniti dal simulatore, affinché fosse poi possibile inserirle all'interno dell'ottimizzatore sotto forma di ulteriori vincoli, da tenere in considerazione per la fase di pianificazione. Il nostro fine è stato

¹Fonte: A. Sampson, *Anatomy of Britain*, Hodder & Stoughton, 1962

quello di estrarre dalla grande quantità di dati generata dal simulatore delle informazioni utili per migliorare il modello del problema da ottimizzare.

La Figura 5.1 mostra lo schema dell'interazione tra il livello globale e il livello locale realizzata tramite l'approccio dell'Apprendimento Automatico. Nella parte alta osserviamo il sistema di supporto alle decisioni, l'ottimizzatore, che, a fronte delle possibili decisioni (l'allocazione di risorse per lo svolgimento di attività per la produzione di energia energetica nel rispetto dei diversi vincoli), produce un piano (oppure un insieme di piani o scenari). Il modello del DSS è arricchito con i vincoli che vengono appresi nella fase di *Learning* a partire dai risultati prodotti dal simulatore; in ingresso al simulatore troviamo un insieme di piani interessanti per la relazione che stiamo tentando di apprendere - ad esempio per studiare il rapporto tra i fondi investiti nel metodo di incentivazione Conto Interessi è stato necessario effettuare simulazioni per un ampio numero di valori di budget.

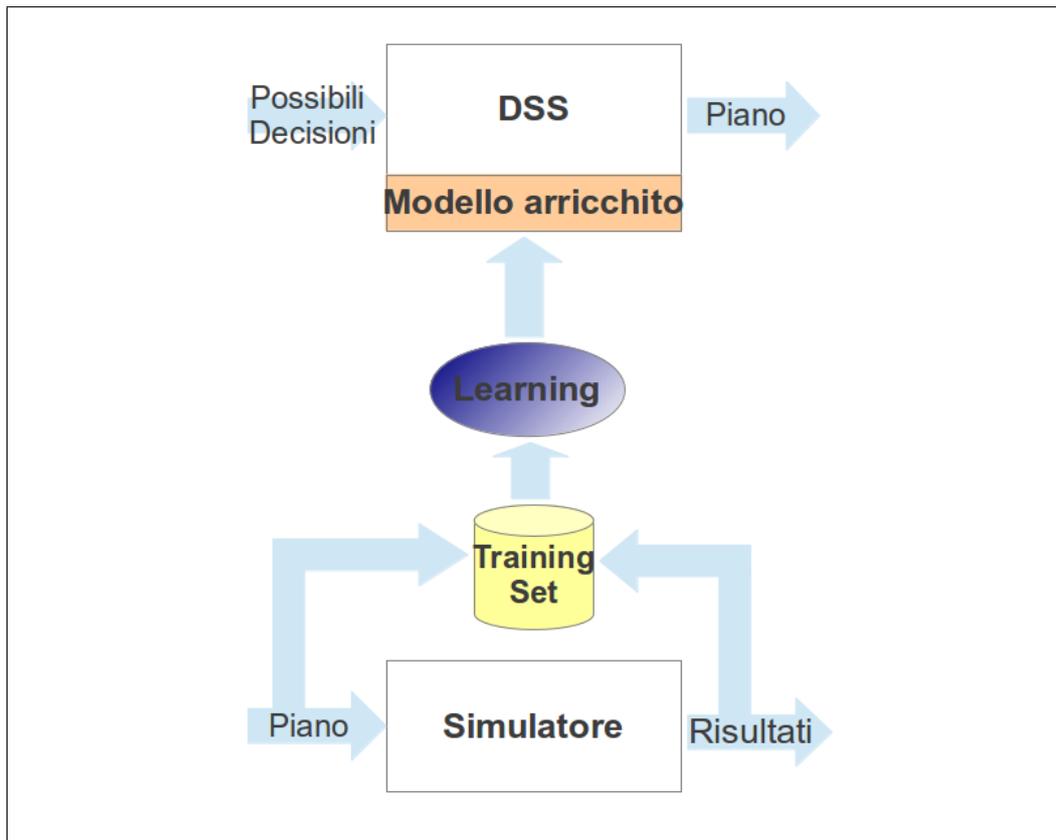


Figura 5.1: Modello di interazione basato su Apprendimento Automatico

La fase di apprendimento, e quindi le simulazioni, devono essere effettuate prima della fase di pianificazione (*offline*), in quanto occorre inserire all'interno del modello i nuovi vincoli appresi, i quali non saranno più modificati (se non nel caso in cui vengano sostituiti da altri ricavati da un nuovo processo di apprendimento). È necessario effettuare un grande numero di simulazioni per garantire un valore statistico alle relazioni apprese e fornire un buon insieme di dati tramite cui effettuare l'apprendimento; questo rappresenta sicuramente il maggiore limite di questo tipo di approccio, in quanto comporta che i vincoli appresi non possano essere modificati facilmente - effettuare un gran numero di simulazioni richiede molto tempo - e l'interazione avvenga sostanzialmente in una sola direzione, dal simulatore verso il DSS.

Una seconda metodologia per integrare ottimizzazione e simulazione da noi considerata, nonostante non sia stata concretamente implementata a differenza della prima, è una tecnica classica di decomposizione dei problemi presa in prestito dall'ambito della Ricerca Operativa, la cosiddetta *decomposizione di Benders* [12]. Essa consiste in un metodo per risolvere problemi di ottimizzazione combinatoria che possono essere scomposti in due componenti, un problema master e un sotto-problema. Originariamente era stata concepita per il campo della Programmazione Lineare Intera ma è stata in seguito estesa per trattare risolutori più generali, *Logic-Based Benders Decomposition* (decomposizione di Benders basata sulla Logica) [34].

Nel caso da noi preso in esame il problema master è la definizione del piano energetico regionale che partizioni l'energia necessaria tra le diverse fonti energetiche rinnovabili e viene risolto tramite il modello a vincoli descritto nel capitolo precedente. Il sotto-problema consiste nella definizione della strategia di incentivazione per raggiungere la produzione energetica desiderata, in modo consistente con i vincoli regionali sul budget. Partendo dalle soluzioni ottenute con l'ottimizzazione, ovvero la produzione energetica attesa, per comprendere quale sia il budget corretto da allocare per gli incentivi vengono portate a termine diverse simulazioni - in numero comunque molto inferiore rispetto all'interazione basata sull'Apprendimento Automatico. Nel caso in cui gli incentivi non siano compatibili con il budget regionale viene generato un cosiddetto *taglio di Benders* (chiamati anche *no-good*), cioè un vincolo che va ad aggiungersi al modello del problema master, e successivamente una

nuova soluzione viene generata dal DSS.

A differenza del primo metodo, con questo approccio la comunicazione tra i due componenti qui considerati viene estesa ad un ciclo, come si può facilmente notare in Figura 5.2.

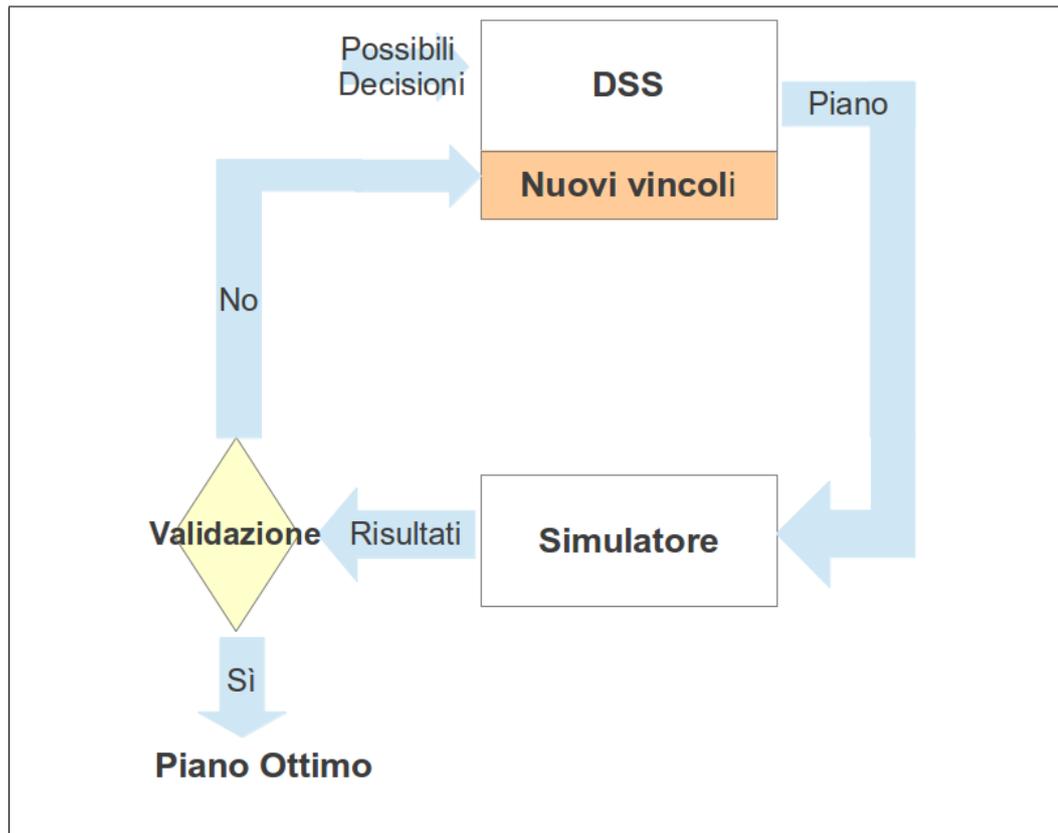


Figura 5.2: Modello di interazione basato su Decomposizione di Benders

L'interazione inizia dall'ottimizzatore che fornisce una soluzione per il problema master, soluzione che contiene la produzione energetica attesa da fotovoltaico e dei valori ipotetici della dimensione dei fondi da destinare agli incentivi regionali. Questi valori ipotetici sono passati al simulatore, il quale esegue delle simulazioni esclusivamente con tali parametri forniti dal DSS e produce le corrispondenti statistiche (il tempo di calcolo è di qualche ordine di grandezza minore rispetto all'approccio basato sull'apprendimento); queste ultime possono confermare o meno i valori ipotizzati in fase di ottimizzazione: se il valore (medio) di produzione energetica ottenuto dalle simulazioni è maggiore o uguale di quello atteso, l'iterazione può concludersi e il risultato

è probabilmente ottimale [12]. Viceversa se invece il valore atteso è maggiore di quello simulato un'altra iterazione è necessaria, quindi all'ottimizzatore è comunicato un nuovo vincolo, il quale può essere visto come spiegazione del fatto che non è possibile ottenere la produzione energetica richiesta con i fondi agli incentivi ipotizzati. A questo punto il DSS inserisce il vincolo all'interno del modello del problema, ricerca nuovamente una soluzione ottimale e ipotizza nuovi valori da fornire in input al simulatore.

La sfida principale consiste nel determinare l'insieme dei vincoli che vengono trasferiti tra le due componenti: se venissero esclusi dall'insieme dei valori ammissibili solamente quelli ipotizzati - e trovati non adatti grazie alle simulazioni - si correrebbe il rischio di effettuare troppe iterazioni, arrivando al caso limite di effettuare una simulazione esaustiva per tutti i parametri (in pratica verrebbero nuovamente fatte delle simulazioni per ogni valore del budget per gli incentivi regionali); se invece dall'insieme dei valori venissero esclusi (troppi) valori ulteriori il pericolo sarebbe quello di scartare delle soluzioni promettenti. Questo tema e l'implementazione effettiva di questo secondo approccio sono attualmente oggetto di ricerca.

5.2 Regressione lineare a tratti

Passiamo ora a discutere del modo in cui l'approccio basato sull'Apprendimento Automatico sia stato implementato nel nostro modello a vincoli.

Come è stato descritto nel terzo capitolo, tramite un grande numero di simulazioni è stato possibile ottenere una grande quantità di dati dalla quale abbiamo successivamente ricavato le relazioni che legano i fondi per gli incentivi regionale alla produzione energetica da fotovoltaico e quest'ultima alla forza dell'interazione sociale tra gli agenti. Tali relazioni sono state espresse sotto forma di funzioni e corrispondenti curve, ottenute attraverso l'applicazione di tecniche di regressione. A questo punto la nostra intenzione è stata quella di integrare queste funzioni all'interno modello a vincoli del problema di ottimizzazione, aggiungendo cioè i nuovi vincoli appresi grazie alle simulazioni svolte; è sorto quindi un problema, poiché, come descritto nel capitolo precedente, il risolutore dai noi utilizzato l'ottimizzazione gestisce esclusivamente equazioni lineari - per motivi di efficienza. Dal momento che

modificare questa caratteristica, ovvero impiegare un risolutore in grado di trattare le funzioni quadratiche e di grado anche superiore ricavate dalla regressione, avrebbe richiesto cambiamenti radicali nella struttura generale e nel codice dell'ottimizzatore, abbiamo ritenuto che fosse meglio procedere in un altro modo, che ci consentisse di preservare la linearità del modello a vincoli sviluppato. Per questo motivo abbiamo deciso di tentare di rendere lineari le relazioni ottenute con la regressione sfruttando una tecnica matematica definita *approssimazione lineare a tratti* [16, 17] (dall'inglese, *piece-wise linear approximation*), che consiste nell'approssimare un'arbitraria funzione con un insieme di equazioni lineari con la massima accuratezza possibile. Possiamo ad esempio osservare in Figura 5.3 l'approssimazione di una semplice funzione quadratica (in blu) attraverso cinque funzioni lineari (in rosso).

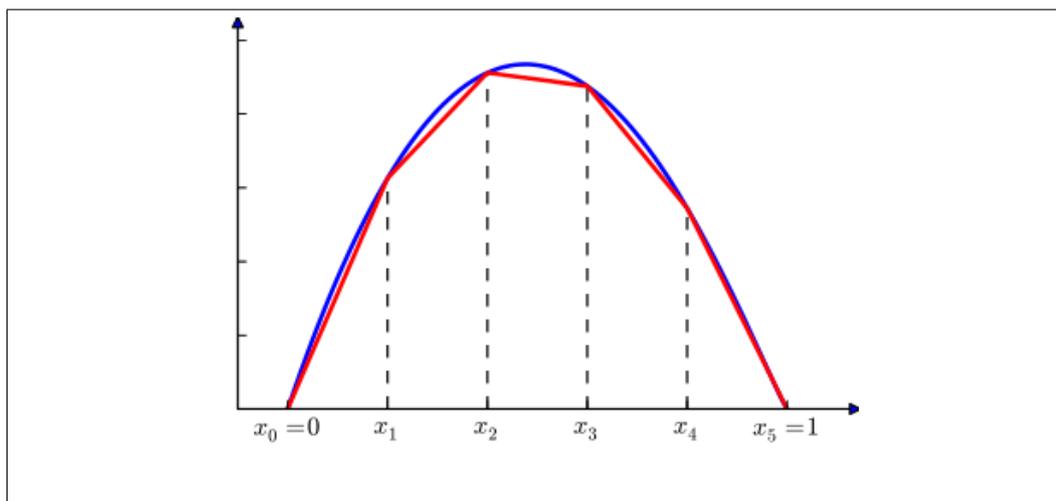


Figura 5.3: Una funzione (in blu) e la sua approssimazione lineare a tratti (in rosso). Fonte http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Finite_element_method_1D_illustration1.svg

Illustreremo adesso il funzionamento di questo metodo. Data una funzione (anche non lineare) $y = f(x)$, campioniamo la curva g in k punti x_1, \dots, x_k e l'approssimazione lineare a tratti $y' = g'(x) \simeq g(x)$ è definita come

$$x = \sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot x_i, \quad (5.1)$$

$$y = \sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot y_i, \quad (5.2)$$

dove $\lambda_i \in [0..1]$ sono variabili continue soggette ai vincoli:

$$\sum_{i=1}^k \lambda_i = 1 \quad (5.3)$$

Al massimo due λ_i possono essere diverse da zero e in tal caso queste devono essere adiacenti.

Chiaramente queste ultime due condizioni non sono lineari, ma potrebbero essere modellate in un problema di Programmazione Logica Intera introducendo nuove 0-1 variabili intere, ma esiste una opzione più efficiente. In molti risolutori - compreso quello da noi impiegato - è possibile dichiarare $(\lambda_1, \dots, \lambda_k)$ come Special Order Set del secondo tipo (SOS2) [11], cioè un insieme ordinato di variabili utilizzato per specificare determinate condizioni in problemi di ottimizzazione, e il risolutore sfrutterà questa informazione per ricercare una soluzione ottimale in modo più efficiente (in pratica, sapere che una variabile appartiene ad un certo insieme ordinato consente di usare in modo più intelligente gli algoritmi di branch-and-bound del solver).

5.2.1 Implementazione in R

Le informazioni necessarie per poter inserire le equazioni (5.1), (5.2) e (5.3) all'interno del modello a vincoli sono le coordinate dei punti di campionamento. Per trovarle ci siamo serviti del precedentemente introdotto R e in particolare del pacchetto software *Segmented* [42]. Grazie ad esso è stato molto semplice trovare un'ottima approssimazione lineare per le funzioni che legavano il budget alla produzione energetica (una per ogni tipo di incentivo), come si può facilmente osservare nel codice qui presentato.

```

1 > library(segmented)
2 > # ...
3 > # inserisci i dati delle simulazioni in apposite strutture
4 > # ...
5 > # operazioni varie (ordina dati, etc.)
6 > # ...

```

```

7 > # estrai un modello lineare a tratti per l'incentivo Conto
  Interessi
8 > modelloLineareATratti_CI <- segmented(modeloGrezzo_CI, seg.Z=~
  Budget , psi=c(3))
9 > # estrai un modello lineare a tratti per l'incentivo Fondo
  Garanzia
10 > modelloLineareATratti_FG <- segmented(modeloGrezzo_FG, seg.Z=~
  Budget , psi=c(12,30))
11 > # ...
12 > # incentivi restanti
13 > # ...

```

Una volta ricavate le approssimazioni lineari a tratti delle funzioni, è possibile visualizzare il risultato ottenuto, come riportato in Figura 5.4.

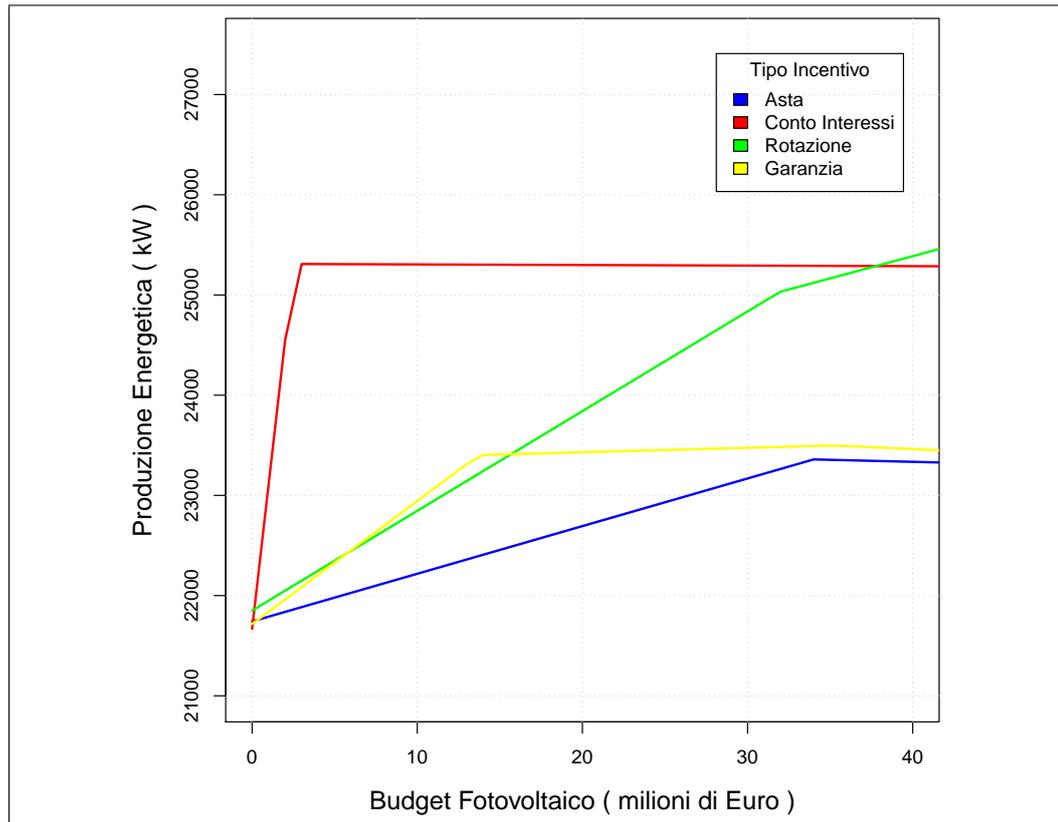


Figura 5.4: Confronto tra i diversi incentivi - Approssimazione lineare a tratti

5.3 Integrazione modello

Possiamo ora descrivere in che modo abbiamo inserito le relazioni approssimate all'interno del modello a vincoli dell'ottimizzatore. In particolare mostreremo quali estensioni siano state aggiunte al modello per permettere al risolutore di calcolare l'assegnazione ottima dei fondi disponibili ai vari tipi di incentivo, con lo scopo di massimizzare la produzione di energia.

5.3.1 Variabili

Innanzitutto per ogni tipologia di incentivo regionale sono state introdotte due variabili che rappresentano il costo associato e la relativa produzione energetica. Per i costi le variabili sono chiamate $costo_A$, $costo_{CI}$, $costo_R$, $costo_G$, con $costo_j \in [0..50]$ (dominio espresso in milioni di euro) - rispettivamente incentivo in conto capitale (denominato in precedenza anche Fondo Asta), Conto Interessi, Fondo Rotazione e Fondo Garanzia. In modo simile, alle produzioni energetiche garantite dagli incentivi abbiamo associato delle variabili chiamate $prod_A$, $prod_{CI}$, $prod_R$, $prod_G$, con $prod_j \in [0..10]$ (dominio espresso in MWatt); il codice relativo alla creazione di tali variabili è qui riportato.

```

1 %creazione istanza eplex
2 :- eplex_instance(eplex_instance).
3
4 %predicato che modella il problema dell'assegnazione ottimale dei
5   fondi agli incentivi regionali
6 assegna_fondi(...):-
7   %crea le variabili per i costi (una per ogni tipo di incentivo
8     specificato nella lista TipiInc)
9   crea_var_names(TipiInc, Costi, 0, 50),
10  %crea le variabili per le produzioni
11  crea_var_names(TipiInc, Prods, 0, 60),
12  ...

```

Occorre fare subito un'importante precisazione, ovvero spiegare che per produzione energetica associata ad ogni metodologia incentivante abbiamo in questo caso inteso la produzione di energia non in termini assoluti, bensì la differenza (aumento) di produzione energetica che si ottiene finanziando

un tipo di incentivo rispetto al caso in cui nessun meccanismo incentivante sia supportato (il valore di produzione energetica associato a nessuna incentivazione è definito dalla costante PR_{base}). Questa scelta è stata dettata dal fatto che in questa maniera fosse molto facile valutare il guadagno in termini di produzione offerto dai diversi incentivi.

Abbiamo poi introdotto le variabili ausiliarie necessarie all'approssimazione lineare chiamate λ_i nell'equazione (5.3) e ugualmente nominate all'interno del problema e sempre con $\lambda_i \in [0..1]$; per ciascun tipo di incentivo e per ogni punto scelto per la campionatura sulle curve budget-produzione è stata introdotta una variabile ausiliaria λ_{ji} , con j indice per il tipo di incentivo e i per il punto campionato. Come scelta iniziale i punti utilizzati per la campionatura sono il minor numero possibile tramite cui rappresentare correttamente la funzione approssimata, cioè i punti in cui si osserva un cambiamento del gradiente della curva; in particolare abbiamo usato tre punti per gli incentivi Fondo Asta, Conto Interessi e Fondo Rotazione e quattro per il Fondo Garanzia. Per maggiore precisione, osserviamo che le coordinate dei punti per la campionatura sono quelle ricavate tramite le semplici righe di codice scritte in R e descritte nella sezione precedente.

5.3.2 Vincoli

Dopo le variabili occorre esprimere i vincoli che consentono di modellare il problema. Come prima cosa è necessario trasporre sotto forma di vincoli le equazioni descritte in precedenza (5.1), (5.2) e (5.3), utilizzate per approssimare le curve delle relazioni con delle funzioni lineari a tratti; nell'equazione 5.5 il termine $y_{ji} - PR_{base}$ serve per calcolare la differenza di produzione energetica rispetto al caso di nessun incentivo.

Per chiarezza ricordiamo che gli indici j e i selezionano rispettivamente metodo incentivante e punto di campionamento e quindi nei vincoli 5.4, 5.5 e 5.6 si ha $j \in [1..4]$.

$$costo_j = \sum_{i=1}^k \lambda_{ji} \cdot x_{ji} \quad (5.4)$$

$$prod_j = \sum_{i=1}^k \lambda_{ji} \cdot (y_{ji} - PR_{base}) \quad (5.5)$$

$$\sum_{i=1}^k \lambda_{ji} \leq 1 \quad (5.6)$$

Nel codice seguente è mostrata la creazione delle variabili ausiliarie e l'imposizione di questi vincoli.

```

1 %predicato che modella l'approssimazione lineare a tratti
2 %viene invocato da assegna_fondi tante volte quanti sono i tipi
  di incentivo
3 piecewise_linear_model(TipoIncentivo , Costo_inc , Prod_inc ):-
4   %creo tante variabili ausiliarie quanti sono i punti che
    caratterizzano l'incentivo
5   crea_var_sub (Punti , Auxs , 0 , 1) ,
6   ...
7   %vincoli per le variabili ausiliarie
8   eplex_instance : (sum(Auxs) $=<= 1) ,
9   eplex_instance : (Costo_inc $= (Auxs*Xs) ) ,
10  eplex_instance : (Prod_inc $= (Auxs*YsSub) ) ,
11  ...

```

A questo punto le funzioni approssimate (quelle rappresentate in Fig. 5.4) sono state inserite all'interno del modello e il passo successivo consiste nello sfruttamento di questa conoscenza per la ricerca della distribuzione ottimale dei fondi da parte del risolutore del problema.

Per questo motivo, imponiamo che la somma dei costi dei vari incentivi sia minore del budget totale dedicato agli incentivi regionali per l'energia fotovoltaica, indicato dalla costante $BUDGET_{PV}$.

$$\sum_{j=1}^4 costo_j \leq BUDGET_{PV} \quad (5.7)$$

In un secondo momento, specifichiamo la funzione obiettivo fornita al risolutore del problema a vincoli, il quale dovrà di massimizzare la produzione energetica assegnando il budget disponibile ai vari incentivi nel modo più efficace possibile.

$$\max\left(\sum_{j=1}^4 prod_j\right) \quad (5.8)$$

Riportiamo quindi l'implementazione.

```

1  (assegna_fondi)
2  ...
3  %la somma dei fondi assegnati ad ogni incentivo deve essere
   minore del budget per il PV
4  eplex_instance:(sum(Costi) $=< BudgetPV ),
5  %inserisco in liste apposite le variabili ausiliarie che devono
   formare SOS2 (un SOS2 per tipo di incentivo)
6  get_aux_sos(Auxs,AuxA,AuxCI,AuxR,AuxG,"A"),
7  %la funzione obiettivo cerca di massimizzare la produzione
   energetica
8  eplex_instance:(VarObiettivo $= (sum(Prods))),
9  %inizializzo il solver con la funzione obiettivo specificata
   indicando anche di sfruttare SOS2 per la risoluzione
   ottimizzata
10 eplex_instance:eplex_solver_setup(max(sum(Outs)),VarObiettivo
   ,[...],[...]),
11 ...

```

5.4 Assegnazione fondi

Per valutare ora l'interazione tra il DSS e il simulatore analizzeremo ora in che modo vengono finanziati le diverse tipologie di incentivazione sulla base del problema a vincoli presentato in precedenza.

Per come il sotto-problema dell'assegnazione dei fondi è stato definito, il risolutore procede distribuendo i fondi a partire dall'incentivo che risulta essere più efficace e prosegue poi finanziando gli incentivi restanti fino a esaurimento del budget previsto. Per determinare quale sia il tipo di incentivo più efficace vengono sfruttate le funzioni lineari a tratti che approssimano le relazioni tra budget e produzione energetica. In Figura 5.5 osserviamo un esempio di distribuzione dei fondi, con un budget pari a dodici milioni di euro: le quattro funzioni lineari a tratti sono le relazioni inserite all'interno del modello e i punti individuati su di esse rappresentano le combinazioni di spesa (la spesa viene mostrata sull'asse delle ascisse) migliori dal punto di vista della produzione (asse delle ordinate); ad esempio, notiamo come la massima produzione energetica possibile per il Conto Interessi (in rosso) sia

raggiunta con una spesa relativamente contenuta e minore del budget totale, consentendo di distribuire i fondi rimanenti ad altri tipi di incentivo.

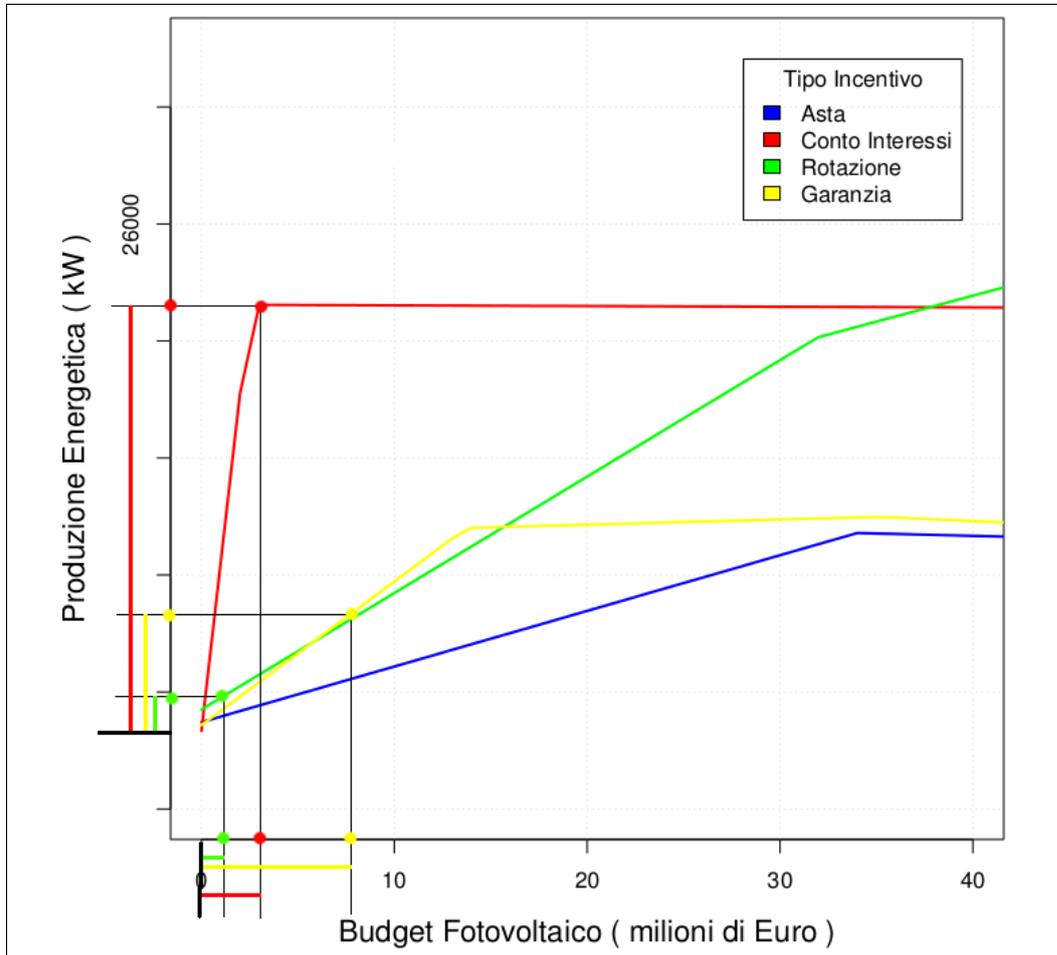


Figura 5.5: Assegnazione Fondi - Budget €12M

Nelle tabelle seguenti sarà mostrato in che modo vengono assegnati i fondi ai vari incentivi a partire da un determinato budget, evidenziando anche l'aumento di produzione energetica ottenibile rispetto al caso in cui nessun incentivo venga finanziato; per avere un riferimento ricordiamo che nel nostro simulatore, quindi non adeguatamente scalato, il valore di produzione energetica ottenibile in assenza di meccanismi incentivanti è di circa 21.664MW. Ricordiamo inoltre che, per come è stato progettato il simulatore, il budget destinato agli incentivi è distribuito lungo un arco temporale quinquennale.

Fondo incentivi – €2.5M

Con questo fondo per gli incentivi viene finanziato totalmente il Conto Interessi consumando interamente il budget disponibile, impedendo quindi di stanziare fondi anche agli altri incentivi, e ottenendo un aumento di produzione energetica di 3.563MW.

<i>Tipologia Incentivo</i>	<i>Costo (M€)</i>	<i>Produzione Energetica Differenziale(MW)</i>
Asta	0.00	0.000
Conto Interessi	2.50	3.563
Rotazione	0.00	0.000
Garanzia	0.00	0.000
Totale	2.50	3.563

Tabella 5.1: Assegnazione Fondi - €2.5M

Fondo incentivi – €5M

In questo caso è possibile finanziare interamente il Conto Interessi (il quale, come atteso, richiede decisamente meno risorse degli altri, ovvero potendo essere completamente soddisfatto con 2.53 milioni di euro) e distribuire il budget restante agli incentivi Fondo Rotazione e Garanzia, ottenendo così un miglioramento della produzione energetica di 4.121MW.

<i>Tipologia Incentivo</i>	<i>Costo (M€)</i>	<i>Produzione Energetica Differenziale(MW)</i>
Asta	0.00	0.000
Conto Interessi	2.53	3.606
Rotazione	1.00	0.286
Garanzia	1.00	0.170
Totale	5.00	4.121

Tabella 5.2: Assegnazione Fondi - €5M

Fondo incentivi – €10M

Con un ulteriore aumento del budget l'assegnazione dei fondi ottimale prevede di distribuire prima al Conto Interessi seguito sempre dai Fondi Garanzia e Rotazione, ottenendo un incremento della produzione energetica pari a 4.708MW; in realtà il scendo miglior incentivo è il Fondo Garanzia e quindi esso riceve finanziamenti maggiori rispetto al Rotazione, a quest'ultimo viene comunque assegnato un budget di un milione di euro (anche nel caso precedente) in quanto, per come sono stati campionati i punti che definiscono l'approssimazione lineare a tratti, a tale budget è associata una produzione energetica migliore rispetto a quella del Fondo Garanzia.

<i>Tipologia Incentivo</i>	<i>Costo (M€)</i>	<i>Produzione Energetica Differenziale(MW)</i>
Asta	0.00	0.000
Conto Interessi	2.53	3.606
Rotazione	1.00	0.286
Garanzia	6.47	0.816
Totale	10.00	4.708

Tabella 5.3: Assegnazione Fondi - €10M

Fondo incentivi – €15M

Aumentando i fondi stanziati dalla regione di altri cinque milioni, si ottiene come risultato la distribuzione dei finanziamenti aggiuntivi esclusivamente al Fondo Garanzia, mentre per le restanti tipologie di incentivo sono previste le stesse spese del caso di budget pari a dieci milioni; ad ogni modo, con un fondo per l'incentivazione di quindici milioni di euro l'incremento della produzione energetica è di 5.34MW.

Fondo incentivi – €20M

Con un budget di venti milioni di euro notiamo due differenze.

<i>Tipologia Incentivo</i>	<i>Costo (M€)</i>	<i>Produzione Energetica Differenziale(MW)</i>
Asta	0.00	0.000
Conto Interessi	2.53	3.606
Rotazione	1.00	0.286
Garanzia	11.47	1.447
Totale	10.00	5.340

Tabella 5.4: Assegnazione Fondi - €15M

La prima è che dopo aver assegnato circa 13 milioni e mezzo al Fondo Garanzia diventa più utile destinare i fondi rimanenti al Fondo Rotazione, ricavando un aumento della produzione di 5.923MW; questo accade perché in corrispondenza di quel budget la pendenza della curva che descrive l'incentivo Fondo Garanzia diminuisce sensibilmente (Fig. 5.4), rendendo quindi l'incentivo meno efficace in confronto al Fondo Rotazione.

La seconda differenza è che conviene anche destinare una minima parte (un milione di euro) del budget anche al Fondo Asta e questo è probabilmente dovuto nuovamente al modo in cui sono stati campionati i punti per l'approssimazione.

<i>Tipologia Incentivo</i>	<i>Costo (M€)</i>	<i>Produzione Energetica Differenziale(MW)</i>
Asta	1.00	0.125
Conto Interessi	2.53	3.606
Rotazione	2.73	0.458
Garanzia	13.74	1.734
Totale	20.00	5.923

Tabella 5.5: Assegnazione Fondi - €20M

Fondo incentivi – €40M

Con un budget di 40 milioni di euro i risultati sono molto simili al caso precedente, con la differenza che i maggiori finanziamenti disponibili vengono

interamente indirizzati al Fondo Rotazione, poichè il Conto Interessi è in grado di rendere al massimo anche con una spesa minima e il Fondo Garanzia diventa meno efficace con budget maggiori di 13 milioni e mezzo di euro (come anche il Fondo Asta con qualsiasi budget); l'incremento di produzione energetica rispetto alla mancanza di metodologie incentivanti è di 7.913MW.

<i>Tipologia Incentivo</i>	<i>Costo (M€)</i>	<i>Produzione Energetica Differenziale(MW)</i>
Asta	1.00	0.125
Conto Interessi	2.53	3.606
Rotazione	22.73	2.448
Garanzia	13.74	1.734
Totale	40.00	7.913

Tabella 5.6: Assegnazione Fondi - €40M

Conclusioni

In questo lavoro abbiamo considerato le problematiche relative alla realizzazione di un sistema per il supporto alle decisioni in grado di fornire ausilio ai decisori politici nel loro compito di effettuare scelte e prendere decisioni per conseguire determinati obiettivi, nel rispetto dei vincoli economici, ambientali e sociali. Il nostro scopo principale è stato quindi quello di ideare tecniche e metodologie (provenienti anche da diversi ambiti di ricerca) con le quali fosse possibile affrontare in modo efficace le sfide poste durante la pianificazione e implementazione delle politiche, fornendo al tempo stesso uno strumento informatico che potesse essere utilizzato dai decisori politici stessi.

Muovendoci all'interno dell'ambito del progetto europeo e-Policy, ci siamo occupati in particolare di studiare il comportamento di cittadini e imprenditori ai quali fossero offerti diversi strumenti incentivanti per la produzione di energia elettrica attraverso l'impiego di impianti fotovoltaici; questo studio è stato effettuato implementando un simulatore ad agenti in grado di ricreare la prospettiva economica e sociale dei singoli investitori e osservandone poi l'evoluzione nell'arco di un periodo temporale significativo. Accanto a questo primo elemento, un altro obiettivo raggiunto è stata la realizzazione di un modello matematico, sulla base del paradigma della programmazione a vincoli, tramite il quale fosse possibile ideare un piano energetico per la regione Emilia-Romagna. Il terzo aspetto su cui ci siamo concentrati è costituito dall'interazione tra le due componenti appena citate, ovvero abbiamo fatto in modo che dai risultati ottenuti tramite il simulatore potessero essere ricavate delle informazioni con le quali fosse possibile estendere e arricchire il modello a vincoli iniziale, garantendo quindi un'integrazione tra il livello globale considerato dalla fase di ottimizzazione e quello locale (cioè basato sul comportamento dei singoli individui/agenti) delle simulazioni.

I risultati principali che abbiamo ottenuto con questo lavoro sono stati:

- l'analisi dettagliata e rigorosa delle relazioni tra le variabili in gioco all'interno del simulatore, che ci ha permesso di comprendere in che modo i cambiamenti di parametri come la disponibilità di fondi per i meccanismi incentivanti abbiano ripercussioni sul comportamento degli agenti;
- l'apprendimento di vincoli in grado di esprimere tali relazioni e l'inserimento di tali vincoli all'interno del modello matematico che si occupa della pianificazione regionale, consentendo così alle varie componenti del sistema di supporto alle decisioni di interagire in modo efficace.

Nonostante il fatto che gli scopi che ci fossimo prefissati siano stati raggiunti, il sistema sviluppato presenta certamente ancora qualche limite ed è suscettibile a diversi tipi di miglioramento prima di diventare uno strumento completo e pienamente sfruttabile dai decisori politici per la loro attività, infatti la ricerca prosegue in tutti gli ambiti coinvolti nel progetto e-Policy. Passiamo ora a illustrare possibili limiti e sviluppi futuri per le parti pertinenti a questo lavoro.

In primo luogo è utile sottolineare nuovamente che il simulatore implementato presenta al suo interno diverse assunzioni e approssimazioni effettuate per semplificarne l'implementazione e, pur consentendo al tempo stesso di effettuare uno studio accurato delle proprietà interessanti nell'ambito di questo lavoro, sarà quindi necessario migliorarlo. La direzione da seguire è quella di renderlo più realistico (potenziare la fase di valutazione di fattibilità degli investimenti compiuta dagli agenti), estenderlo affinché rifletta in maniera più accurata le dinamiche della società modellata (interazione sociale più realistica) e consenta di valutare il comportamento di ulteriori metodologie di incentivazione (implementare un meccanismo ad asta), modificarne i parametri in modo che produca in uscita valori "reali" (ad esempio la produzione energetica totale ottenuta da energia fotovoltaica è ora nell'ordine di grandezza di poche decine di MW, mentre nella realtà per la regione dell'Emilia-Romagna le grandezze in gioco siano più verso le centinaia di MW). Sempre per quanto riguarda il simulatore, una modifica molto im-

portante sarà quella di consentire di simulare la presenza contemporanea di diversi meccanismi incentivanti, per osservare come le reciproche interazioni possano influenzare il risultato finale.

Un altro aspetto molto importante su cui sarà utile intervenire è quello riguardante le interazioni tra le componenti del sistema e-Policy, con un riferimento particolare al rapporto tra la fase di ottimizzazione e il simulatore. Come già accennato nel quinto capitolo, l'integrazione di queste componenti può essere ottenuta attraverso diverse tecniche, delle quali solamente una è stata concretamente implementata in questo lavoro. Da ciò segue che possibili sviluppi futuri dovrebbero andare nella direzione di sperimentare metodologie diverse per conseguire un'interazione efficiente e suggeriamo che l'impiego di metodi provenienti da molteplici aree di ricerca potrebbe portare quasi sicuramente vantaggi per affrontare questa sfida.

Questo approccio multidisciplinare appena citato è forse una delle aspetti più importanti a caratterizzare il progetto e-Policy (sicuramente un elemento che, parlando a titolo personale, ha reso più interessante e affascinante affrontare le sfide presentateci), poiché, come abbiamo visto, realizzare un sistema in grado di fornire supporto alle decisioni in un settore altamente complesso come l'ideazione e l'implementazione delle politiche, è un compito che richiede l'utilizzo di molteplici competenze, tecniche e strumenti proprio a causa della natura intrinsecamente complessa della materia trattata.

A | Esempi di CLP

Illustreremo ora due esempi di modellazione di problemi a vincoli sfruttando il linguaggio ECLⁱPS^e (nel primo caso considerando domini finiti e nel secondo valori reali, avvalendoci anche della libreria Eplex), per mostrare come possono essere strutturati i problemi di programmazione logica a vincoli; in questa trattazione supporremo noti i concetti elementari della programmazione logica (procedimenti risolutivi, definizioni di un termine, etc.), la cui discussione esula da questo lavoro.

Esempio CLP(\mathcal{FD})

Il cosiddetto *Send More Money* puzzle è un esempio classico di programmazione a vincoli; le variabili $[S, E, N, D, M, O, R, Y]$ rappresentano cifre da 0 a 9 e lo scopo è assegnare alle variabili valori diversi in modo che l'operazione aritmetica di Figura A.1 risulti corretta - inoltre i numeri devono essere ben formati, da cui $S > 0$ e $M > 0$.

	S	E	N	D
+	M	O	R	E
M	O	N	E	Y

Figura A.1: *Send More Money* puzzle

Con la programmazione convenzionale si avrebbe necessità di esprimere una strategia di ricerca in modo esplicito (senza contare possibili ottimizzazioni come cicli innestati), mentre con linguaggi logici come Prolog verrebbe sfruttata la ricerca fornita dal risolutore interno (il motore inferenziale), con il vantaggio di una programmazione estremamente facilitata ma col ri-

schio di un'efficienza non elevata - a meno di programmi ottimizzati, i quali richiederebbero comunque maggiori tempo e abilità.

Questo è in effetti il campo di applicazione ideale della programmazione logica a vincoli, in particolare nell'ambito dei domini finiti $CLP(\mathcal{FD})$: le variabili possono assumere valori appartenenti ad un insieme finito di numeri interi, i vincoli sono facilmente esprimibili formalmente e occorre effettuare una certa quantità di ricerca nello spazio delle soluzioni. In questo problema sarebbe naturale usare le variabili del programma per rappresentare le diverse cifre e la soluzione finale dovrà essere un assegnamento di un valore unico per ogni variabile.

Risolvere questo problema con Prolog comporta l'utilizzo della strategia di ricerca chiamata *Generate and Test*, che prevede che prima la generazione di una soluzione e poi la verifica della consistenza dei vincoli e, nel caso che questa dia esito negativo, l'assegnamento di nuovi valori alle variabili seguita da nuova verifica e così via. In questo modo l'esplorazione dello spazio delle soluzioni è chiaramente inefficiente - per esempio la possibile implementazione in Prolog mostrata qui sotto, per quanto suscettibile a miglioramenti, deve gestire $\frac{10!}{2}$ possibili assegnamenti di valori alle variabili.

```

1 % Send More Money puzzle in Prolog
2 smm :-
3     X = [S,E,N,D,M,O,R,Y],           % variabili
4     Digits = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9], % domini
5
6     % predicato che assegna una soluzione
7     assign_digits(X, Digits),
8
9     % verifica dei vincoli vincoli
10    M > 0,
11    S > 0,
12    1000*S + 100*E + 10*N + D +
13    1000*M + 100*O + 10*R + E ==
14    10000*M + 1000*O + 100*N + 10*E + Y,
15    write(X).
16
17 select(X, [X|R], R).
18 select(X, [Y|Xs], [Y|Ys]):- select(X, Xs, Ys).
19

```

```

20 assign_digits([], _List).
21 assign_digits([D|Ds], List):-
22     select(D, List, NewList),
23     assign_digits(Ds, NewList).

```

L'implementazione realizzata con ECLⁱPS^e presenta i vantaggi di semplificare ulteriormente la modellazione del problema e di appoggiarsi all'efficiente risolutore interno per l'esplorazione dello spazio delle soluzioni, in modo particolare il fatto che ogni volta che una variabile viene istanziata i vincoli vengono propagati per eliminare a priori strade inconsistenti, riducendo gli spazi delle soluzioni e prevenendo fallimenti sicuri.

```

1 % Send More Money puzzle in ECLiPSe
2 smm :-
3     X = [S,E,N,D,M,O,R,Y], % variabili
4     X :: [0 .. 9], % domini finiti
5
6     % vincoli
7     M #> 0,
8     S #> 0,
9
10     1000*S + 100*E + 10*N + D +
11     1000*M + 100*O + 10*R + E #=
12     10000*M + 1000*O + 100*N + 10*E + Y,
13     alldistinct(X),
14
15     % ricerca della soluzione
16     labeling(X),
17     write(X).

```

Esempio CLP(\mathcal{R})- Eplex

Presentiamo ora un esempio di un problema (Fig. A.2) che rientra nell'ambito dei CLP(\mathcal{R}) e che fa uso della libreria Eplex, tratto dal manuale di ECLⁱPS^e [19]. Ci sono tre impianti, o fabbriche, (1-3) in grado di produrre un certo prodotto con capacità diverse e i cui prodotti devono essere trasportati a quattro clienti (A-D) con quantità richieste diverse; anche il costo unitario di trasporto ai clienti è variabile. L'obiettivo del problema è minimizzare i costi di trasporto soddisfacendo le esigenze dei clienti.

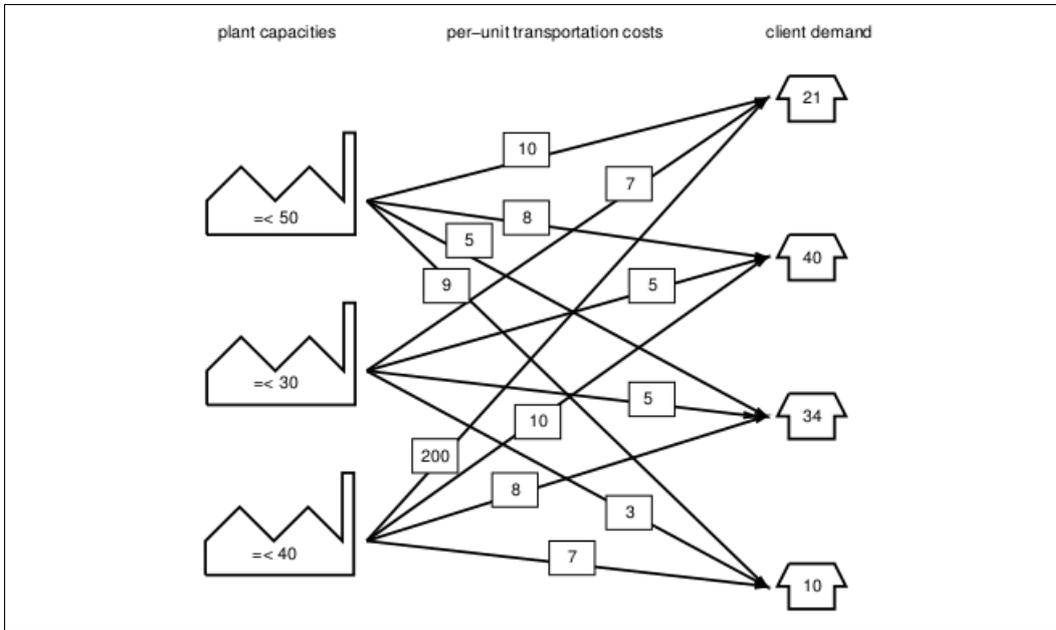


Figura A.2: Esempio di un problema CLP(\mathcal{R}). Fonte [19]

Per formulare il problema definiamo la quantità di prodotto trasportata dall'impianto N al cliente p come variabile N_p - ad esempio A_1 rappresenta il costo di trasporto dalla fabbrica A al cliente 1. I vincoli da considerare sono di due tipi (sempre facendo riferimento alla Figura A.2):

- La quantità di prodotto consegnata da tutti gli impianti a un cliente deve essere uguale alla domanda del cliente, ad esempio per il cliente A che può essere rifornito dagli impianti 1-3, abbiamo che $A_1 + A_2 + A_3 = 21$
- La quantità di prodotto in uscita da una fabbrica non può essere superiore alla sua capacità produttiva, ad esempio per l'impianto 1 che invia prodotti ai clienti A-D si ha che $A_1 + B_1 + C_1 + D_1 \leq 50$

Poiché lo scopo è minimizzare i costi di trasporto, la funzione obiettivo è di minimizzare i costi combinati del trasporto dei prodotti dai tre impianti a tutti e quattro i clienti.

La formulazione del problema è quindi la seguente.

Funzione obiettivo:

$$\min(10A_1+7A_2+200A_3+8B_1+5B_2+10B_3+5C_2+5C_2+8C_3+9D_1+3D_2+7D_3)$$

(A.1)

Vincoli:

$$A_1 + A_2 + A_3 = 21 \quad (\text{A.2})$$

$$B_1 + B_2 + B_3 = 40 \quad (\text{A.3})$$

$$C_1 + C_2 + C_3 = 34 \quad (\text{A.4})$$

$$D_1 + D_2 + D_3 = 10 \quad (\text{A.5})$$

$$A_1 + B_1 + C_1 + D_1 \leq 50 \quad (\text{A.6})$$

$$A_2 + B_2 + C_2 + D_2 \leq 30 \quad (\text{A.7})$$

$$A_3 + B_3 + C_3 + D_3 \leq 40 \quad (\text{A.8})$$

Mostriamo ora come questo problema venga modellato sfruttando la libreria Eplex. In primo luogo occorre caricare la libreria Eplex di cui si dispone (in questo caso abbiamo sfruttato un risolutore esterno open source) e ottenerne un'*istanza*, la quale rappresenta un singolo problema sotto forma di modulo, a cui possono essere riferiti vincoli e funzione obiettivo consentendo quindi al solver esterno di risolvere il problema. Il codice che segue mostra come il problema di Figura A.2 sia stato trasposto all'interno di ECLⁱPS^e.

```

1 :- lib(eplex).      % caricamento della libreria Eplex
2 :- eplex_instance(prob). % definizione dell'istanza - chiamata
   'prob'
3
4 main(Cost, Vars) :-
5     % dichiarazione delle variabili e definizione del loro
   dominio
6     Vars = [A1,A2,A3,B1,B2,B3,C1,C2,C3,D1,D2,D3],
7     prob: (Vars $:: 0.0..1.0 Inf), % valori maggiori o uguali a 0
8
9     % definizione dei vincoli applicati all'istanza eplex
10    prob: (A1 + A2 + A3 $= 21),
11    prob: (B1 + B2 + B3 $= 40),
12    prob: (C1 + C2 + C3 $= 34),
13    prob: (D1 + D2 + D3 $= 10),
14

```

```

15 prob: (A1 + B1 + C1 + D1 $=< 50) ,
16 prob: (A2 + B2 + C2 + D2 $=< 30) ,
17 prob: (A3 + B3 + C3 + D3 $=< 40) ,
18
19 % inizializza il solver esterno con la funzione obiettivo
20 prob: eplex_solver_setup(min(10*A1 + 7*A2 + 200*A3 +
21     8*B1 + 5*B2 + 10*B3 +
22     5*C1 + 5*C2 + 8*C3 +
23     9*D1 + 3*D2 + 7*D3)) ,
24
25 % ----- Fine Modellazione -----
26
27 % risoluzione del problema
28 prob: eplex_solve(Cost) .

```

Per usare un'istanza Eplex occorre prima dichiararla con *eplex_instance/1*; una volta dichiarata, l'istanza viene riferita tramite il nome specificato.

Come primo passo creiamo le variabili del problema e imponiamo che possano assumere solamente valori non negativi e rendiamo noti all'istanza il loro dominio (*\$/2*). Successivamente imponiamo i vincoli che modellano il problema sotto forma di uguaglianze e disuguaglianze aritmetiche; per via del solver esterno scelto, gli unici tipi di vincoli accettati sono quelli lineari - che ovviamente consentono una maggiore efficienza nella risoluzione.

Occorre poi inizializzare il risolutore esterno con l'istanza eplex creata, in modo che questa possa essere risolta. Questo è fatto dal *eplex_solver_setup/1*, che prende come argomento la funzione obiettivo, la quale può essere di minimizzazione o massimizzazione. Infine è possibile risolvere il problema modellato attraverso *eplex_solve/1*.

Quando un'istanza viene risolta, il solver prende in considerazione tutti i vincoli ad essa relativi, i valori che le variabili del problema possono assumere e la funzione obiettivo specificata. In questo caso è possibile ottenere una soluzione ottimale pari a 710.0:

```

1 ?- main(Cost , Vars) .
2
3 Cost = 710.0
4 Vars = [A1{0.0 .. 1e+20 @ 0.0}, A2{0.0 .. 1e+20 @ 21.0}, ....]

```

Bibliografia

- [1] <http://www.energy.eu/>.
- [2] Financing renewable energy in the european energy market. http://ec.europa.eu/energy/renewables/studies/doc/renewables/2011_financing_renewable.pdf.
- [3] *NetLogo 5.0.2 User Manual*.
- [4] Programma operativo regionale, emilia romagna. <http://www.regione.emilia-romagna.it/temi/imprese/programma-operativo-regionale-fesr-2007-2013>.
- [5] R-bloggers. <http://www.r-bloggers.com/>.
- [6] The r faq. <http://cran.r-project.org/doc/FAQ/>.
- [7] R-tutor. <http://www.r-tutor.com/>.
- [8] Ramea. <http://www.arpa.emr.it/ramea/>.
- [9] A. Aggoun, D. Chan, P. Dufresne, E. Falvey, H. Grant, H. Warwick, A. Herold, G. Macartney, M. Meier, D. Miller, S. Mudambi, S. Novello, Perez B., E. van Rossum, J. Schimpf, K. Shen, P.A. Tsahageas, and D.H. de Villeneuve. *ECLiPSe User Manual*, 2012.
- [10] Krzysztof R. Apt and Mark Wallace. *Constraint logic programming using Eclipse*. Cambridge University Press, 2007.
- [11] E. Beale and J. Tomlin. Special facilities in a general mathematical programming system for non-convex problems using ordered sets of variables. In *Proceedings of the 5th International Conference on Opera-*

- tions Research*, pages 447–454. J. Lawrence. Ed., Tavistock Publications, 1970.
- [12] J.F. Benders. Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. *Numerische Mathematik*, 4:238–252, 1962.
- [13] G.E.P. Box. Non-normality and tests on variances. *Biometrika*, 40(3/4):318–335, 1953.
- [14] P. Brisset, H. El Sakkout, T. Fruhwirth, C. Gervet, H. Warwick, M. Meier, S. Novello, T. le Provost, J. Schimpf, and M.J. Shen, K. Wallace. *ECLiPSe Constraint Library Manual*, 2012.
- [15] Paolo Cagnoli. *VAS valutazione ambientale strategica*. Dario Flaccovio, 2010.
- [16] S.H. Cameron. *Piece-Wise Linear Approximations*, 1966.
- [17] Massimiliano Cattafi, Marco Gavanelli, Michela Milano, and Paolo Cagnoli. Sustainable biomass power plant location in the italian emilia-romagna region. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2(4), 2011.
- [18] Gregorio Cerri. Estensione di una simulazione ad agenti per lo studio degli incentivi regionali sul fotovoltaico. 2012.
- [19] A.M. Cheadle, H. Warwick, A.J. Sadler, J. Schimpf, and M.J. Shen, K. Wallace. *ECLiPSe A tutorial introduction*, 2012.
- [20] Y. Chu and Q. Xia. Generating benders cuts for a general class of integer programming problems.
- [21] W. S. Cleveland. LOWESS: A Program for Smoothing Scatterplots by Robust Locally Weighted Regression. *The American Statistician*, 35:54, 1981.
- [22] W.F. Clocksin and C.S. Mellish. *Programming in Prolog*. Springer-Verlag, 2003.

- [23] Alain Colmerauer and Philippe Roussel. The birth of prolog. In *The second ACM SIGPLAN conference on History of programming languages*, HOPL-II, pages 37–52, New York, NY, USA, 1993. ACM.
- [24] Luca Croce. Simulazione multi-agente nell’ambito della produzione e distribuzione di energia da fonti rinnovabili. Master’s thesis, Alma Mater Studiorum, Università degli Studi di Bologna, 2011.
- [25] G. B. Dantzig. *Maximization of a Linear Function of Variables Subject to Linear Inequalities*, in *Activity Analysis of Production and Allocation*, chapter XXI. Wiley, New York, 1951.
- [26] N.R. Draper and H. Smith. *Applied Regression Analysis*. Wiley-Interscience, 1998.
- [27] R.A. Fisher. *Statistical methods for research workers*. Oliver and Boyd, 1925.
- [28] M. Gavanelli, F. Riguzzi, M. Milano, and P. Cagnoli. Logic-based decision support for strategic environmental assessment. *Theory and Practice of Logic Programming, 26th Int’l. Conference on Logic Programming (ICLP’10) Special Issue*, 10(4–6):643–658, July 2010.
- [29] M. Gavanelli, F. Riguzzi, M. Milano, P. Cagnoli, D. Sottara, and A. Cagnini. An application of fuzzy logic to strategic environmental assessment. *Artificial Intelligence Around Man and Beyond - XIIth International Conference of the Italian Association for Artificial Intelligence*, 6934:324–335, 2011.
- [30] Marco Gavanelli, Michela Milano, Barry O’Sullivan, and Alan Holland. What-if analysis through simulation-optimization hybrids. In *European Conference on Modeling and Simulation - Track on Policy Modeling*, Koblenz, 2012.
- [31] Marco Gavanelli, Fabrizio Riguzzi, Michela Milano, and Paolo Cagnoli. Constraint and optimization techniques for supporting policy making. In *ISAIM*, 2012.

- [32] J.D Gergonne. The application of the method of least squares to the interpolation of sequences. *Historia Mathematica*, 1(4):439 – 447, 1974 [1815].
- [33] J. N. Hooker. Duality in optimization and constraint satisfaction. In *Proceedings of the Third international conference on Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems*, CPAIOR'06, pages 3–15, Berlin, Heidelberg, 2006. Springer-Verlag.
- [34] J.N Hooker and G. Ottoson. Logic-based benders decomposition. *Mathematical Programming*, 96:2003, 1995.
- [35] W.G. Jacoby. Loess:: a nonparametric, graphical tool for depicting relationships between variables. *Electoral Studies*, 19(4):577–613, 2000.
- [36] Joxan Jaffar and Michael J. Maher. Constraint logic programming: A survey, 1994.
- [37] Joxan Jaffar, Spiro Michaylov, Peter J. Stuckey, and Roland H. C. Yap. The clp(r) language and system. *ACM Trans. Program. Lang. Syst.*, 14(3):339–395, May 1992.
- [38] Leslie De Koninck, Tom Schrijvers, and Bart Demoen. Inlcp(r) - interval-based nonlinear constraint logic programming over the reals. In *Workshop on Logic Programming*, pages 91–100, 2006.
- [39] Robert A. Kowalski. The early years of logic programming. *Commun. ACM*, 31(1):38–43, January 1988.
- [40] R.B. Matthews, G.G. Nigel, A. Roach, G.J. Polhill, and N.M. Gotts. Agent-based land-use models: a review of applications. *Landscape Ecology*, 22(10), 2007.
- [41] T. Mitchell. *Machine Learning*. McGraw Hill, 1997.
- [42] M.R. Vito Muggeo. Package ‘segmented’. <http://cran.r-project.org/web/packages/segmented/>, 2013.

- [43] V.M.R. Muggeo. Estimating regression models with unknown break-points. *Statistics in medicine*, 22(19):3055–3071, 2003.
- [44] Gilbert Nigel. *Computational Social Science*. SAGE, 2010.
- [45] NIST/SEMATECH. Nist/sematech e-handbook of statistical methods. <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, 2012.
- [46] D.C. Parker, S.M. Manson, M.A. Janssen, M.J. Hoffmann, and P. Deadman. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(2):314–337, 2003.
- [47] R Development Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2012.
- [48] Attilio Raimondi, Federico Chesani, and Tony Woods. Impacts, constraints, objectives and implementation strategies in regional planning: General aspects.
- [49] Peter J. Rousseeuw and Annick M. Leroy. *Robust regression and outlier detection*. 1987.
- [50] Stuart J. Russell and Peter Norvig. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson Education, 2 edition, 2003.
- [51] Joachim Schimpf and Kish Shen. Eplex: Harnessing mathematical programming solvers for constraint logic programming. In Peter van Beek, editor, *Principles and Practice of Constraint Programming - CP 2005, 11th International Conference, CP 2005, Sitges, Spain, October 1-5, 2005, Proceedings*, volume 3709 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2005.
- [52] Joachim Schimpf and KISH Shen. Eclipse – from lp to clp. *Theory and Practice of Logic Programming*, 12:127–156, 2012.
- [53] J.C. Sorense and L.M. Mitchell. Procedures and programs to assist in the impact statement process. Technical report, Univ. of California, Berkeley, 1973.

-
- [54] Flaminio Squazzoni. *Simulazione sociale*. Carrocci editore, 1 edition, 2008.
- [55] R. G. D. Steel and J. H. Torrie. *Principles and Procedures of Statistics*. McGraw-Hill, 1960.
- [56] Stephen M Stigler. Gergonne’s 1815 paper on the design and analysis of polynomial regression experiments. *Historia Mathematica*, 1(4):431 – 439, 1974.
- [57] K.G. Troitzsch, U. Mueller, G.G. Nigel, and J. Doran. Social science microsimulation. *J. Artificial Societies and Social Simulation*, 2(1), 1999.
- [58] Edward Tsang. *Foundations of constraint satisfaction*, 1993.
- [59] W. N. Venables and D. M. and the R Core Team Smith. *An Introduction to R Notes on R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics Version 2.15.2*, 2012.