



Report

“Progetto MODERNO”

MOdello di Distretto Energetico Rurale inNOvativo

**POR FESR 2007 - 2013 ATTIVITA' 1.1 LINEE D'INTERVENTO A E B
BANDO REGIONALE 2008 PER IL SOSTEGNO A PROGETTI DI
RICERCA CONGIUNTI TRA
GRUPPI DI IMPRESE E ORGANISMI DI RICERCA IN MATERIA
DI AMBIENTE, TRASPORTI, LOGISTICA, INFOMOBILITA' ED
ENERGIA**

Partner del Progetto MODERNO



Fondazione per il Clima e la Sostenibilità (FCS)

<http://www.climaesostenibilita.it>



Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco"
Università degli Studi di Firenze

<http://www.de.unifi.it/>



**Dipartimento di Scienze Agronomiche e Gestione
del Territorio Agroforestale (DISAT)**

Università degli Studi di Firenze

<http://www.dipsa.unifi.it>



Istituto di Biometeorologia (IBIMET)
Consiglio Nazionale delle Ricerche.

<http://www.ibimet.cnr.it/>



Toscoaragonese Italia s.r.l.

<http://www.toscoaragonesaitalia.com/>



Consorzio Agrario di Siena (CAPSI)

<http://www.capsi.it>

COM

Costruzioni Ottico Meccaniche s.n.c.

<http://www.comotticomeccanica.com>

A cura di:

Giampiero Maracchi

Simone Orlandini

Marco Mancini

Direzione Amministrativa:

Elvira Giannozzi

Segreteria Amministrativa:

Francesca Chellini

Hanno collaborato alla realizzazione del report

Giovanni Argenti

Marie Astier

Carla Balocco

Andrea Barbugli

Giorgio Bartolini

Marco Bindi

Andrea Braconi

Gabriele Brugnoli

Giulio Castagnini

Jacopo Ceccarelli

Roberto Ceccuzzi

Luca Cellesi

Virginia Ciardini

J.D. Dalu

Gianni Dalu

Tiziana De Filippis

Salvatore Filippo Di Gennaro

Ernesto Ferraro

Edoardo Fiorillo

Marco Gaetani

Claudio Tei

Bernardo Gozzini

Francesco Ientile

Massimo Landi

Gianni Messeri

Dario Paganini

Alessandro Pannacci

Francesco Pasi

Fabio Pasqualetti

Francesco Primo Vaccari

Leandro Rocchi

Matteo Rossi

Fabio Straccali

Stefano Taddei

Camillo Zanchi

Si ringrazia per la collaborazione

Unione Nazionale Comuni Comunità Enti Montani - UNCEM
Associazione dei GAL Toscani - ASSOGAL

Premessa

Giampiero Maracchi

Il modello economico affermatosi negli ultimi 100 anni in tutti i settori si è basato sulla concentrazione degli impianti e delle attività. L'attuale crisi ambientale e finanziaria globale mette in evidenza alcune criticità di tale modello spingendo ad una riflessione approfondita sull'opportunità di integrarlo secondo altri criteri.

La principale causa dei cambiamenti climatici in atto è stata attribuita all'aumento delle concentrazioni atmosferiche di gas effetto serra, legato soprattutto all'uso di combustibili fossili. Anche l'agricoltura, al pari degli altri settori produttivi, contribuisce al *global change* ma l'*Intergovernmental Panel on Climate Change*, massima autorità scientifica nella materia, ha reputato che questa, più degli altri, possa fornire un contributo attivo alla mitigazione. Lo stoccaggio di carbonio nei suoli sotto forma di sostanza organica (carbon sink) e la produzione di energia da fonti rinnovabili sono fra le azioni virtuose di cui il settore agro-forestale può farsi carico. In Italia, la produzione e vendita di energia derivante da fonti rinnovabili è quindi diventata attività connessa a quelle agricole, fonte integrativa del reddito agrario, grazie alla legge finanziaria 2006 e alle successive modifiche.

In questo contesto il mondo rurale toscano costituisce una realtà importante sia per il numero degli abitanti e delle imprese presenti sul territorio, sia per la disponibilità di rilevanti quantitativi di biomasse ligno-cellulosiche.

La creazione di distretti energetici capaci di valorizzare le agri-energie disponibili, attuando il recupero dei residui colturali in un modello di microgenerazione diffusa, può quindi rappresentare un punto di forza per il sistema toscano tale da portare un significativo contributo al soddisfacimento del fabbisogno energetico regionale e alla mitigazione dell'effetto serra.

In questo contesto si è inteso sviluppare il Progetto "MODERNO" con il fine di analizzare le principali criticità della filiera e trovare le relative soluzioni, mettendo a punto un'ampia gamma di strumenti tecnici e scientifici atti ad indirizzare gli stakeholders del comparto agricolo verso l'attivazione delle filiere agro-energetiche più virtuose.

Il presente *report* fa parte di una serie di pubblicazioni realizzate con l'ausilio di competenze differenti, del mondo della ricerca, dei servizi e dell'artigianato, al fine di divulgare i risultati del progetto e di fornire un supporto informativo agli operatori del settore.

Indice

1 Biomasse agrienergetiche nel territorio toscano

1.1 Introduzione

1.2 Energia rinnovabile dalle biomasse

1.2.1. I comparti di provenienza

1.2.2. I processi di conversione

1.2.3. I biocombustibili

1.3 Biomasse da colture dedicate

1.3.1. Colture poliennali per la produzione di biomassa lignocellulosica

1.3.2. Colture erbacee per la produzione di biocarburanti

1.4 Biomasse residuali nel settore agricolo

1.4.1. Tipologie e fonti di provenienza

1.4.2. Residui delle coltivazioni arboree ed erbacee

1.4.2.1. La stima delle potenzialità e delle disponibilità

1.4.2.2. Aspetti logistici ed ambientali

1.4.2.3. Le superfici e le disponibilità delle principali categorie

1.5. Biomasse dal settore forestale

1.6. Conversione energetica

2 Modello di filiera per le biomasse residuali legnose

2.1. Introduzione

2.2. Il ruolo del Consorzio Agrario di Siena nel comparto agricolo

2.2.1. Attività del Consorzio Agrario di Siena

2.2.2. Struttura Territoriale del Consorzio Agrario di Siena

2.2.3. Potenziali servizi e attività lungo la catene del valore dell'energia

2.3. Il modello organizzativo e logistico

2.4. La raccolta

2.4.1. Introduzione

2.4.2. Le macchine imballatrici

2.4.3. Il cantiere a due trattrici separate

2.4.4. Valutazioni economiche

2.4.5. Considerazioni

2.5. Logistica e trasporto

2.6. Stoccaggio e conservazione

3 Prototipo innovativo per la microgenerazione

3.1. Classificazione delle utenze rurali della Toscana

3.1.1. Identificazione delle aree rurali

3.1.2. Stima dei consumi elettrici complessivi imputabili alle aree rurali

3.1.3. Stima dei consumi termici complessivi imputabili alle aree rurali

3.1.4. Stima dei consumi energetici specifici delle abitazioni nelle aree rurali

3.1.5. Stima dei consumi energetici specifici delle aziende agricole nelle aree rurali

3.1.6. Rilevazione in campo e quantificazione dei consumi elettrici e termici di alcune aziende agricole ubicate nelle aree rurali

3.1.7. Stima dei consumi energetici specifici delle aziende artigiane nelle aree rurali

3.2. Analisi delle soluzioni tecnologiche migliori per la microgenerazione elettrica da caldaie a biomassa

3.2.1. Identificazione della taglia di potenza elettrica e del combustibile di alimentazione di interesse ai fini del progetto

3.2.2. Identificazione e valutazione delle tecnologie pubblicizzate

3.3. Studio termodinamico e dimensionamento della caldaia e del generatore elettrico

3.3.1. Scelta del fluido di lavoro

3.3.2. Scelta della caldaia

3.3.3. Scelta del tipo di impianto motore

3.3.3.1. Considerazioni generali sulle motrici alternative a vapore

3.3.3.2. Accoppiamento diretto tra motrice alternativa a vapore ed alternatore lineare

3.3.3.3. Simulazione dinamica del sistema

3.3.3.4. Simulazione termodinamica del sistema

- 3.3.3.5. Simulazione termodinamica del motore
- 3.3.3.6. Simulazione dell'alternatore
- 3.3.4. Progetto elettromeccanico del microgeneratore
 - 3.3.4.1. Introduzione
 - 3.3.4.2. Descrizione
 - 3.3.4.3. Scelta dell'alternatore lineare
 - 3.3.4.4. Strutturazione Dinamica
 - 3.3.4.5. Sistema di Distribuzione
 - 3.3.4.6. Gestione dei Giochi
 - 3.3.4.7. Sistema di Controllo
 - 3.3.4.8. Prestazioni attese del microgeneratore GEA-VA

4 Fabbisogni termici e potenzialità eoliche e solari

4.1. Gradi Giorno per il riscaldamento

- 4.1.1. Gradi Giorno D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412
- 4.1.2. Individuazione del possibile impatto del cambiamento climatico sui Gradi-Giorno per il riscaldamento

4.2. Radiazione Solare

- 4.2.1. I dati DSSF
 - 4.2.1.1. Archivio dati di radiazione DSSF
 - 4.2.1.2. Procedura di estrazione dei dati di radiazione
 - 4.2.1.3. Risultati prodotti: le mappe di radiazione media
 - 4.2.1.4. Risultati prodotti: le serie temporali di radiazione nei punti
 - 4.2.1.5. Tempi di calcolo
 - 4.2.1.6. Verifica dei dati di radiazione stimata (Hgo) con dati di radiazione misurata
- 4.2.2. Metodologia impiegata per la stima della radiazione su superficie inclinata e con effetto dell'orizzonte reale
 - 4.2.2.1. Scomposizione della radiazione Hgo stimata da satellite nelle componenti diffusa e diretta
 - 4.2.2.2. Introduzione dell'effetto dell'orizzonte reale e del piano comunque inclinato sulla radiazione stimata da satellite

4.2.3. Cartografia relativa al fotovoltaico

4.2.3.1. Cartografia relativa alla radiazione globale

4.2.3.2. Cartografia relativa alla producibilità elettrica

4.2.3.3. Cartografia relativa al rendimento economico del fotovoltaico

4.3. Energia Eolica

4.3.1. Classificazione anemologica della Toscana attraverso l'utilizzo della modellistica WRF-CALMET

4.3.1.1. Specifiche della base dati

4.3.1.2. Interpolazione verticale delle stime di vento a 18 m

4.3.1.3. Elaborazione delle mappe di vento

4.3.1.4. Verifica della stima della velocità del vento

4.3.2. Producibilità energetica da minieolico della Toscana

4.3.2.1. Scelta della turbina ottimale

4.3.2.2. Elaborazione delle mappe di producibilità energetica

5 Bibliografia

6 Sitografia

Allegati

Allegato 1, Indagine conoscitiva sulla produzione di biomassa legnosa dei boschi di querce caducifoglie: caso studio in aree significative della Provincia di Siena

Allegato 2, Aspetti conoscitivi delle ceneri prodotte da sarmenti di vite

Allegato 3, Caratterizzazione delle aree rurali della Toscana

Allegato 4, Rilevazione in campo consumi elettrici e termici di aziende agricole campione

Allegato 5, Indagine sulle tecnologie pubblicizzate

Allegato 6, Elaborazioni cartografiche sulla risorsa solare

Allegato 7, Elaborazioni cartografiche sulla risorsa eolica

1. Biomasse agrienergetiche nel territorio toscano

a cura di

*Marco Mancini, Anna Dalla Marta, Francesca Orlando, Francesca Natali,
Federico Guasconi, Simone Orlandini*

1.1 Introduzione

Lo scopo del “Progetto MODERNO” è stato quello di individuare i punti critici per lo sviluppo di filiere per la produzione di energia rinnovabile partendo da biomasse agroforestali presenti o potenzialmente producibili nel territorio toscano. Fra le priorità individuate sono state poste la piccola scala per far fronte alle necessità termiche ed elettriche delle utenze site nelle aree rurali, su cui in Toscana è dislocato circa un terzo della popolazione.

Tra i primi punti critici individuati e posti come oggetto di studio del progetto troviamo la valutazione delle disponibilità di biomasse, la loro localizzazione e l’individuazione delle soluzioni tecniche, logistiche ed economiche utili a rendere effettivamente disponibili alcune tipologie di biomasse ad oggi non valorizzate.

Nel primo obiettivo operativo si affrontano i temi delle principali categorie di biomasse agroforestali presenti sul territorio cercando di fornire un quadro completo delle potenzialità, della localizzazione e dell’opportunità del loro impiego a scopo energetico.

1.2 Energia rinnovabile dalle biomasse

Le biomasse, sia quelle prodotte da colture dedicate che quelle residuali originate da materiali di scarto, possono essere impiegate, attraverso l'utilizzo di apposite tecnologie, per la generazione di energia termica ed elettrica e per la produzione di biocarburanti.

Con il termine “colture dedicate” o “colture energetiche” si fa riferimento a colture allestite su terreni di normale coltivazione o su set-aside allo scopo di produrre biomassa da destinare alla produzione di energia. L'agricoltura ha però a disposizione un notevole quantitativo di biomasse derivanti dai residui di coltivazioni che annualmente si rendono disponibili e che vengono denominate “biomasse residuali”.

Le biomasse agroforestali sono il risultato di energia solare captata ed incamerata a breve ciclo attraverso i processi di fotosintesi clorofilliana ed il metabolismo degli organismi viventi, la biomassa è ritenuta una fonte di energia rinnovabile e neutrale ai fini dell'incremento di gas a effetto serra ed in grado di apportare vantaggi dal punto di vista ambientale in relazione al fatto che le emissioni di CO₂ dovute al suo utilizzo negli impianti possono ritenersi equivalenti alla CO₂ assorbita nei tessuti della pianta originaria. Naturalmente al semplice processo naturale va aggiunto l'intervento dell'uomo nei processi produttivi che rende il bilancio emissivo non neutro e quindi rende le diverse filiere di produzione energetica differentemente virtuose nei confronti dei cambiamenti climatici.

1.2.1 I comparti di provenienza

I principali comparti di provenienza delle biomasse sono rappresentati dal:

- *settore forestale e agroforestale*: i residui delle operazioni selvicolturali e delle attività agroforestali, i prodotti dell'utilizzazione dei boschi;
- *settore agricolo*: i residui culturali provenienti dall'attività agricola (es. residui delle operazioni agricole di potatura, residui di natura composita provenienti da coltivazioni di cereali e seminativi come paglie di riso e di cereali autunno-vernini, stocchi, tutoli e brattee di mais ecc.) e i prodotti di colture dedicate (es. piante arboree o erbacee annuali e poliennali per la produzione di biomassa ligno-cellulosica; piante oleaginose per la produzione di olio vegetale e biodiesel; piante alcoligene per la produzione di bioetanolo);
- *settore zootecnico*: reflui zootecnici per la produzione di biogas;

- *settore agroindustriale*: residui provenienti dalle industrie del legno (es. scarti di segherie ecc.) e della carta, nonché residui dell'industria agro-alimentare quali sanse, vinacce, gusci ed industrie di trasformazione agroalimentare;
- *comparto dei rifiuti organici urbani*: residui delle operazioni di manutenzione del verde pubblico e frazione umida di rifiuti solidi urbani.

1.2.2. I processi di conversione

I processi di conversione energetica delle biomasse sono principalmente tre:

- *conversione biologica* : avviene attraverso reazioni chimiche dovute alla presenza di enzimi, funghi e altri microrganismi che si sviluppano nella biomassa tenuta a particolari condizioni. Si applica generalmente su biomasse con tenore di umidità superiore al 30% e rapporto C/N<30; i principali processi biologici sono la fermentazione alcolica e la digestione anaerobica;
- *conversione termochimica* : avviene attraverso l'azione del calore e la conseguente combustione della biomassa. Si applica generalmente su biomasse con tenore di umidità inferiore al 30% e rapporto C/N>30.
- *estrazione*: può essere un semplice processo fisico di pressione per l'estrazione di oli vegetali puri da semi oleosi ottenuti da colture dedicate; un successivo processo di esterificazione viene impiegato per la produzione di biodiesel.

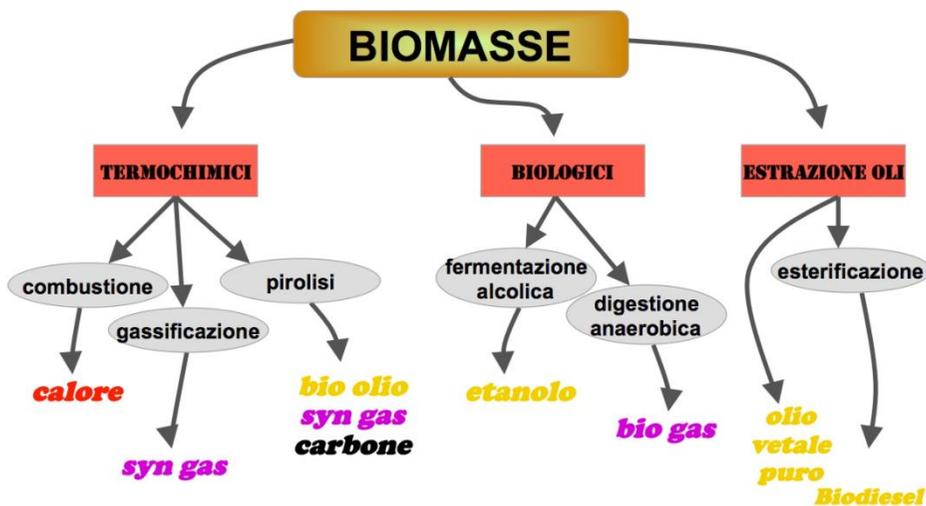


Figura 1.1 - Possibili processi di conversione delle biomasse.

1.2.3. I biocombustibili

I biocombustibili che si originano a partire dalle biomasse possono essere suddivisi in tre principali categorie in base al loro stato fisico: solido, liquido o gassoso.

- *Biocombustibili solidi*: costituiti principalmente da prodotti a matrice legnosa destinati alla combustione diretta (legna da ardere di varie pezzature, cippato, ecc.) o previa trasformazione in forme densificate (pellet e bricchetti). Sono utilizzati soprattutto per la produzione di calore nei settori residenziale ed industriale, ed attraverso sistemi di cogenerazione possono fornire calore ed elettricità;
- *Biocombustibili liquidi*: prodotti derivanti per lo più da colture dedicate attraverso processi di estrazione (olio vegetale puro) ed esterificazione (biodiesel) degli oli vegetali o processi di fermentazione e distillazione di materiali zuccherini (bioetanolo). Sono di particolar interesse per la produzione di biocarburanti nel settore dei trasporti;
- *Biocombustibili gassosi*: prodotti derivanti da processi di fermentazione anaerobica di biomasse umide a componente organica quali reflui zootecnici, civili o agro-industriali. Le colonie batteriche in mancanza di ossigeno producono gas costituito al 45-55% da metano che può essere direttamente utilizzato per la cogenerazione attraverso appositi motori oppure raffinato (estrazione CO₂ e H₂O) ed immesso in rete.

Con il termine *biocarburante* si fa riferimento a tutti quei biocombustibili liquidi e gassosi (es. bioetano, biodiesel, biometano) atti ad essere utilizzati per l'alimentazione di motori a combustione interna (ciclo Diesel e ciclo a Otto). Il loro impiego è tradizionalmente legato al settore dei trasporti in sostituzione dei combustibili fossili per autotrazione, anche se, nel corso degli ultimi anni, si è assistito ad una rapida evoluzione del loro campo di applicazione anche in direzione della generazione elettrica e termica ed in particolar modo della cogenerazione. A questo proposito l'olio vegetale puro (PVO) ed il biogas sono tra i biocarburanti che trovano applicazione prevalente nel settore della generazione e cogenerazione.

I biocombustibili solidi sono invece tradizionalmente legati al settore del riscaldamento e della generazione elettrica e diffusamente impiegati negli impianti di teleriscaldamento e cogenerazione.

1.3 Biomasse da colture dedicate

Le colture energetiche dedicate richiedono l'impiego di terreni agricoli e quindi sono considerate competitori delle colture alimentari.

Attualmente questa competizione sta suscitando molte perplessità circa l'opportunità di ricorrere all'uso di biomasse agro energetiche provenienti da coltivazioni soprattutto per l'aumento dei prezzi che le derrate alimentari possono subire. La Toscana ha, inoltre, sostenuto un notevole sforzo per valorizzare prodotti tipici e la competizione con le coltivazioni energetiche potrebbe portare alla perdita di un valore aggiunto difficilmente recuperabile.

Ai fini del presente studio sono state quindi considerate superfici utili per la coltivazione di colture energetiche quelle risultanti come ritirate dalla produzione. Questi terreni non sono coltivati per differenti motivazioni, prima fra le quali una minore fertilità, anche se non sono terreni non produttivi quali quelli marginali.

La loro superficie è stata ricavata dalle statistiche ARTEA basate sulle domande DUA presentate nel 2006.

Queste superfici, destinate alla coltivazione di colture energetiche, possono quindi essere soggette a differenti obiettivi quali la produzione di biomasse lignocellulosiche destinabili principalmente alla produzione di energia termica e/o elettrica attraverso impianti di conversione termochimica, oppure alla produzione di biocarburanti quali olii vegetali puri, bioetanolo, o biogas.

Per la produzione di biomasse lignocellulosiche le principali tipologie di coltivazioni utilizzabili sono:

- cedui a turno breve o short rotation forestry (SRF) che sono coltivazioni di specie arboree, ad elevata densità, caratterizzate da rapidità di crescita e che vengono ceduate ad intervalli frequenti (2-5 anni) per la produzione di cippato; le specie principalmente impiegate sono il Pioppo (*Populus spp.*), la Robinia (*Robinia pseudoacacia*), l'Eucalipto (*Eucalyptus spp.*), il Salice (*Salix alba*);
- erbacee poliennali ossia colture capaci di dare produzioni annuali per più anni; le più rappresentative sono la Canna comune (*Arundo donax*), il Cardo (*Cynara cardunculus*), il Miscanto (*Miscanthus spp.*), il Kenaf (*Hibiscus cannabinus*);
- erbacee annuali Sorgo da fibra (*Sorghum bicolor*)

Per la produzione di biocarburanti le categorie di colture più idonee sono:

- colture oleaginose ossia colture da cui ricavare olio vegetale puro quale girasole (*Heliantus annus*) e colza (*Brassica napus*);

- colture zuccherino-amilacee idonee a produrre bioetanolo dalla fermentazione, quali il mais (*Zea mays*), sorgo zuccherino (*Sorghum vulgare*), barbabietola da zucchero (*Beta vulgaris var saccharifera*), frumento (*Triticum spp.*).

La scelta degli obbiettivi deve sicuramente tenere conto degli aspetti agronomici e degli aspetti ambientali che implicano le differenti coltivazioni. Successivamente si riportano, a titolo di esempio, delle stime di biomasse potenziali producibili nel territorio toscano sia utilizzando sia poliannuali per ottenere biomassa lignocellulosica, sia colture erbacee per la produzione di biocarburanti.

1.3.1. Colture poliennali per la produzione di biomassa lignocellulosica

Per valutare le potenzialità produttive in termini di biomasse lignocellulosiche producibili nel territorio toscano è stata presa in considerazione la possibilità di coltivare colture poliennale nei terreni ritirati dalla produzione. Le colture poliennali quali Canna comune, Cardo, Miscanto, Kenaf possono facilmente contribuire alla produzione di combustibile per riscaldamento o per cogenerazione

Non è stata considerata una specifica specie ma è stato piuttosto considerata la possibilità di produrre 15 tonnellate di sostanza secca ad ettaro adoperando la coltura che meglio si adatta ad ogni ambiente pedoclimatico.

La produttività considerata non è molto elevata perché è stata posta l'ipotesi di utilizzare una gestione agronomica semintensiva.

La figura 1.2 mette in evidenza il contributo potenziale che può essere ricavato nei vari comuni della toscana, considerando le superfici ritirate dalla produzione.

L'impiego di queste colture può portare a benefici molteplici legati all'aumento di sostanza organica ed alla riduzione dell'erosione dei suoli legato alle ridotte lavorazioni del terreno che richiedono, all'aumento di biodiversità, al presidio ed alla gestione del territorio. Per contro la loro produttività è fortemente influenzata dalla disponibilità idrica.

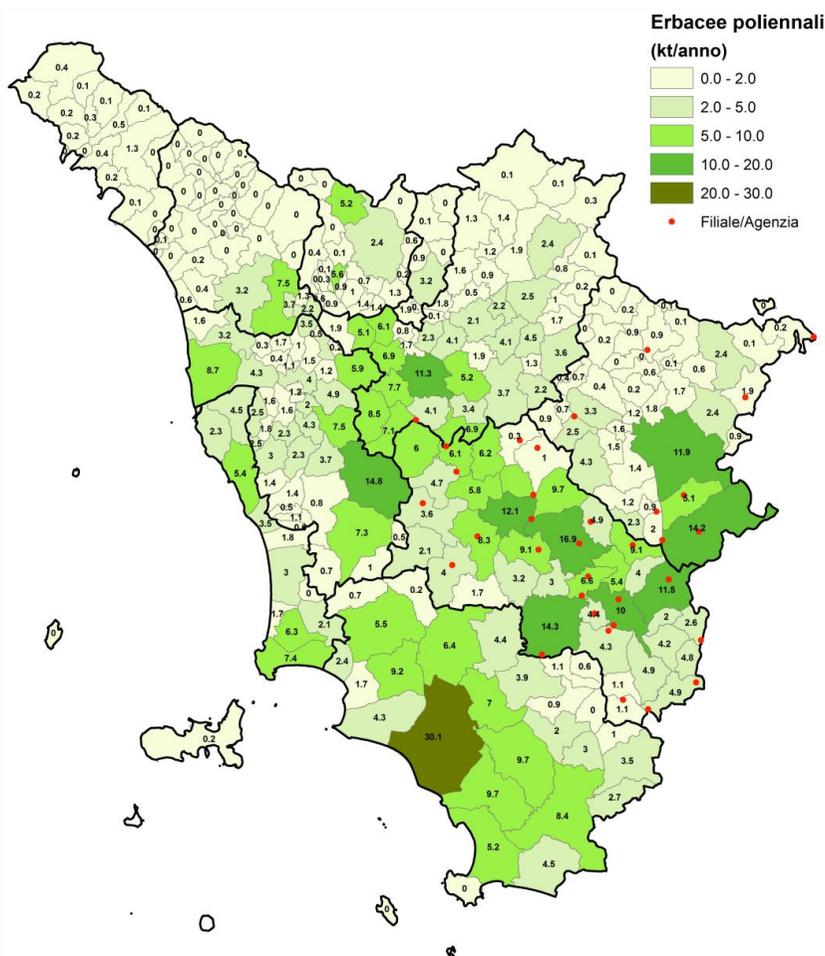


Figura 1.2 - Produzione potenziale di biomasse nei terreni ritirati dalla produzione.

1.3.2 Colture erbacee per la produzione di biocarburanti

Le colture energetiche da destinare alla produzione di biocarburanti liquidi sono essenzialmente riconducibili a colture oleaginose per la produzione di oli vegetali puri e colture amidacee destinate alla produzione di bioetanolo.

Nel territorio toscano le colture dedicate, tradizionalmente coltivate, impiegabili per la produzione di biocarburanti sono il girasole ed il mais da granella. Il primo è principalmente coltivato senza apporto di acqua da irrigazione mentre il mais è quasi sempre irrigato. Per questo sono state prese in considerazione queste due colture che richiedono input agronomici

sostanzialmente differenti ma permettono di conseguire obiettivi quantitativamente diversi.

L'analisi delle produzioni potenziali ottenibili è stata svolta sul territorio toscano con l'obiettivo di valutare l'effetto della variabilità meteorologica e dei cambiamenti climatici sulla produzione di mais e girasole.

A tale scopo sono stati impiegati i seguenti materiali e metodi:

- 15 serie storiche termopluviometriche, omogeneizzate, per il periodo 1955-2007 (Tab. 1.1);
- il modello CropSyst calibrato e validato per girasole e mais;
- analisi della variabilità spaziale e temporale delle produzioni;
- realizzazione delle mappe di produzione potenziale
- valutazione del contributo dei biocarburanti prodotti alla domanda di carburati in Toscana.

LOCATION	Abbr.	Lat UTM_X	Long UTM_Y	Elevation (m a.s.l.)
<i>Castel del Piano</i>	CDPI	706920	4752060	596
<i>Castelnuovo Garf.</i>	CNGA	613275	4885305	280
<i>Grosseto</i>	GROS	669415	4735216	5
<i>Livorno</i>	LIVO	606140	4822595	9
<i>Massa</i>	MASS	591800	4875450	38
<i>Massa Marittima</i>	MAMA	653850	4768500	362
<i>Montepulciano</i>	CHMP	726520	4774950	575
<i>Orbetello</i>	ORBE	681025	4699970	1
<i>Peretola</i>	PERE	676985	4852101	38
<i>Pisa</i>	PISA	613017	4838671	3
<i>Pistoia</i>	PIST	653080	4867535	88
<i>Pontremoli</i>	PONT	570117	4913436	247
<i>San Miniato</i>	SMIN	647740	4838630	132
<i>Siena</i>	SIEN	687630	4799185	346
<i>Volterra</i>	VOLT	649965	4808235	465

Tabella 1.1 - Posizione delle stazioni climatiche

Il modello Cropsyst è stato impiegato per simulare crescita e produzione delle colture per ciascuna posizione delle stazioni. Come condizioni iniziali sono stati utilizzati:

- **parametri del suolo:**
 - tessitura presente nel database regionale
 - profondità del suolo 2,1 m
 - sostanza organica del suolo 0.8%

- **parametri meteorologici:** - serie storiche omogeneizzate delle 15 stazioni meteorologiche considerate (temperatura minima, massima e precipitazioni)
 - radiazione solare calcolata sulla base dell'escursione termica giornaliera
- **parametri colturali:**
 - semina il 15 aprile
 - fertilizzazione azotata di 180 unità per il mais e di 100 unità per il girasole
 - irrigazione con AWC<35% per il mais e assente nel girasole

Dai valori di produzione dei 53 anni, sono state calcolate le produttività (Ton/Ha) medie per il 10° e 90° percentile (Tab. 1.2). Queste corrispondono, per ciascuna stazione, alla media dei cinque anni più e meno produttivi e dato che le variabili chiave nelle differenze di produzione sono quelle meteorologiche mettono in evidenza l'effetto della variabilità meteorologica. Le produttività del 10° e 90° percentile sono state spazializzate con un programma di cartografia. Successivamente la produttività media di ciascun comune è stata impiegata per calcolare le sue produzioni potenziali considerando le rispettive disponibilità di terreni ritirati dalla produzione censiti da ARTEA nella domanda unica 2007 e relativi all'anno 2006 (Fig. 1.3).

Località	Produttività (Ton/Ha)	
	mais	girasole
Castel del Piano	8,74	1,06
Castelnuovo Garf.	7,64	0,61
Grosseto	7,09	1,20
Livorno	8,47	0,42
Massa	7,75	1,41
Massa Marittima	7,31	1,12
Montepulciano	7,72	1,36
Orbetello	6,23	1,18
Peretola	7,14	1,09
Pisa	8,04	1,31
Pistoia	6,58	1,10
Pontremoli	7,60	1,37
San Miniato	8,15	0,54
Siena	7,40	1,26
Volterra	8,61	1,00

Tabella 1.2 - Produttività media di mais e girasole nel periodo 1955-2007, per 15 postazioni di rilievo climatico.

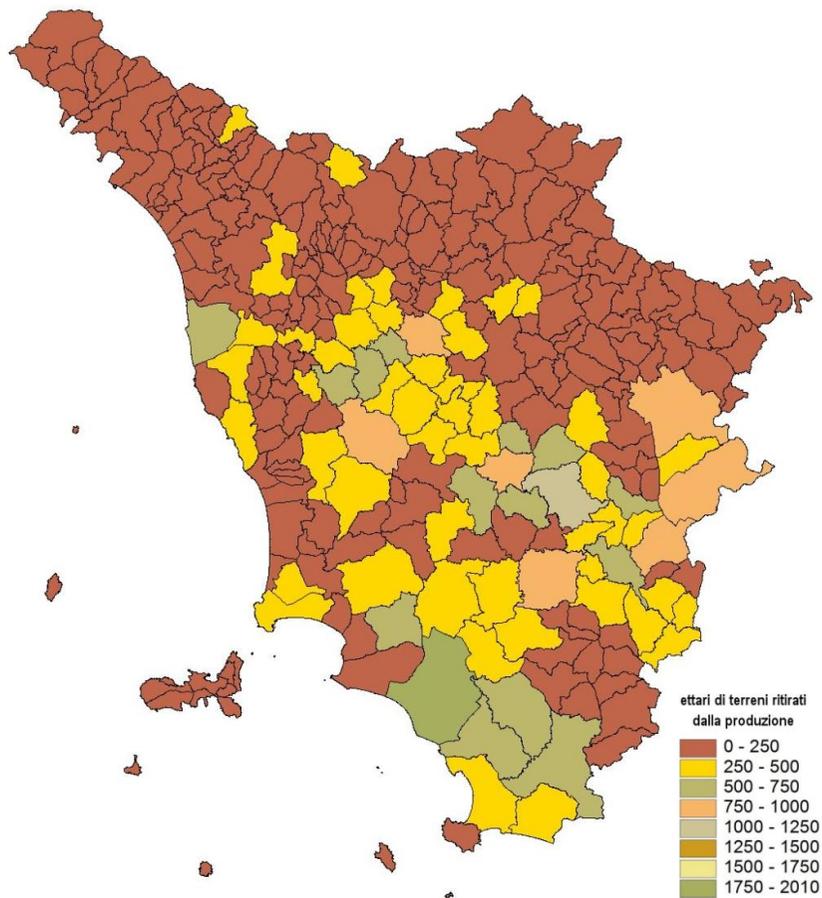


Figura 1.3 - Terreni ritirati dalla produzione nel 2006.

Dai risultati è emerso che nel corso degli anni in molte delle posizioni dove è stata effettuata la simulazione si è registrata una diminuzione significativa delle produzioni (Tab. 1.3), imputabile all'effetto dei cambiamenti climatici.

Nelle stazioni con variazione della produzione significativa è stata effettuata una detrendizzazione, al fine di eliminare la variabilità imputabile ai cambiamenti climatici. La spazializzazione della media dei cinque anni più produttivi (90° percentile) e meno produttivi (10° percentile) ha messo in evidenza l'effetto che la variabilità meteo-climatica può avere sulla produttività delle due colture nel territorio toscano (Fig. 1.4 e Fig. 1.5).

Località	Produzione					
	mais			girasole		
	pendenza	R ²	Significat.	pendenza	R ²	Significat.
Castel del Piano	-1,4	0,00		-17,6	0,27	***
Castelnuovo Garf.	-10,8	0,03		-9,5	0,11	*
Grosseto	-36,8	0,18	**	-6,3	0,10	*
Livorno	-18,9	0,12	*	-3,2	0,02	
Massa	-4,79	0,03		-1,0	0,00	
Massa Marittima	12,5	0,03		-10,5	0,19	**
Montepulciano	-22,4	0,17	**	-9,2	0,14	**
Orbetello	-20,0	0,18	**	-2,4	0,04	
Peretola	-29,5	0,15	**	-7,5	0,08	
Pisa	1,9	0,00		-5,8	0,05	
Pistoia	-35,7	0,17	**	-3,2	0,02	
Pontremoli	-25,2	0,15	**	-10,6	0,21	***
San Miniato	-16,2	0,05		-0,6	0,00	
Siena	-11,9	0,06		-0,6	0,00	
Volterra	-26,0	0,19	**	-10,5	0,08	

Tabella 1.3 - Pendenza della retta di regressione e coefficiente di determinazione delle produzioni del periodo 1955-2002. Livelli di significatività:*=P<0,05, **=P<0,01, ***=P<0,001.

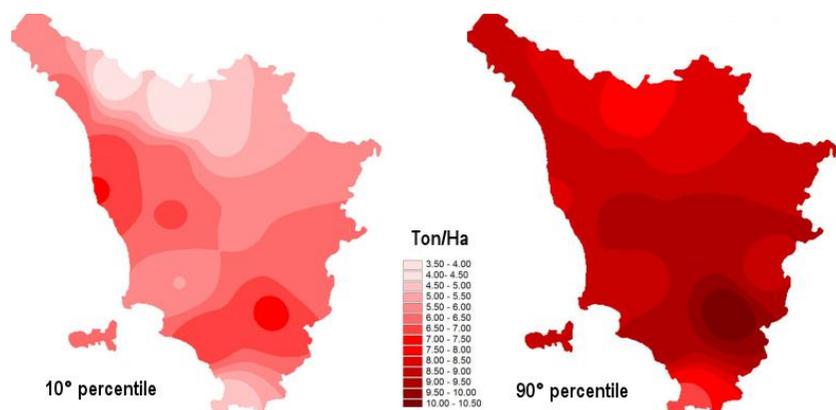


Figura 1.4 - Produttività del mais irrigato in Toscana nelle annate climaticamente sfavorevoli (10° percentile) e favorevoli (90° percentile).

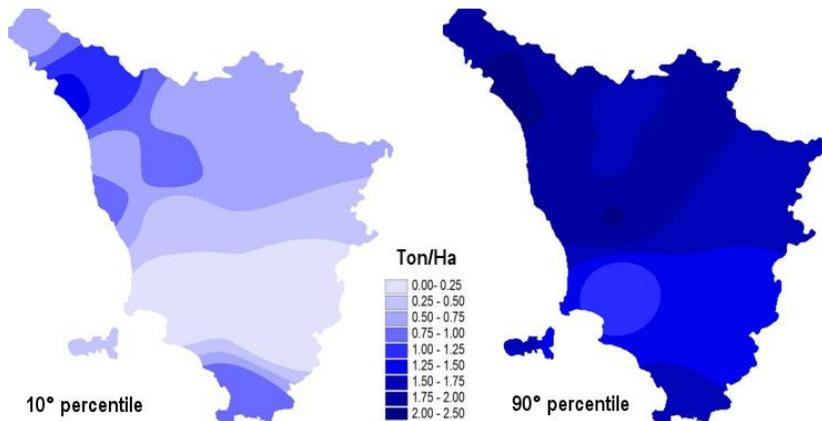


Figura 1.5 - Produttività del girasole non irrigato in Toscana nelle annate climaticamente sfavorevoli (10° percentile) e favorevoli (90° percentile).

Infine le produzioni di granella di mais e girasole sono state convertite rispettivamente in bioetanolo e olio vegetale puro impiegando un coefficiente di trasformazione del 30% per il bioetanolo e del 39% per l'olio vegetale puro.

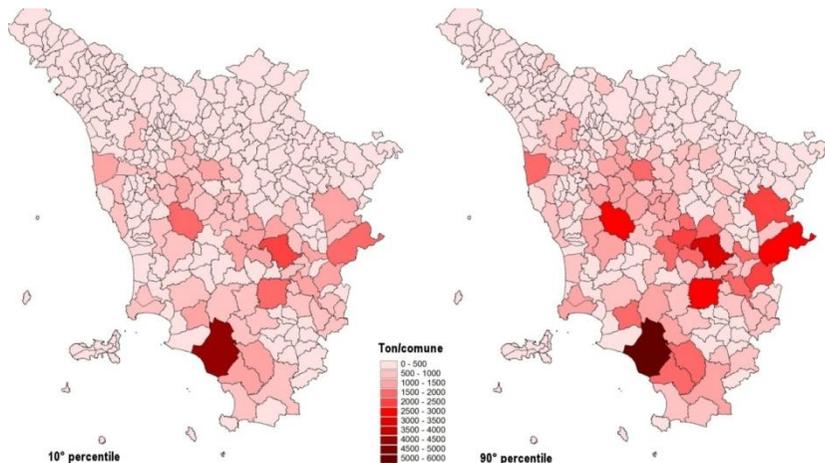


Figura 1.6 - Produzione potenziale di bioetanolo producibile da mais irrigato in Toscana nelle annate climaticamente sfavorevoli (10° percentile) e favorevoli (90° percentile), impiegando per ciascun comune i terreni ritirati dalla produzione.

I valori di produttività media di ogni comune della Toscana sono stati, infine, moltiplicati per i terreni ritirati dalla produzione ottenendo così la produzione potenziale di bioetanolo (Fig. 1.6) e di olio vegetale puro (Fig. 1.7) nelle annate climaticamente più e meno favorevoli.

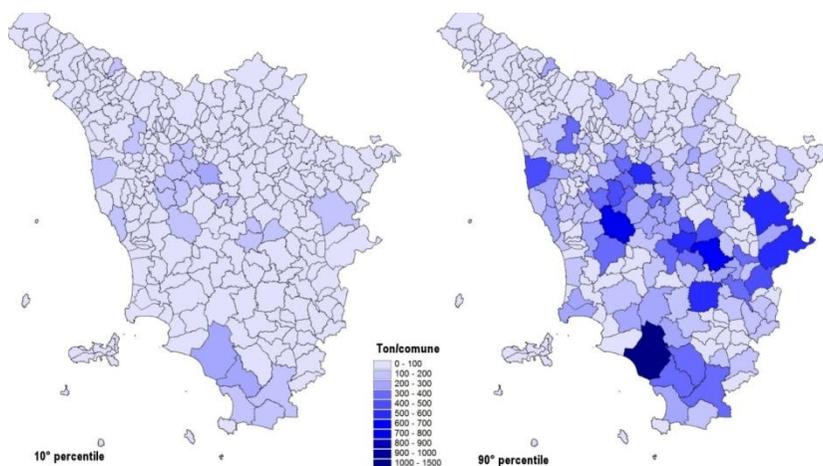


Figura 1.7 - Produzione potenziale di olio vegetale puro producibile da girasole non irrigato in Toscana nelle annate climaticamente sfavorevoli (10° percentile) e favorevoli (90° percentile), impiegando per ciascun comune i terreni ritirati dalla produzione.

Alcune considerazioni sono di seguito riportate, partendo dal presupposto che nel Piano di Indirizzo Energetico Regionale, l'obiettivo produttivo di biocarburanti da colture dedicate indicato, è di 108 ktep.

Dalle analisi emerge che l'impiego dei circa 50000 ha di terreni ritirati dalla produzione può contribuire in maniera differente al raggiungimento di questo obiettivo a seconda della coltura e dell'intensità di coltivazione.

In particolare risulta che da girasole possiamo ottenere produzioni in olio vegetale puro che coprono a seconda degli anni una quota degli obiettivi compresa fra il 4% e il 9%. Per l'etanolo da mais possiamo, invece, coprire una quota compresa fra il 38% e il 50% (Fig. 1.8).

Occorre però considerare che l'impiego di coltivazioni irrigate richiede disponibilità di acqua onde non entrare in competizione con le attuali colture irrigate. A seconda dei sistemi irrigui impiegati, rotolone o pivot, e quindi dell'efficienza d'irrigazione e a seconda dell'annata considerata è stato stimata una necessità di acqua che varia fra 126 milioni di m³ e 159 milioni di m³.

Per la produzione di etanolo va, inoltre, aggiunta l'acqua necessaria per il processo di trasformazione che a seconda della produzione annua varia fra 5 e 7 milioni di m³.

In sintesi la produzione di olio vegetale puro da girasole permette di soddisfare solo una quota esigua delle necessità individuate dal Piano di Indirizzo Energetico Regionale, mentre il mais irriguo consente di raggiungere obiettivi migliori ma richiede una quantità di acqua attualmente non disponibile. Per soddisfare questa esigenza occorrerebbe quindi

aumentare la capacità d'invaso e stoccaggio dell'acqua sia con grandi invasi sia con laghetti collinari.

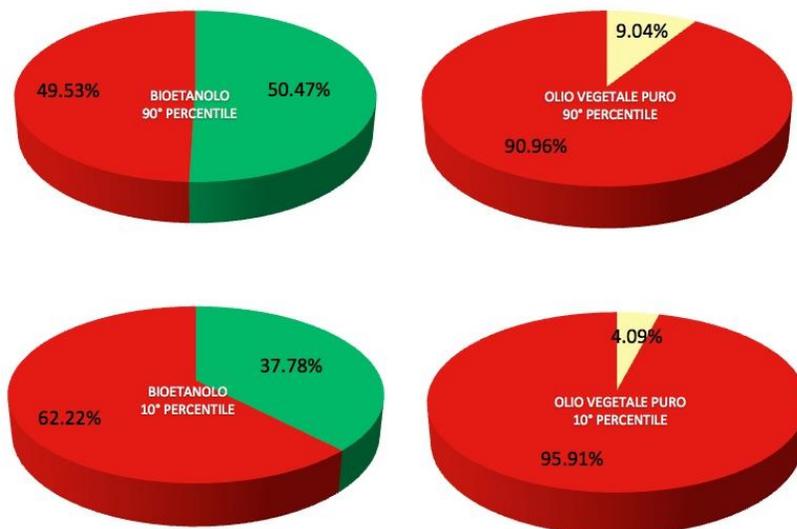


Figura 1.8 - Possibile contributo dei biocarburanti producibili in toscana nei terreni ritirati dalla produzione, rispetto agli obiettivi regionali (108 Ktep/anno), in anni climaticamente favorevoli e sfavorevoli. Il bioetanolo è considerato prodotto da mais irrigato, l'olio vegetale puro è considerato prodotto da girasole senza irrigazione.

1.4 Biomasse residuali nel settore agricolo

Il settore agroforestale produce una grande quantità di residui organici che in parte rientrano nei cicli produttivi come sottoprodotti in altri casi vanno a costituire scarti di processo che devono essere gestiti e/o smaltiti. Il problema del loro riutilizzo in agricoltura è sentito già da molto tempo, tanto che nel 1915 la casa editrice Hoepli pubblicava un manuale intitolato “Residui Agricoli – utilizzazione e recuperi – cascami di fibre tessili, residui vegetali, residui animali” per suggerire le possibili utilizzazioni dei residui e dei sottoprodotti derivanti da agricoltura e agroindustria. Nel panorama attuale le biomasse costituiscono un interessante prospettiva per la produzione di energia e per il raggiungimento dell’obiettivo strategico nazionale di produzione del 17% di energia da fonti rinnovabili

Con questa ricerca si vuole fornire un quadro completo, rivisitato in chiave moderna, delle differenti tipologie di biomasse che possono derivare direttamente od indirettamente dalle attività agricole e forestali e delle caratteristiche e informazioni utili per la loro conversione energetica. Dall’analisi emerge che le fonti di provenienza possono essere molteplici e che le caratteristiche chimico-fisiche delle varie tipologie di biomasse sono estremamente differenti, ma questo elemento attualmente non costituisce un limite alla loro trasformazione attraverso processi di conversione energetica siano essi di tipo fisico, biochimico o termochimico.

Il principale limite è attualmente rappresentato dall’elevata polverizzazione delle proprietà, e quindi dei residui che ciascuna azienda ha a disposizione, che spesso impedisce la convenienza economica di un recupero sistematico effettuato con appropriate macchine operatrici e con sistemi logistici di movimentazione organizzati. In tal senso è auspicabile la nascita di un mercato organizzato con lo stesso modello utilizzato per le biomasse alimentari, quindi con molti punti di ritiro e concentrazione delle produzioni ben distribuiti nel territorio. Per i residui delle coltivazioni può essere auspicabile anche la nascita di una figura nuova quale il contoterzista che si dedica a questa attività e che ricava parte della marginalità dalla valorizzazione economica del sottoprodotto e parte dal servizio di gestione dei residui reso all’azienda.

Le biomasse possono essere utilizzate per produrre biocombustibili solidi, liquidi o gassosi.

1.4.1 Tipologie e fonti di provenienza

Il settore agroforestale produce una grande quantità di residui organici che in parte rientrano nei cicli produttivi come sottoprodotti in altri casi vanno a costituire scarti di processo che devono essere gestiti e/o smaltiti.

Le principali fonti di provenienza sono costituite dall'attività forestale, agricola di coltivazione e allevamento oltre che dall'industria di trasformazione. In particolare possiamo riassumere le principali categorie come di seguito:

- agricoltura:
 - residui delle coltivazioni erbacee (paglie cereali, paglie colza, stocchi girasole, stocchi e tutoli mais, foglie barbabietola da zucchero, steli tabacco, ecc.);
 - residui delle coltivazioni arboree (patature di fruttiferi, olivo, fruttiferi a guscio, sarmenti vite, ecc.);
 - deiezioni degli allevamenti (letame e liquami di suini, bovini, ovini, caprini, avicoli, cunicoli, ecc.);
- foreste:
 - residui delle utilizzazioni destinate a legna da ardere (ramaglia, cimali, ecc.)
 - residui della prima lavorazione del legno da opera (segatura, trucioli, refili, sciaveri, ecc.);
- agroindustria:
 - residui oleifici (sanse, folie)
 - residui cantine (vinacce, raspi)
 - residui industria conserviera (semi, buccette, foglie, gusci, noccioli, ecc.);
 - residui zuccherifici (melasso, fettucce).

Tutte le categorie di biomassa elencate sono una risorsa distribuita sul territorio toscano; e ciò può rappresentare un punto di forza per lo sviluppo di un sistema di micro generazione distribuita, oppure necessità di essere concentrata per essere utilizzata da impianti di dimensioni maggiori.

1.4.2 Residui delle coltivazioni arboree ed erbacee

1.4.2.1 La stima delle potenzialità e delle disponibilità

La stima delle potenzialità in biomasse lignocellulosiche residuali prodotte nel territorio toscano fornisce un utile quadro conoscitivo per il supporto allo sviluppo delle filiere bioenergetiche.

Per una corretta valutazione delle risorse presenti occorre effettuare prima una stima delle potenzialità, ossia della quantità totale che annualmente viene prodotta, per poi quantificare quanta di questa può essere effettivamente resa disponibile dal comparto agroforestale.

La stima delle potenzialità può essere fatta quantificando le superfici coltivate, le produzioni medie che annualmente si hanno, le produttività delle differenti colture sul territorio toscano, ecc. Queste produzioni potenziali medie prescindono da fattori influenti quali l'influenza climatica sul ciclo vegeto produttivo delle piante, le superfici annualmente coltivate e le politiche di mercato.

Il valore stimato fornisce quindi un'indicazione di massima che può variare notevolmente di anno in anno.

Anche il passaggio a biomasse effettivamente disponibili risente di molte variabili, spesso non prevedibili, quali l'attuale utilizzo del sottoprodotto, il prezzo per impieghi alternativi, il costo di recupero e del trasporto, il frazionamento delle proprietà e quindi la difficoltà nel recupero di piccole quantità, ecc.

La stima delle biomasse residuali lignocellulosiche, di coltivazioni arboree ed erbacee, è stata effettuata a partire dalle superfici coltivate a differenti colture riportate nelle statistiche ISTAT e nell'indagine statistica prodotta da ARTEA.

I dati ISTAT impiegati sono riferiti alle superfici annualmente coltivate a livello provinciale, nel periodo 1999-2009, al fine di ottenere un valore medio rappresentativo e slegato da eventi climatici od economici che hanno influito sulle superfici coltivate di particolari anni.

I dati ARTEA sono, invece riferiti ad un unico anno, il 2006, e sono stati presentati nella newsletter n°30 "Domanda Unica 2007 Superfici Dichiarate". Le superfici sono quindi riferibili alle aziende che hanno presentato la DUA, che ai fini di questo studio rappresentano le aziende più reattive per il potenziale recupero dei residui.

I valori di produttività ad ettaro ricavati da studi bibliografici ed in particolare dal CESTAAT (Centro Studi sull'Agricoltura, l'Ambiente e il Territorio) sono stati, quindi, utilizzati per calcolare le produzioni potenziali

per ciascuna provincia toscana. Per vite ed olivo sono stati inoltre effettuate misure dirette, poi confrontate con i dati bibliografici.

Per standardizzare le informazioni tutti i valori di produzione sono riportati in termini di unità di peso di sostanza secca (s.s.). Le potenzialità produttive sono, quindi, state espresse in termini di tonnellate di sostanza secca lignocellulosica (tss/anno) producibili ogni anno in ciascuna provincia o comune.

Le categorie analizzate sono:

- Paglie di cereali (comprendente frumento tenero e duro, orzo, avena, segale, riso, sorgo, altri)
- Stocchi di girasole
- Stocchi e tutoli di mais
- Sarmenti di vite
- Potature di olivo
- Potature di fruttiferi (comprendente melo, pero, albicocco, susino, pesco, ciliegio, etc.)

1.4.2.2 Aspetti logistici ed ambientali

Da un punto di vista etico l'impiego di questa tipologia di biomasse risulta virtuosa in quanto non va ad intaccare minimamente le superfici destinate ad uso alimentare. Il loro effettivo utilizzo è però ancora lontano, a causa di motivi organizzativi, logistici e burocratici più ancora che per cause economiche.

A tale riguardo la logistica di recupero, trasporto e conservazione delle potature di vite ed olivo non è ancora stata analizzata nel dettaglio, mentre molti passi avanti sono stati fatti nel campo forestale sia per le tecniche di produzione di cippato sia per quelle di allestimento del cantiere. Il recupero delle potature richiede una logistica differente da quella forestale dato che siamo di fronte a biomasse meno dense nel territorio (circa 15 q/ha per vite ed olivo a fronte di 600-1000 q/ha per cedui) e presenti tutti gli anni. Questa differenza non permette l'allestimento di cantieri troppo complessi, ma piuttosto risulta necessaria una meccanizzazione idonea alla riduzione dei costi di recupero, di travaso e di trasporto. Attualmente in bibliografia non sono presenti lavori articolati che analizzino la filiera in maniera completa, così come invece avviene per la parte forestale. Abbiamo quindi valutazioni effettuate sulla base di indici o su misure effettuate per singole parti del sistema. Nel campo forestale sappiamo, infatti, che l'estrazione dal bosco e il trasporto fino all'utente finale possono incidere per oltre la metà del costo totale (Stampfer e Kanzian, 2006; Mitchel, 1995; Picchi e Spinelli, 2009).

Dal punto di vista ambientale l'impiego energetico dei residui di potatura delle coltivazioni arboree, quali olivo, vite e fruttiferi risulta auspicabile. Gli aspetti da tener presente per valutare la sostenibilità ambientale delle biomasse solide riguardano, infatti, le emissioni legate: all'estrazione o coltivazione della materia prima, al cambiamento negli stock di carbonio del suolo, ai processi di trasformazione, trasporto e distribuzione, alla combustione al momento dell'uso. In tale ottica ben si intende come le biomasse legnose, derivanti da potature, assumano un elevato valore ambientale poiché non implicano un cambio d'uso del suolo, e quindi una possibile riduzione del serbatoio di carbonio del terreno, non comportano per la loro coltivazione input energetici aggiuntivi al sistema produttivo, al contrario delle biomasse dedicate e richiedono per le tipiche fasi della trasformazione (es. cippatura e pellettizzazione) un minore consumo energetico rispetto ai processi necessari alla produzione dei biocarburanti. Pertanto, come evidenziato dalla relazione dell'Unione Europea, se si utilizzano residui legnosi, forestali o agricoli, il taglio di GHG è elevato e corrisponde in generale a un valore superiore all'80% rispetto ai combustibili fossili. D'altro canto però, in relazione alla bassa densità energetica e agli elevati volumi della materia prima, un aspetto critico è rappresentato dalle emissioni di GHG necessarie per movimentare, trasportare e distribuire la biomassa legnosa dalle aree di approvvigionamento ai punti di utilizzo. Un ulteriore aspetto critico riguarda l'impiego dei residui di coltivazioni erbacee, quali paglie, stocchi di girasole, stocchi e tutoli di mais, che va in diretta concorrenza con il principale apporto di sostanza organica al terreno e quindi con lo stoccaggio del carbonio nel terreno e con la principale risorsa di fertilità biologica dei nostri suoli. Tali aspetti vanno quindi ad evidenziare la necessità, al fine di mantenere la sostenibilità ambientale di valorizzare l'impiego delle potature di arboree e di valutare meglio l'impiego dei residui delle coltivazioni erbacee. Per la prima tipologia, inoltre, risulta utile la valorizzazione nell'ambito di filiere corte che prevedano l'impiego di modelli logistico-gestionali capaci di minimizzare i costi energetici legati al trasporto e distribuzione del prodotto sul territorio.

Infine, se si considera che i costi in termini di emissioni di GHG sono primariamente correlati ai costi energetici e che gli input energetici sono direttamente implicati nella determinazione dei costi di produzione, trasporto e distribuzione del prodotto, risulta chiaro come la sostenibilità economica della produzione ed impiego di biomasse legnose a scopi energetici segua di pari passo quella ambientale. Pertanto, trovare soluzioni ai limiti energetici-ambientali equivale a fornire incentivi allo sviluppo del relativo mercato e al

superamento dei vincoli di natura economica per i soggetti coinvolti nella filiera.

1.4.2.3 Le superfici e le disponibilità delle principali categorie

Dalle analisi delle superfici coltivate emerge una forte concentrazione delle coltivazioni erbacee nelle province di Siena e Grosseto, soprattutto legate alla forte presenza dei cereali (Tab. 1.4).

Per quanto riguarda le superfici investite a coltivazioni arboree la provincia di Firenze risulta quella con le maggiori potenzialità, seguita dalla provincia di Siena (Tab. 1.5).

Province	Frumento tenero (ha)	Frumento duro (ha)	Segale (ha)	Orzo (ha)	Avena (ha)	Riso (ha)	Sorgo (ha)	Altri cereali (ha)	Mais (ha)	Girasole (ha)	Seminativi superfici (ha)
	Medie 1999-2009	Medie 1999-2009	Medie 1999-2009	Medie 1999-2009	Medie 1999-2009	Medie 1999-2009	Medie 1999-2009	Medie 1999-2009	Medie 1999-2009	Medie 1999-2008	Medie 1999-2009
Massa-Carrara	362	0	0	29	0	0	0	3	1065	0	1459
Lucca	116	129	35	143	15	0	7	168	2897	385	3895
Pistoia	190	29	17	81	89	14	0	88	2277	506	3291
Firenze	3770	6527	73	2592	775	0	279	597	5504	3664	23781
Livorno	1697	11179	22	995	835	0	394	68	780	2357	18326
Pisa	3191	21619	2	1150	1723	1	142	108	4600	5440	37975
Arezzo	3908	4666	95	2591	409	0	288	0	1521	5217	18695
Siena	8971	41115	7	2853	2281	135	330	146	2935	8144	66917
Grosseto	3047	45426	117	4492	4492	257	128	0	1768	8567	68294
Prato	251	373	0	72	29	0	67	1	277	318	1388

Tabella 1.4 - Superfici medie annualmente coltivate a differenti tipologie di coltivazioni erbacee nelle province della Toscana, da statistiche ISTAT.

Province	Melo (ha)	Pero (ha)	Albicocca (ha)	Ciliegio (ha)	Pesco (ha)	Nettarina (ha)	Susino (ha)	Nocciole (ha)	Mandorle (ha)	Actinidia (ha)	Fruttiferi superfici (ha)
	Medie 1999-2009										
Massa-Carrara	38	15	2	15	12	0	10	7	0	0	99
Lucca	75	67	16	18	71	7	43	0	0	12	309
Pistoia	28	42	0	0	34	0	15	0	0	20	140
Firenze	133	106	95	4	331	41	98	15	0	59	883
Livorno	35	29	41	14	283	46	52	0	0	5	484
Pisa	71	68	49	46	398	40	48	14	4	17	756
Arezzo	373	228	16	0	226	47	18	0	0	32	940
Siena	24	28	0	2	51	7	92	1	0	0	205
Grosseto	41	99	36	24	175	92	81	7	1	12	568
Prato	4	1	5	0	3	1	0	0	0	0	14

Tabella 1.5 - Superfici medie annualmente coltivate a differenti tipologie di coltivazioni arboree nelle province della Toscana, da statistiche ISTAT.

I valori di produzione annua per ciascuna tipologia di residuo analizzata sono di seguito riportati in forma cartografica. I risultati sono riferiti alla biomassa totale che ogni coltivazione produce come residuo. Occorre considerare che il recupero implica delle decurtazioni dovute principalmente all'attuale utilizzo di parte di queste biomasse, alla difficoltà legata alle piccole superfici coltivate, alla distanza fra luogo di produzione e centri di raccolta o utilizzo ecc.

Dai dati ISTAT emerge che i seminativi coltivati sono calati di circa 107000 ha dal 1999 al 2009 (Fig. 1.9). Gli arboreti sono calati di circa 8000 ha (Fig. 1.10)

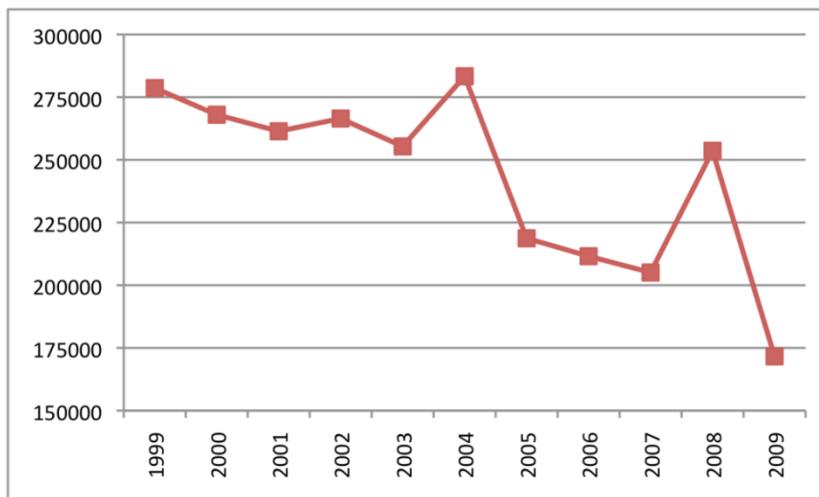


Figura 1.9 - Andamento delle superfici seminate a frumento, segale, orzo, avena, riso, cereali minori, mais, girasole, in Toscana nel periodo 1999-2009 (fonte dati ISTAT).

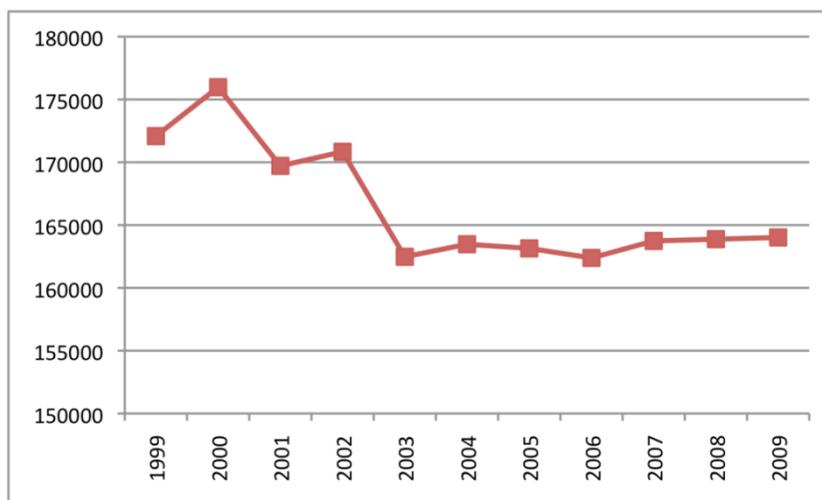


Figura 1.10 - Andamento delle superfici seminate a melo, pero, albicocco, ciliegio, pesco, nettarina, susino, nocciolo, mandorlo, actinidia, olivo, vite in Toscana nel periodo 1999-2009 (fonte dati ISTAT).

ARBOREE	Vite	Olivo	Fruttiferi	Frutta in guscio
ISTAT 1996-2009	65146	72422	3898	44
ARTEA 2007	46549	70868	3264	228
ERBACEE	Frumento tenero e duro	Orzo e Avena	Mais	Girasole
ISTAT media 2006-2009	130392	30296	20682	25052
ARTEA 2007	126585	39300	21698	19936

Figura 1.11 - Confronto fra le superfici investite a differenti colture secondo quanto riportato dalle statistiche ISTAT per il periodo 2006-2009 e dall'indagine ARTEA effettuata sulla base dei dati DUA 2007.

Paglie di cereali:

Le paglie di cereali sono maggiormente concentrate nelle province di Siena e Grosseto dove le superfici coltivate oscillano mediamente fra 50000 e 60000 ettari.

Attualmente l'impiego prevalente è nel settore zootecnico sia come lettiera per il ricovero degli animali, sia per l'alimentazione nel settore mangimistico. La quantità utilizzata è difficilmente stimabile ed è variabile sia nel tempo sia nei differenti territori. Si può ipotizzare che la quota di paglie utilizzata a scopi zootecnici oscilli fra il 30 ed il 50%. La restante parte è attualmente triturata e lasciata nel terreno dove l'apporto di questa frazione organica, seppure ad elevato rapporto carbonio/azoto e quindi meno umificabile, costituisce un prezioso contributo alla fertilità.

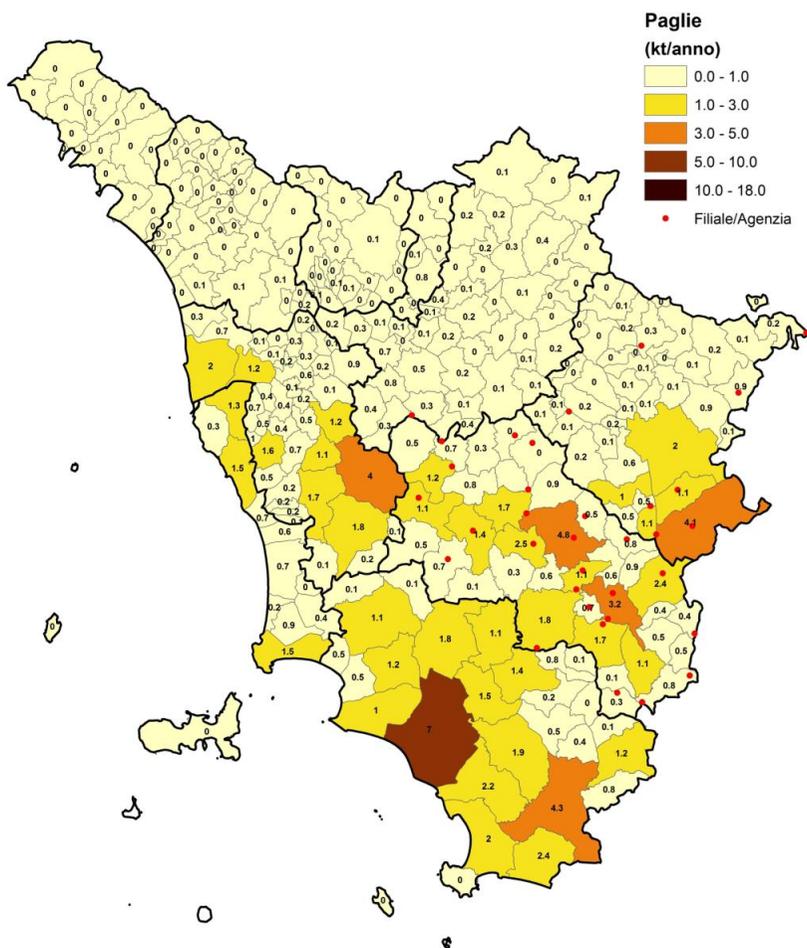


Figura 1.12 – Carta della disponibilità effettive di paglie di cereali in Toscana.

Stocchi di girasole:

per i residui del girasole le province più vocate sono quelle di Siena e Grosseto ove annualmente si coltivano 8000-9000 ettari e si producono oltre 17000 tonnellate di residui.

Attualmente questi residui restano nel terreno e vanno ad incrementare la frazione organica ed in particolare quella umica, grazie al loro equilibrato rapporto carbonio azoto. L'asportazione di questi residui è quindi sconsigliabile, tanto più perché questa coltura viene spesso messa in rotazione come coltura da rinnovo capace di aumentare la fertilità dei suoli dopo la coltivazione di colture depauperanti.

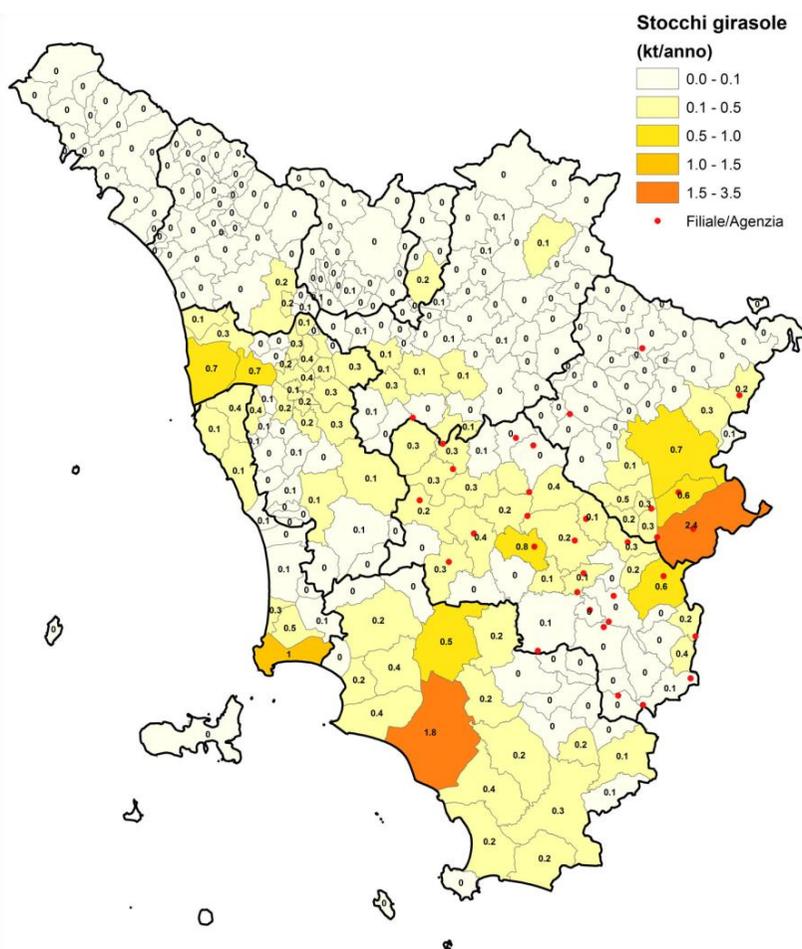


Figura 1.13 – Carta della disponibilità effettive di stocchi di girasole nelle province della Toscana (valori medi del periodo 1999-2008).

Stocchi e tutoli di mais

Nel nostro territorio il mais è coltivato soprattutto per l’ottenimento della granella, quindi i dati delle superfici coltivate sono principalmente riferibili a coltivazioni che lasciano stocchi e tutoli come residuo. Questi solo in rare occasioni sono impiegati nella filiera zootecnica per le lettiere o per l’alimentazione. Attualmente i residui vengono interrati e come nel caso del girasole vanno ad incrementare la frazione organica ed in particolare quella umica, grazie al loro equilibrato rapporto carbonio azoto. Il loro impiego ad uso energetico deve quindi essere ben valutato.

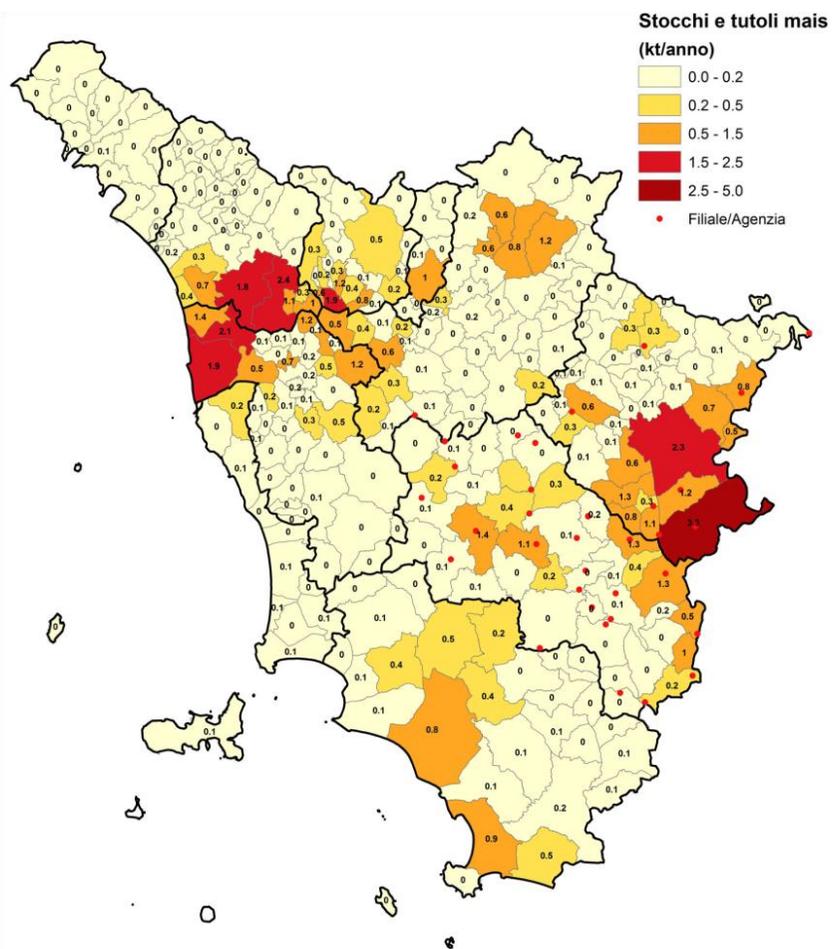


Figura 1.14 – Carta della disponibilità potenziale di stocchi e tutoli di mais nelle province della Toscana (valori medi del periodo 1999-2009).

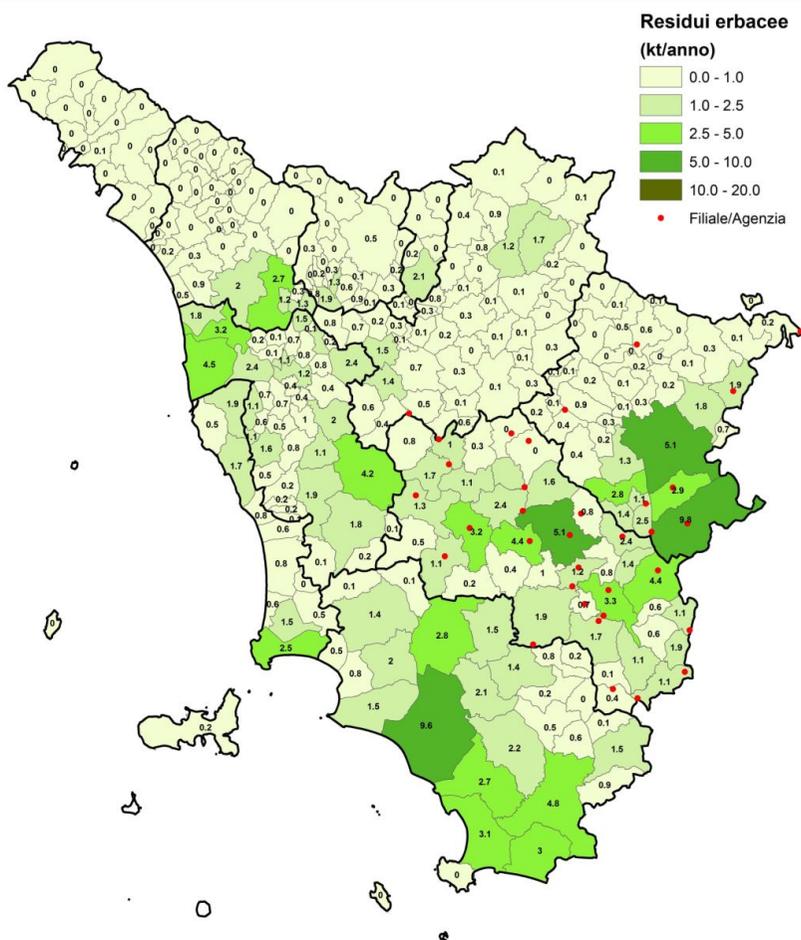


Figura 1.15 - Carta della disponibilità potenziale stimata dei residui delle colture erbacee in Toscana.

Sarmenti di vite:

Le province di Firenze e di Siena risultano fra le più vocate per quanto riguarda questa tipologia di residui. Questi due territori hanno circa 17000 ettari coltivati ciascuno con una produzione potenziale stimata in circa 28000 tonnellate.

Attualmente questi residui vengono trinciati ed interrati in loco o più spesso allontanati e bruciati. Quest'ultima pratica è molto diffusa soprattutto a causa delle indicazioni che sono state date in tal senso negli anni passati al fine di prevenire le malattie, prima fra tutte il mal dell'esca. Il loro impiego energetico risulta quindi, anche dal punto di vista agronomico, virtuoso.

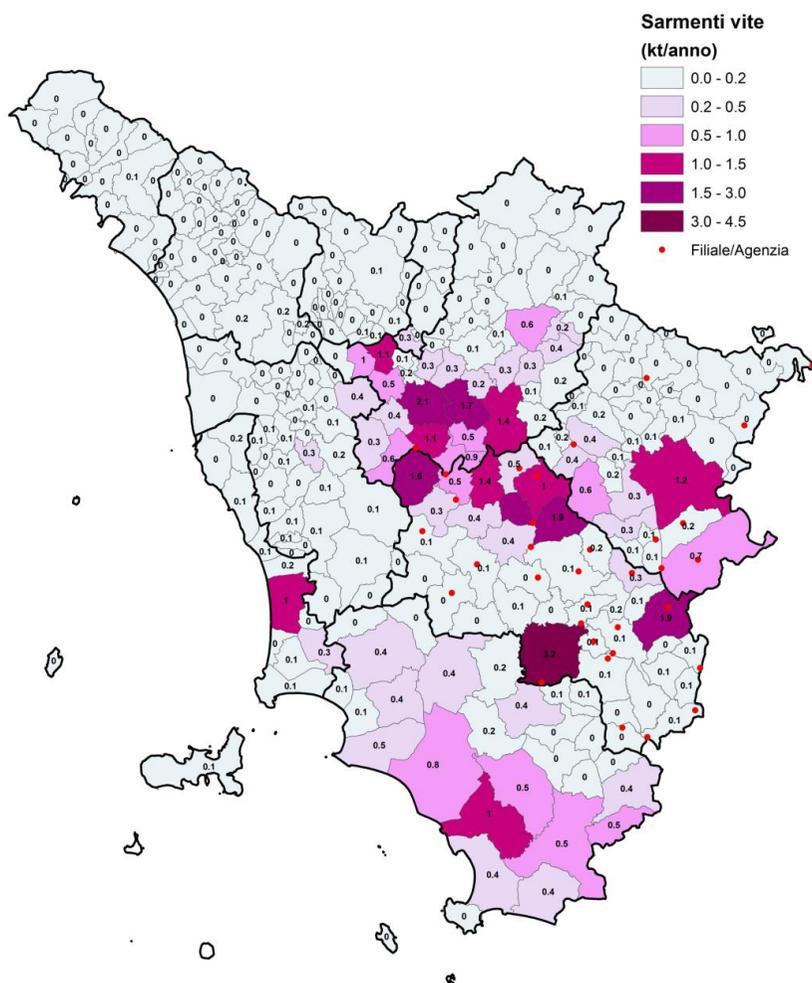


Figura 1.16 – Carta della disponibilità effettive di sarmenti di vite in Toscana.

Potature di olivo:

Per l'olivicoltura la provincia di Firenze è attualmente quella con maggiore superficie coltivata, con circa 27000 ettari di oliveti presenti. Per questa coltura è molto difficile valutare la produttività in termini di residui di potature, vista l'estrema eterogeneità nei sistemi di allevamento che vedono differenti sestri d'impianto, intensità di coltivazione, vigorosità, etc. Si stima che nella provincia di Firenze la produttività potenziale sia di circa 38000 tonnellate. Attualmente dalle potature viene recuperata la legna di maggiore pezzatura mentre frasche e legna minuta vengono trinciate ed interrate in loco o più spesso allontanate e bruciate. Quest'ultima pratica è molto diffusa

soprattutto a causa delle indicazioni che sono state date in tal senso negli anni passati al fine di prevenire le malattie, prima fra tutte la rogna dell'olivo.

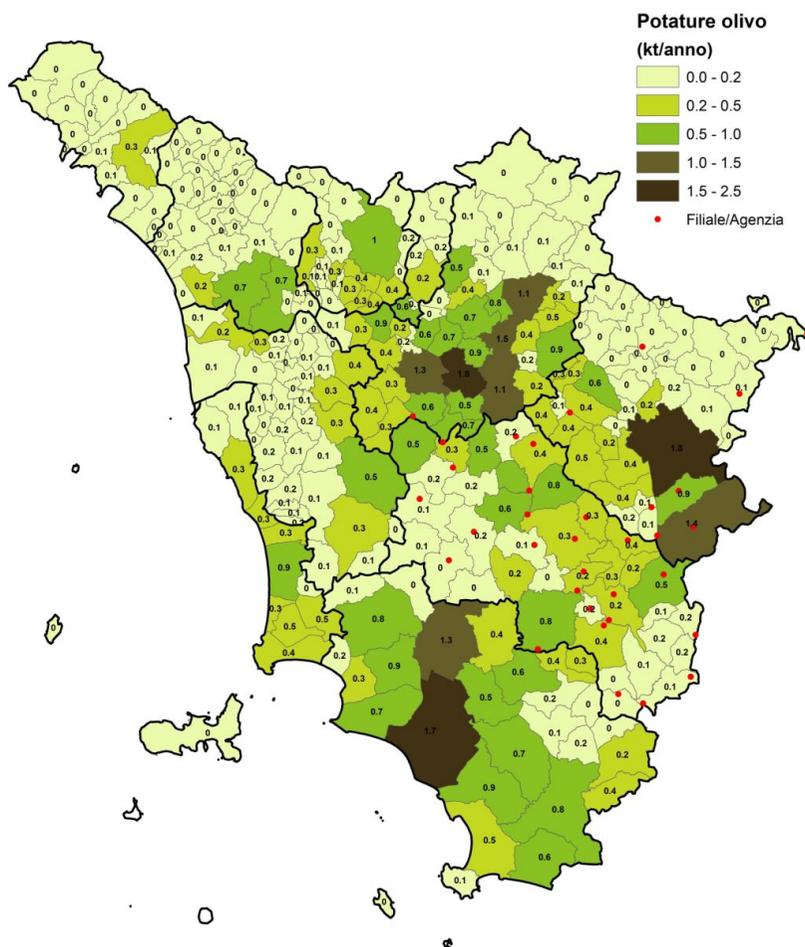


Figura 1.17 – Carta della disponibilità effettive di potature di olivo in Toscana.

Potature di fruttiferi:

Le superfici fruttare a melo, pero, pesco, ciliegio, nettarina, susino, albicocco, nocciolo, mandorlo, actinidia in provincia di Firenze sono 883 ettari, di Pisa 756 ettari e di Arezzo 940 ettari. Considerando le relative produttività in residui di potatura invernale otteniamo produzioni annue di sostanza secca superiori a 1000 tonnellate su ciascuna di queste province. Attualmente dalle potature viene recuperata la legna di maggiore pezzatura mentre legna minuta e rami vengono trinciati ed interrati in loco o più spesso allontanati e bruciati. Quest'ultima pratica è molto diffusa soprattutto a causa

delle indicazioni che sono state date in tal senso negli anni passati al fine di prevenire le differenti malattie. Il loro impiego energetico risulta quindi, anche dal punto di vista agronomico, virtuoso.

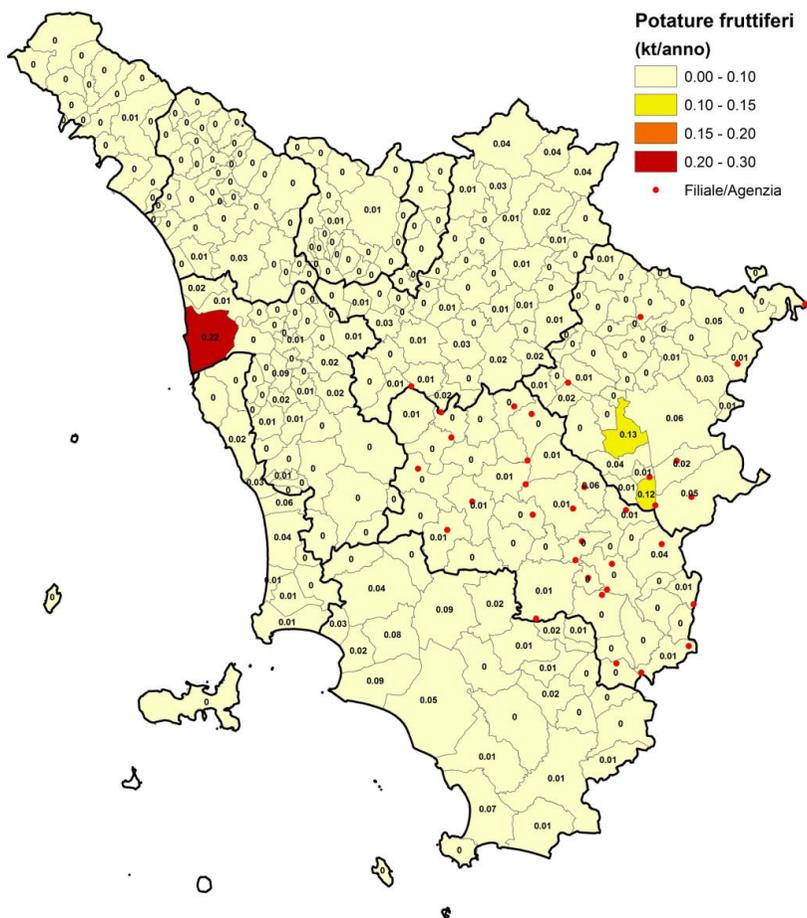


Figura 1.18 – Carta della disponibilità effettive di potature di olivo in Toscana.

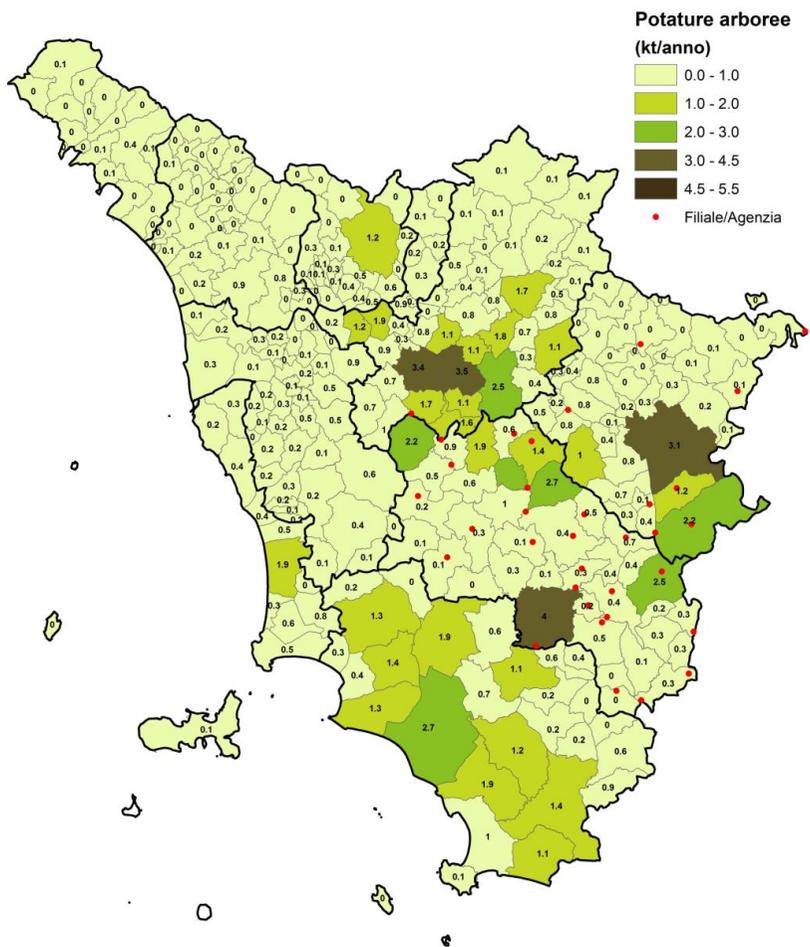


Figura 1.19 – Carta della disponibilità effettive di potature di arboreti in Toscana.

1.5 Biomasse dal settore forestale

L'analisi della biomassa forestale potenzialmente producibile è stata effettuata tramite uno studio condotto nella parte settentrionale della Provincia di Siena (Fig.1.20). La disponibilità di biomassa forestale è stata stimata a partire da una serie di strati informativi georeferenziati per il territorio in questione.

L'attenzione è stata focalizzata sull'inquadramento dei boschi di querce caducifoglie ripartiti in legna da ardere e in residui delle utilizzazioni forestali.

La metodologia utilizzata ha previsto diverse fasi operative quali: la produzione di una cartografia forestale; i rilievi a terra; la compartimentazione forestale; la stima della densità della rete viaria; la stima della provvigione reale e infine la stima della biomassa disponibile.

I risultati ottenuti sono stati creati ed esaminati prendendo in considerazione due scenari, uno di tipo produttivo e l'altro di tipo protettivo/conservativo.

Dai risultati è emersa la provvigione reale, ossia 7.628.207,3 m³, inoltre anche la stima per comune della disponibilità annua (Fig. 1.21).

Ulteriori indagini indicano la stima spazializzata all'interno del territorio in esame.

La visione dello studio completo è riportata in allegato 1.

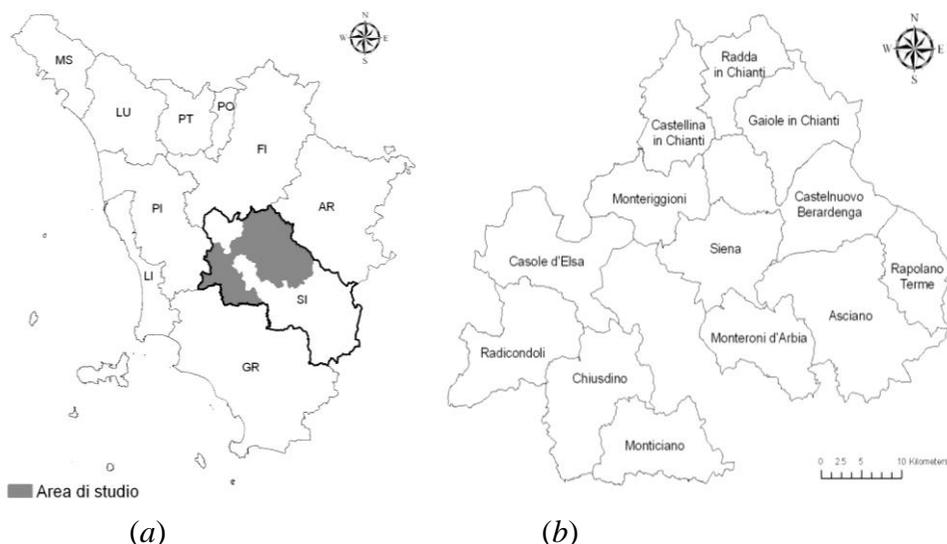


Figura 1.20 - Localizzazione dell'area di studio in Provincia di Siena (a) e comuni inclusi nell'area (b).

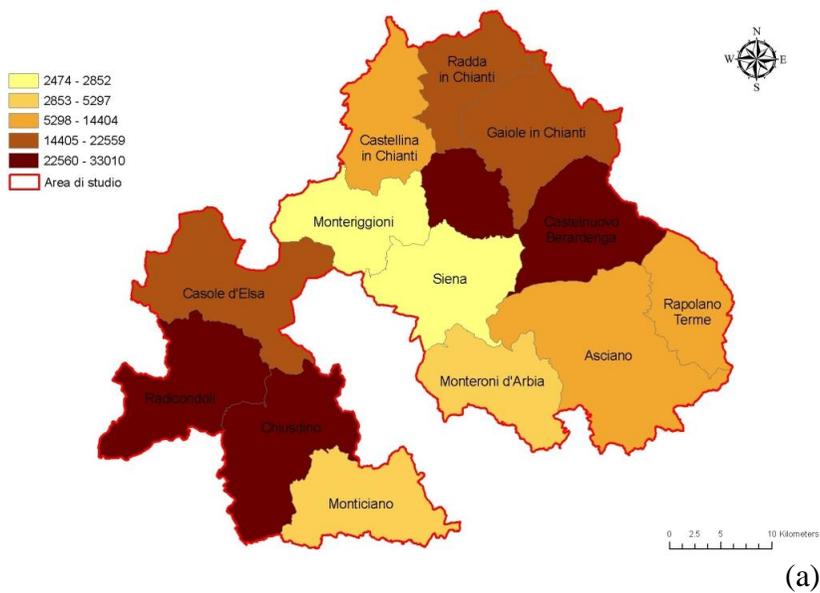


Figura 1.21 - Scenario B: stima per comune della disponibilità annua di biomassa forestale (in tonnellate) distinta in legna da ardere (a) e in residui delle utilizzazioni forestali (b).

1.6 Conversione energetica

I valori di biomassa potenziale ottenibile dai residui delle principali coltivazioni toscane non sono facilmente comprensibili in termini di possibile contributo alla produzione di energia rinnovabile. Per questo sono stati convertiti in termini energetici ipotizzando il loro impiego in impianti di cogenerazione termoelettrica di piccola taglia.

Per la conversione energetica sono stati presi in considerazione i soli residui delle coltivazioni arboree. I residui delle coltivazioni erbacee, quali paglie, stocchi e tutoli di mais, stocchi di girasole sono, infatti, utilizzati a scopo zootecnico o tritati e lasciati sul terreno e per molti suoli questo apporto di sostanza organica costituisce un prezioso contributo alla fertilità chimica, fisica e biologica. L'impiego energetico di questi residui richiede, quindi, un'attenta valutazione circa i benefici ambientali ottenibili. Molto differente è il ragionamento per le potature di olivo, vite e fruttiferi. Attualmente dalle potature viene recuperata la legna di maggiore pezzatura mentre la restante parte viene trinciata ed interrata in loco o più spesso allontanata e bruciata. Quest'ultima pratica è molto diffusa soprattutto a causa delle indicazioni che sono state date in tal senso negli anni passati al fine di prevenire le malattie delle colture stesse.

Le produzioni potenziali dei residui delle arboree sono state decurtate della quota tecnicamente non recuperabile (perdite di raccolta), della parte di pezzatura maggiore attualmente già recuperata e delle piccole superfici tecnicamente ed economicamente non interessabili dal recupero. E' stato quindi ipotizzato il recupero di circa il 70% delle produzioni potenziali (Tab. 1.6).

	Potature frutteti	Potature oliveti	Sarmenti vite
Residuo effettivamente recuperabile	70%	70%	75%
Potere calorifico inferiore medio(MJ/kgss)	18	18.2	18.4

Rendimento elettrico impianto cogenerazione	18%
Rendimento termico recuperabile	45%

Provincia	Residuo potenziale pot. frutteti	Residuo potenziale pot. oliveti	Residuo potenziale sarmenti vite	Residuo recuperabile	Producibilità annua	
	(t)	(t)	(t)	(t)	elettrica (MWh)	termica (MWh)
Massa-Carrara	109	1216	1855	2318	2117	5293
Lucca	357	4920	2303	5421	4934	12335
Pistoia	167	10589	1793	8874	8065	20162
Firenze	1142	37748	28794	48818	44507	111269
Livorno	670	5731	3919	7419	6757	16893
Pisa	1029	10143	6587	12761	11622	29054
Arezzo	1075	15107	10608	19284	17571	43927
Siena	242	25303	27661	38628	35258	88145
Grosseto	734	24433	12096	26689	24304	60761
Prato	16	2548	572	2225	2023	5057
TOTALE					157158	392896

Tabella 1.6 - Produzione potenziale di energia termica ed elettrica ottenibile dalla termovalorizzazione dei residui di potatura di coltivazioni arboree nelle differenti province della Toscana.

Per la conversione energetica è stato preso in considerazione un cogeneratore di piccole dimensioni con resa elettrica del 18% e termica recuperabile del 45%. I risultati indicano una produzione potenziale annua di circa 157000 MWh elettrici e 392000 MWh termici (Tab. 1.6).

A livello di concentrazione territoriale la produzione potenziale termoelettrica risulta massima nella provincia di Firenze, seguita da Siena e Grosseto (Fig. 1.22), così come il numero di utenze abitative servibili (Fig. 1.23).

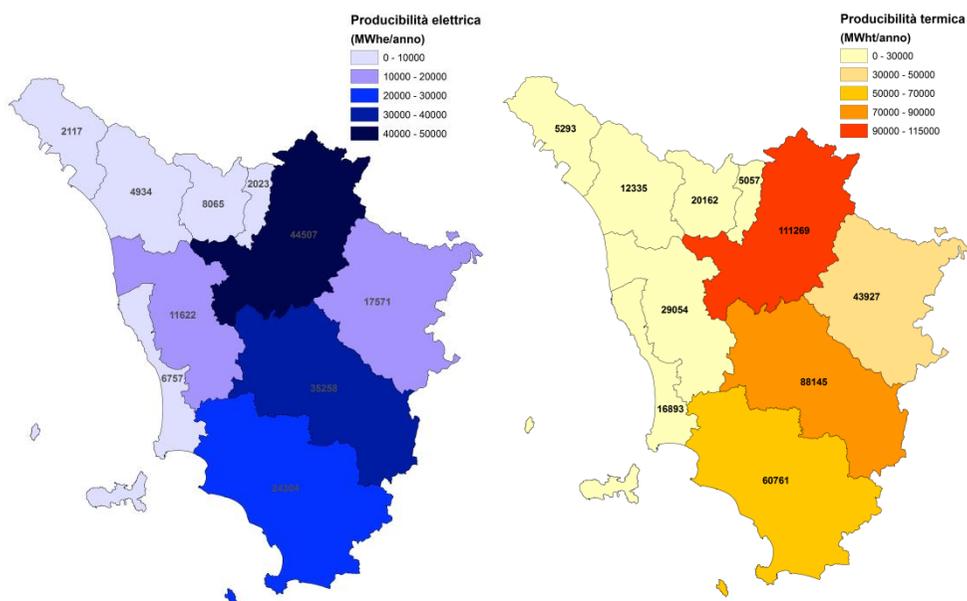


Figura 1.22 – Carta della produzione potenziale elettrica e termica a partire dalle disponibilità in potature di coltivazioni arboree nelle provincie della Toscana.

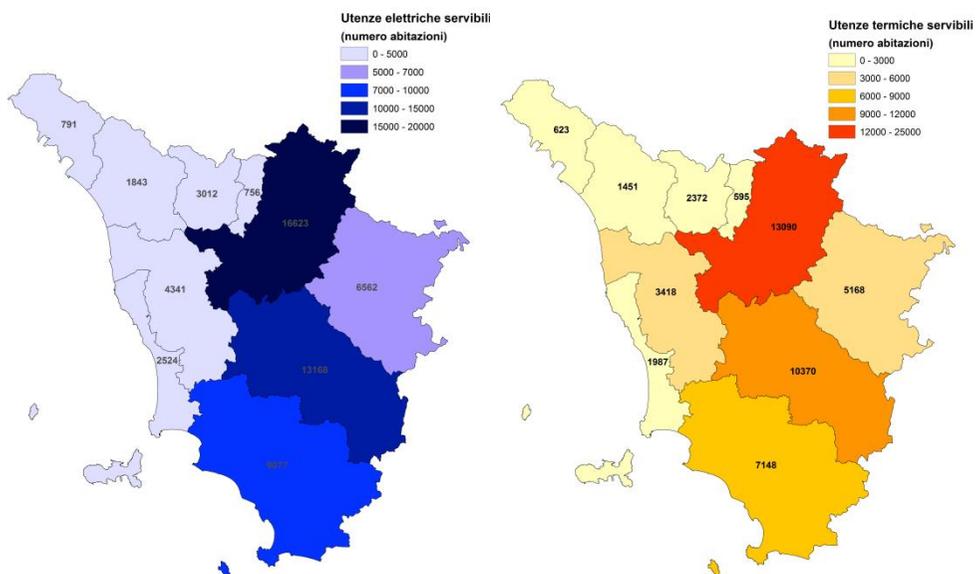


Figura 1.23 – Carta del numero potenziale di utenze residenziali elettriche e termiche servibili a partire dalle disponibilità in potature di coltivazioni arboree nelle provincie della Toscana

I valori ottenuti sono stati tradotti in termini di utenze termiche ed elettriche. Per tale ipotesi sono stati considerati i consumi elettrici e termici medi per m² di abitazione e la superficie media delle abitazioni. Gli indici utilizzati si riferiscono alle elaborazioni dell'AEEG e del Piano Energetico e Ambientale di Scandicci.

Dai risultati emerge la possibilità di soddisfare le esigenze di circa 58000 abitazioni per l'energia elettrica e 46000 per l'energia termica (Tab. 1.7).

Consumo elettrico tipico utenza residenziale (kWh/m2 anno)	31.5
Consumo termico tipico utenza residenziale (kWh/m2 anno)	100
Superficie residenziale considerata per utenza tipica (m2)	85

Provincia	Utenze elettriche servibili	Utenze termiche servibili
	(n°)	(n°)
Massa-Carrara	791	623
Lucca	1843	1451
Pistoia	3012	2372
Firenze	16623	13090
Livorno	2524	1987
Pisa	4341	3418
Arezzo	6562	5168
Siena	13168	10370
Grosseto	9077	7148
Prato	756	595
TOTALE	58696	46223

Tabella 1.7 – Numero di abitazioni che possono essere rese indipendenti per quanto riguarda l'energia termica ed elettrica nelle province della Toscana

2 Modello di filiera per le biomasse residuali legnose

*a cura di
Pietro Pagliuca, Alessio Pianigiani*

2.1 Introduzione

Il ruolo del Consorzio Agrario di Siena, è stato quello di valutare le possibilità di costruire e valorizzare una filiera che partendo da sottoprodotti agricoli ottenga energia.

Il Consorzio rappresenta un'azienda fortemente radicata sul territorio che da sempre svolge in modo capillare l'attività di raccolta e stoccaggio dei cereali, e proprio partendo da questo punto che si può individuare il suo ruolo nella costruzione della suddetta filiera.

Partendo dall'assunto che le biomasse, attraverso l'utilizzo di apposite tecnologie, possono produrre energia termica o elettrica o possono essere utilizzati come biocarburanti, si evidenzia la necessità di gestire e organizzare la raccolta e prima trasformazione.

Il compito del Consorzio Agrario di Siena è stato quello di mettere nel progetto la propria conoscenza del territorio e organizzare appunto la raccolta, lo stoccaggio, la logistica e la valorizzazione delle biomasse da sottoprodotti disponibili sul territorio.

Molteplici sono le possibili fonti da cui approvvigionarsi ma attualmente sono state individuate come fonte principale quella dei sottoprodotti provenienti da: settore forestale e agroforestale e soprattutto dal settore agricolo.

2.2 Il ruolo del Consorzio Agrario di Siena nel comparto agricolo

2.2.1 Attività del Consorzio Agrario di Siena

Il Consorzio Agrario di Siena offre prodotti e servizi al mondo agricolo, tramite:

1. la vendita di mezzi tecnici di produzione come beni di consumo; sementi, fertilizzanti, agrofarmaci, prodotti petroliferi, mangimi, etc.; oppure beni durevoli come: macchine e attrezzature agricole, materiali per l'impiantistica, attrezzature da cantina, etc.

2. lo stoccaggio e la trasformazione dei prodotti agricoli tramite i 31 centri di stoccaggio per quel che riguarda la conservazione e tramite la cantina, il frantoio, il mangimificio e il sementifici per la trasformazione;

3. l'attività di assistenza tecnica essenzialmente tramite la consulenza tecnica nel corso della campagna attraverso la predisposizione degli impianti colturali e la pianificazione negli acquisti dei mezzi tecnici;

4. l'attività di trading come vendita cereali oppure , prodotti agrolimentari attraverso la rete dei negozi alimentari e i ristoranti

5. L'attività Creditizia
il Consorzio Agrario di Siena svolge un importante attività di credito nei confronti del mondo agricolo attraverso l'erogazioni di cambiali agrarie, attraverso l'attività di consulenza e vendita di polizze assicurative agrarie ma anche tramite un credito di medio lungo periodo;

2.2.2 Struttura Territoriale del Consorzio Agrario di Siena

Come già detto il Consorzio Agrario di Siena si caratterizza per un forte radicamento di strutture di servizio nella provincia di Siena e Arezzo (fig. 2.1) ed in particolare la rete infrastrutturale costituita da:

- a) 10.000 mq di spazi commerciali
- b) 50.000 mq di magazzini di merci e 8.000 mq di magazzino macchine
- c) 10.000 mq di depositi carburanti
- d) 10.000 mc di magazzini di stoccaggio in muratura
- e) 150.000mc di silos metallici
- f) 3.000 mq di piazzali attrezzati
- g) 10.000 mq di piazzali esterni

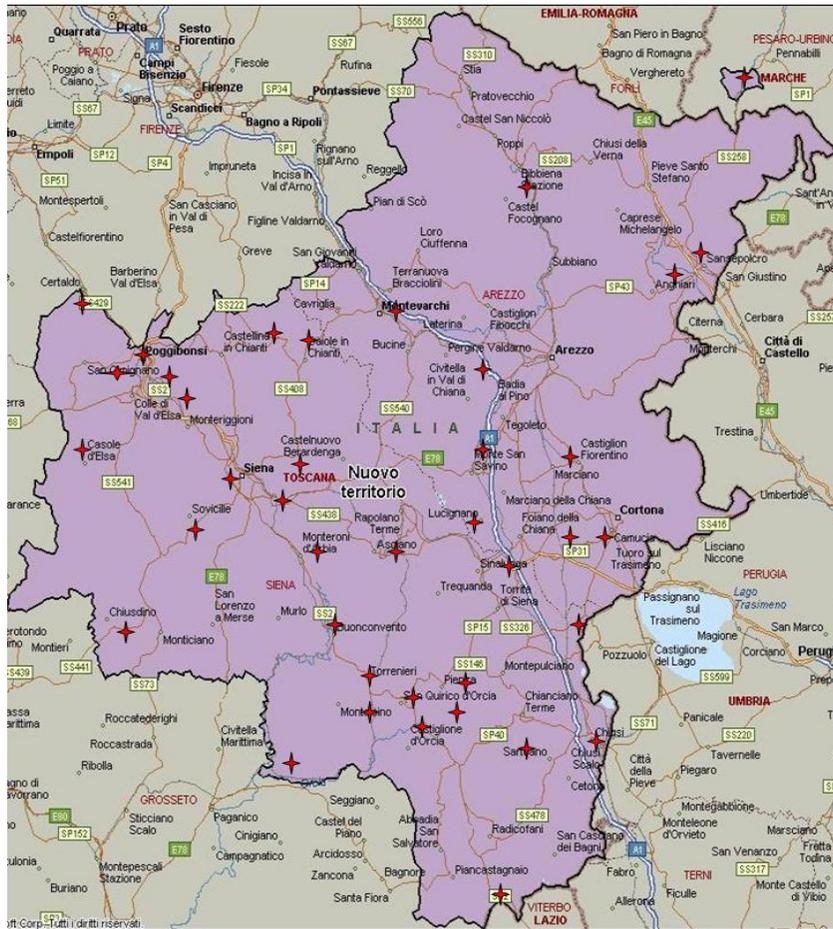


Figura 2.1 – Territorio di competenza del Consorzio Agrario di Siena

2.2.3 Potenziali servizi e attività lungo la catene del valore dell'energia

Per quanto riguarda le biomasse il Consorzio Agrario di Siena può intervenire in tre momenti diversi secondo il seguente schema:

Approvvigionamento

Vendita di materie prime, di mezzi tecnici di produzione (valutazione e servizi di locazione) e consulenza

- ✓ *Selezione del territorio (accordi con gli agricoltori)*
- ✓ *Coltivazione*
- ✓ *Raccolta*
- ✓ *Lavorazione*

Logistica

Vendita di servizi

- ✓ *Trasporti*
- ✓ *Stoccaggio*

Sono vari i modelli di Business a cui il Consorzio Agrario di Siena può decidere o meno di partecipare:

- ✓ *Imprese agricole*
- ✓ *Partner industriali*
- ✓ *Partner istituzionali*

2.3 Il modello organizzativo e logistico

La costruzione di un modello organizzativo parte dall'analisi di ciò che è stato fatto nel campo forestale sia per le tecniche di produzione di cippato sia per quelle di allestimento del cantiere, mentre la logistica di recupero, trasporto e conservazione delle potature di vite ed olivo non è ancora stata analizzata nel dettaglio.

Il recupero delle potature richiede però una logistica differente dato che siamo di fronte a biomasse meno dense nel territorio (circa 15 q/ha per vite ed olivo a fronte di 600-1000 q/ha per cedui) e presenti tutti gli anni. Questa differenza non permette l'allestimento di cantieri troppo complessi, ma piuttosto risulta necessaria una meccanizzazione idonea alla riduzione dei costi di recupero, di travaso e di trasporto. Attualmente in bibliografia non sono presenti lavori articolati che analizzino la filiera in maniera completa, così come invece avviene per la parte forestale. Abbiamo quindi valutazioni effettuate sulla base di indici o su misure effettuate per singole parti del sistema. Nel campo forestale sappiamo, infatti, che l'estrazione dal bosco e il trasporto fino all'utente finale possono incidere per oltre la metà del costo totale (Stampfer e Kanzian, 2006; Mitchel, 1995; Picchi e Spinelli, 2009).

Le problematiche connesse all'ampliamento del bacino di approvvigionamento di cippato, principalmente riconducibili a:

- esigenza di una tecnologia atta alla raccolta, trinciatura e carico del materiale in loco, in grado di consentire l'allestimento di un cantiere semplificato, con costi ridotti in termini di tempo e manodopera, e capace di sfruttare tutto il potenziale disponibile, lavorando quindi anche su potature di pezzatura superiore.
- mancanza di una logistica di movimentazione e trasporto del materiale e di attrezzature e macchinari di taglia e tipologia adeguati, in grado di ridurre tempi e costi delle operazioni necessarie a portare il prodotto dal campo al centro di stoccaggio.
- necessità di avere sul territorio strutture idonee per la ricezione del cippato e quindi in grado di fungere da centro di ritiro per i produttori di cippato.

Si è invece evidenziato l'esigenza, dettata dalla imminente nascita della domanda di biomasse energetiche sul territorio, ed in particolare di cippato e girasole, di aumentare le capacità di immagazzinamento dei suoi centri di stoccaggio con sistemi flessibili ed adattabili alle due differenti tipologie di biomassa, e, parallelamente, di condurre un'adeguata conservazione del materiale per periodi superiori ai 10 mesi, considerato che la produzione di biomassa si concentra in alcuni mesi, marzo-aprile per le potature e agosto-

settembre per il girasole, a fronte di una richiesta di fornitura invece distribuita nel corso di tutto l'anno da parte degli impianti generativi.

L'opportunità di raccogliere le biomasse da potature agricole (vite, olivo, fruttiferi, ecc.) è attualmente limitata dalle capacità di immagazzinamento e dalla messa a punto di adeguate tecniche di conservazione per periodi di almeno 10 mesi.

I tradizionali sistemi, rappresentati da silos verticali o magazzini piani (capannoni), spesso con movimentazione non automatizzata del materiale, hanno dei costi molto elevati che incidono sostanzialmente (fino a circa 2 euro a quintale per un anno) sul costo del prodotto finale. Da qui la necessità di dotarsi di nuove strutture per lo stoccaggio che permettano di risparmiare e consentano d'altro canto la flessibilità di essere spostate nei punti più idonei al fine di facilitare la logistica della raccolta sul territorio.

In quest'ottica risulta interessante pensare alle biomasse con la stessa logica delle "smart grid", ossia delle cosiddette "reti intelligenti", adottata per la distribuzione di energia elettrica. Nel campo elettrico questa nuova tecnologia consente, infatti, agli eventuali surplus di energia di essere ridistribuiti, in modo dinamico ed in tempo reale, dalle zone eccedenti ad altre aree deficitarie. La possibilità di poter stoccare i surplus o movimentarli, secondo un modello dinamico e con criteri gestionali controllabili, permetterebbe di entrare in una logica di rete intelligente assolutamente vantaggiosa tenuto conto che la produttività di biomasse è variabile di anno in anno in funzione di numerosi fattori influenti, primo fra tutti quello climatico. Occorre quindi possedere strumenti di monitoraggio intelligenti per tenere traccia dei flussi di biomassa, sistemi di raccolta e movimentazione flessibili così come modelli contrattuali che supportino la realizzazione di una filiera strutturata con agricoltori e contoterzisti, imprese di servizi per ritiro e stoccaggio e imprese trasformatrici.

Il Consorzio Agrario di Siena dispone sul territorio di una rete di 52 agenzie che distano tra di loro per non più di 25-30 km, questo permette alla struttura di coprire in modo capillare l'intero comprensorio delle province di Siena ed Arezzo.

L'idea è stata quella di utilizzare la rete consortile per costruire i punti di riferimento di stoccaggio e lavorazione dei residui colturali da utilizzare come fonte energetica.

Molte filiali o agenzie del Consorzio hanno superfici scoperte ampie da poter utilizzare come depositi temporanei di materiali e dove le superfici esterne non lo consentono è possibile utilizzare parte delle strutture piane.

Il funzionamento della filiera potrebbe essere quello riportato in figura 2.2.

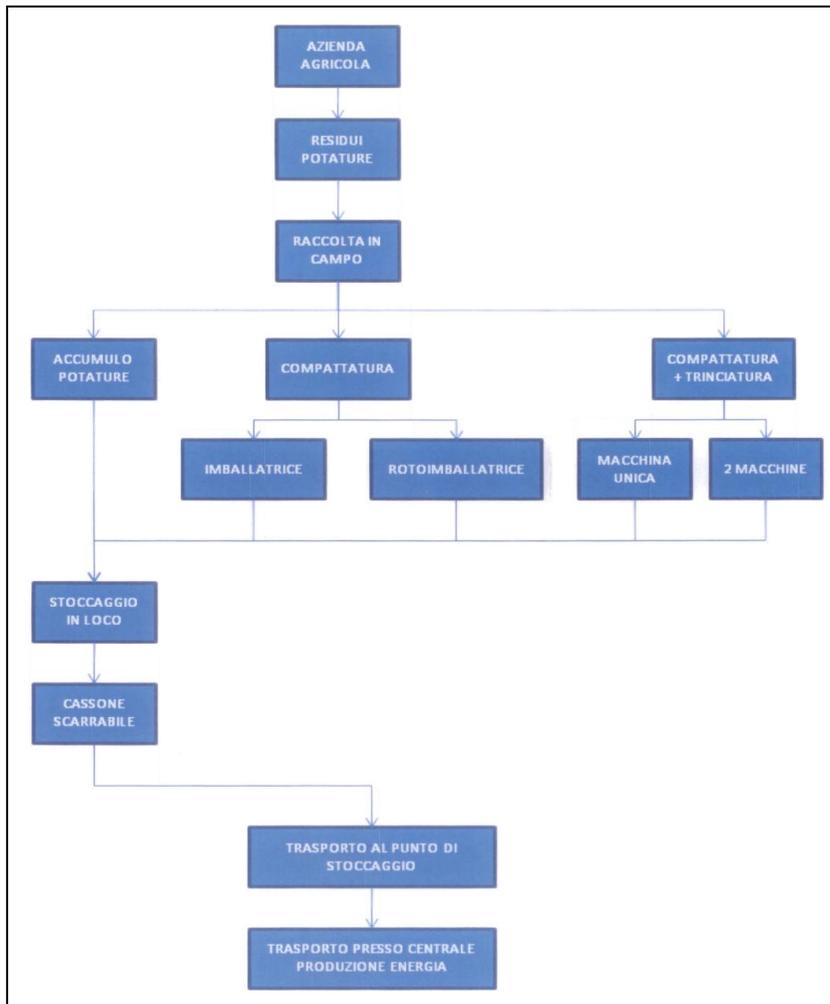


Figura 2.2 – Schema di funzionamento della filiera

2.4 La raccolta

2.4.1 Introduzione

Nella catena di elementi necessari all'implementazione del modello previsto, le macchine di raccolta rappresentano il punto di partenza.

Negli ultimi anni si è assistito all'aumento dell'interesse verso la valorizzazione dei residui colturali in genere ed in particolare di quelli derivanti da patate. Questo è avvenuto sia per la disponibilità di macchine adatte al recupero del prodotto sia perché sussistono i presupposti economici per il loro impiego ai fini della produzione di energia.

Le quantità e la qualità delle ramaglie residue dipendono da diversi fattori, quali varietà, sviluppo delle piante, forma d'allevamento, intensità e periodicità di potatura. Se la potatura viene effettuata con intervalli più lunghi di due anni, avviene tradizionalmente una riutilizzazione dei ciocchi più grandi come legna da ardere.

Lo smaltimento tradizionale, ancora largamente praticato, prevede due modalità:

1. trinciatura in loco e re-immissione nel terreno;
2. allontanamento in capezzagna e bruciatura.

Per procedere invece alla valorizzazione del sottoprodotto possiamo avere due alternative: l'utilizzazione delle ramaglie per la produzione di compost di qualità oppure l'immissione del legno residuo in una filiera per la produzione di energia.

Esistono due metodologie per la raccolta dei residui di potatura in campo:

1. lo sminuzzamento immediato con produzione e successiva movimentazione di cippato di legno;
2. la compattazione delle ramaglie con la produzione di balle di diversa forma e dimensioni e la loro successiva movimentazione.

2.4.2 Le macchine imballatrici

Questo secondo tipo di trattamento è quello che meglio si adatta ad una riutilizzazione del legno ai fini energetici anche a piccola scala, con riutilizzazione aziendale del prodotto e/o in un piccolo bacino d'utenza.

Le macchine per la valorizzazione del residuo di potatura sono derivate dalle analoghe macchine per l'imballaggio dei foraggi attraverso opportune modifiche. Possiamo quindi avere **imballatrici a balle prismatiche** e **rotoimballatrici**. Le tipologie di macchine impiegate dipendono essenzialmente da fattori extra-aziendali ovvero dalla forma di utilizzazione a cui sono destinati i residui legnosi.

Su scala locale, ad esempio, sono molto diffuse le imballatrici che producono balle quadrate o parallelepipediche, dal peso inferiore a 30 kg e con dimensioni tali da essere utilizzate facilmente nei forni per la cottura.

Riferendosi ad un modello di rotoimballatrice tra le più conosciute, si vede che le rotopresse (circa 2,2 mc di volume e circa 3 t di massa, con produttività di circa 60-70 balle al giorno), invece, garantiscono maggiore economicità di lavoro, specialmente per quanto riguarda la loro movimentazione ma possono essere convenientemente utilizzate solo quando esiste un mercato "energetico" per la loro utilizzazione. Un altro vantaggio è dato dal fatto che le rotoimballatrici possono essere azionate da un solo operatore e, per il loro ridotto ingombro laterale, sono più adatte ad operare in sestri d'impianto stretti.

Le rotoimballatrici utilizzano una camera dotata di rulli in acciaio per avvolgere e compattare le potature mentre le imballatrici per balle a parallelepipedo sono dotate di una camera a compressione dove agisce uno stantuffo lineare. Entrambe le macchine sono efficienti per i sarmenti di vite mentre hanno maggiori difficoltà con le potature di olivo, in particolare se si trovano a dover pressare rami di dimensioni maggiori..

Inoltre occorre valutare il tempo necessario a trasportare le balle in capezzagna che varia in funzione del tipo di terreno, della pendenza e della dimensione delle balle e considerare che il materiale prodotto richiede una successiva lavorazione di cippatura in cantiere separato.

Di seguito alcune ulteriori specifiche tratte da L'informatore Agrario.

Le rotoimballatrici sono macchine di grande ingombro misurando in larghezza quasi 2,5 m e richiedono ampi spazi di manovra, per cui trovano più facile impiego con filari a sesto largo. Le balle che formano sono con diametro variabile tra 1,5 e 2 m e arrivano a pesare anche oltre 500 kg. Gli ingombri e il peso delle balle comportano difficoltà nella movimentazione ed il loro utilizzo richiede la sminuzzatura preventiva con apposite scippatrici.

Questo tipo di presse ha una produttività di circa 8-10 balle l'ora e richiede trattori con potenze da 68 a 82 CV (50-60kW).

Le rotoimballatrici compatte hanno la stessa tecnologia ma risultano più maneggevoli ed ideali per spazi tra filari più limitati. Le balle prodotte hanno un peso variabile tra i 30 e 50 kg e dimensioni da 40 a 50 cm di diametro e 60-100 cm di lunghezza. Con queste macchine si possono produrre da 45 a 60 balle/h corrispondenti a circa 0,5-0,6 ha. Gli ingombri di queste macchine variano tra 0,8 a 1,5 m e richiedono potenze da 20 a 41 CV (15-30 kW). Si ricorda che per le balle è necessaria una legatura da effettuarsi con filo o rete. Queste tipologie sono però da evitare in terreni a forte pendenza (fonte: L'informatore Agrario 8/2010)



Rotoimballatrice con accumulatore

fonte: <http://www.caebinternational.it/>

La macchina è studiata per vigneti tipo champagne e produce balle del peso di circa 25/35 kg. La macchina può utilizzare ramaglie e potature fino a 35 mm di diametro che vengono imballate con rete estrusa in PP (polipropilene), producendo balle di 0,24 mc. Sono necessarie forche di raccolta per lavorare su terreni sassosi al fine di evitare di convogliare rocce e sassi

all'interno della camera di imballaggio. L'accumulatore di balle sovrastante permette la raccolta delle balle espulse ed ha una capacità di 7 balle.



Rotopressa

fonte: <http://agronotizie.imagelinetwork.com/>

Con questo modello si producono balle da 1,2 m di diametro e 98 cm di larghezza. L'ingombro della rotopressa è di 1,8-2,0 m.

2.4.3 Il cantiere a due trattrici separate

Ai fini del modello logistico occorrerebbe invece sminuzzare il materiale nei pressi dei punti di stoccaggio poiché l'immagazzinamento delle presse può costituire un fattore limitante per un'ottimale essiccazione. Lo sminuzzamento del materiale si rende necessario specialmente per i residui raccolti tra fine inverno e inizio primavera, caratterizzati spesso da elevati tenori di umidità, dove risulta utile la movimentazione della biomassa per l'essiccazione naturale.

Alla luce di queste considerazioni, risulta utile allestire un cantiere che preveda la trinciatura sul posto, sia essa in campo o in capezzagna. Nel caso della trinciatura in campo le soluzioni tecnologiche disponibili prevedono trinciatrici dotate di convogliatore per il carico di un carrello che può essere posto o in linea (quindi con una sola trattrice) oppure (nei vigneti e negli oliveti intensivi a parete) può essere messo in parallelo sull'interfilare adiacenti (quindi con due trattrici). Sono disponibili anche trinciatrici semiportate dotate di vano di carico e trasporto del materiale entro il campo. Queste soluzioni sono idonee in tutti i casi in cui lo stoccaggio del materiale avviene nelle immediate vicinanze (pochi chilometri) dal luogo di produzione mentre nel caso in cui la distanza aumenti, per evitare che il processo di trasporto incida fortemente sui costi di produzione, viste le piccole dimensioni dei carrelli per vigneti o oliveti, occorre trasferire il materiale su carrelli di maggiori dimensioni o su scarrabili associati a camion.

Di seguito si riporta una serie di possibili macchine trinciatrici – cippatrici analizzate.

Importanti caratteristiche sono la presenza di “pick-up” anteriore che solleva e convoglia il materiale e la presenza di un rotore trinciante lo sminuzza. Queste macchine sono progettate per lavorare su tutti i tipi di terreno, anche su quelli sassosi, senza compromettere la bilanciatura del rotore trinciante. Lo sminuzzamento non avviene a contatto con il terreno ma in un'apposita camera quindi in assenza di sassi. Le caratteristiche costruttive del Pick-up, fanno sì che il materiale che si raccoglie sia solo di origine legnosa (escludendo erba, foglie e sassi).



Trincia con raccoglitore

fonte: <http://www.bertima.it/>

Il prodotto trinciato, fuoriesce dalla camera di trinciatura attraverso un condotto incorporato nel rimorchio dove viene raccolto. Il rimorchio (con capacità di carico di 8,3 metri cubi) è corredato da un coperchio mobile che fa da scivolo al materiale in fase di scarico. L'altezza di svuotamento del contenitore è di circa 3,3 metri. Questo modello è disponibile nella misura 200 (cm di lavoro) ed è adatta a trattori dagli 90 ai 140 HP di potenza.



Trincia con raccoglitore

fonte: <http://www.bertima.it/>

Il prodotto trinciato viene raccolto nel contenitore in materiale metallico incorporato. 'altezza di svuotamento del contenitore va da 1,6 a 2,6 metri e permette di depositare il materiale trinciato su rimorchi per un eventuale trasporto in altro loco. Questa tipologia può avere dai 95 fino a 180cm di lavoro ed è adatta a trattori dai 35 ai 140 HP di potenza.



Trincia con convogliatore

fonte: <http://www.bertima.it/>

Progettata per materiale legnoso fino a 8 cm. Necessario trattore con potenza compresa tra 60 e 120 HP.

Il materiale trinciato viene convogliato e scaricato posteriormente su rimorchio.



Trincia con sacchi raccoglitori

fonte: <http://www.nobili.com/>

E' un attrezzatura di tipo semiportato, applicabile ai tre punti del sollevatore, i sacchi previsti devono essere di tessuto traspirante per permettere un'essiccazione naturale del legno cippato. Il convogliatore verticale è in grado di riempire anche un rimorchio trainato dallo stesso trattore o da un altro sul filare adiacente.



Trincia con raccoglitore

fonte: <http://www.tierreonline.com/>

*Larghezza di lavoro 1,4 - 1,7m ,
potenza : 40 - 50 CV.*



Trincia con convogliatore

fonte : <http://www.peruzzo.it/>

*Potenza: 60 – 70 CV, produzione :
1,5 – 2,5 t/h, larghezza di lavoro 1,4
– 1,6 m.*





Trincia a caricamento manuale con convogliatore

fonte : <http://www.peruzzo.it/>

Potenza: 20 - 40 CV, produzione : 10 - 20 mc/h, larghezza di lavoro 0,3 m, biomassa 4 - 10 cm di diametro.

Cippatrice a caricamento manuale con convogliatore

fonte: <http://www.rabaud.com>

Produzione: 30 - 40 q/h

Potenza: 28 - 64 CV





Cippatrice convogliatore

fonte: <http://www.gandinimeccanica.it>

Potenza richiesta 25- 50 CV, produzione. 3 q/h, larghezza di lavoro: 0,6 m.



Trincia con raccogliatore

fonte :
<http://www.facma.it/>

Larghezza di lavoro:
1,6 -2,2 m; potenza
richiesta : 52 – 89
kW; capacità 3 – 5
mc.

L'analisi dettagliata e metodologica dei tempi e dei costi necessari per lo svolgimento delle operazioni di raccolta delle biomasse analizzate rappresenta il primo presupposto per svolgere valutazioni sulla convenienza all'impiego di determinate categorie di prodotti.

Per poter fare una valutazione si elencano i fattori da tenere in considerazione nel ***meccanismo di raccolta***:

- quantità di materiale da raccogliere
- capienza dei vani di raccolta eventuali;
- capacità di carico dello scarrabile parcheggiato a bordo campo;
- costo unitario del personale impiegato;
- tempo necessario alla raccolta ed agli scarichi di rotoballe o trinciato
- costi di carburante.

2.4.4 Valutazioni economiche

La valutazione economica di convenienza per questa filiera energetica deve partire considerando che il lavoro di raccolta ed accumulo delle potature deve essere comunque fatto.

Nel conto dei costi aggiuntivi rispetto a questa ipotesi di partenza occorre inserire i costi della nuova macchina da finanziare in confronto ai ricavi ottenibili dalla vendita del trinciato stesso.

Occorre anche considerare che ogni nuova macchina acquistata dovrà necessariamente essere utilizzata durante un anno, per un'elevata superficie di raccolta che può anche essere coperta da più proprietari di aziende agricole.

Nella seguente tabella 2.1 si riportano dei valori indicativi di costi e tempi di ritorno ipotizzati da cui risultano dei ricavi annui necessari da ottenere con la vendita del trinciato o delle rotoballe.

Dopo di ciò, ipotizzando un prezzo di vendita del trinciato di 3 €/q.le ed un prezzo di vendita della rotoballa di 2 €/q.le si ricava una colonna degli ettari di terreno su cui ogni macchina acquistata dovrà fare la raccolta ogni anno.

A questa colonna corrispondono dei tempi di funzionamento minimi annui espressi in giorni di lavoro.

	Costo macchina	Tempo di ritorno [anni]	spesa annua per rientro [Euro]	terreno da lavorare [ha/anno]	tempo di funzionamento annuo [gg lavoro/anno]
trincia con raccogliatore	€ 35.000,00	8	€ 4.375,00	97	29
trincia con convogliatore	€ 25.000,00	8	€ 3.125,00	69	21
rotoimballatrice	€ 40.000,00	8	€ 5.000,00	167	50

Tabella 2.1 – Analisi economica: costi e tempi di ritorno

2.4.5 Considerazioni

La sostenibilità dell’inserimento nella filiera delle macchine per la raccolta dei sarmenti si basa sulle seguenti condizioni:

- il costo del personale impiegato per la raccolta non viene considerato poiché deve comunque essere svolto,
- i sistemi di raccolta possono prevedere la produzione di rotoballe oppure la produzione diretta di trinciato,
- è possibile che più agricoltori debbano usufruire della stessa macchina
- le rotoballe od il trinciato devono essere venduti ad un prezzo tale da consentire il rientro della spesa di acquisto delle macchine.

Dalla bibliografia elencata è possibile ricavare un’ampia mole di informazioni ed esperienze riguardo le varie tecniche di raccolta. Le tipologie di soluzioni proposte si rifanno principalmente alla presso imbollatura, sia tramite rotoimballatrici che imballatrici per balle parallelepipedali. Le prime utilizzano una camera dotata di rulli in acciaio per avvolgere e compattare le potature mentre le seconde sono dotate di una camera di compressione dove agisce uno stantuffo lineare. Entrambe le macchine sono molto efficienti ma trovano il loro maggior impiego per i sarmenti di vite mentre hanno maggiori difficoltà con le potature di olivo, in particolare se si trovano a dover pressare rami di dimensioni maggiori. Un limite all’impiego di queste macchine a livello di filiera è rappresentato dal fatto che il materiale prodotto richiede una successiva lavorazione di cippatura in cantiere separato. Ai fini del modello logistico proposto dal progetto, invece, occorrerebbe sminuzzare il materiale nei pressi dei punti di stoccaggio poiché l’immagazzinamento tal quale delle presse può costituire fattore limitante per un’ottimale

essiccazione. Lo sminuzzamento del materiale si rende necessario specialmente per i residui raccolti tra la fine dell'inverno e l'inizio della primavera, caratterizzati spesso da elevati tenori di umidità, dove risulta utile la movimentazione della biomassa per l'essiccazione naturale.

Da questo punto di vista risulta quindi utile allestire un cantiere che preveda la trinciatura sul posto, sia essa in campo o in capezzagna. Nel caso della trinciatura in campo le soluzioni tecnologiche disponibili prevedono trinciatrici dotate di convogliatore per il carico di un carrello che può essere posto o in linea (quindi con una sola trattrice), oppure, nei vigneti o negli oliveti intensivi a parete, può essere messo in parallelo sull'interfilare adiacente (quindi con due trattici). Sono disponibili, altresì, anche trinciatrici semiportate dotate di vano di carico, che consentono di operare con una sola macchina sia il processo di trinciatura che di carico e trasporto del materiale entro il campo. Queste soluzioni sono idonee in tutti i casi in cui lo stoccaggio del materiale avviene nelle immediate vicinanze (pochi chilometri) dal luogo di produzione mentre nel caso in cui la distanza aumenti, per evitare che il processo di trasporto incida fortemente sui costi di produzione, viste le piccole dimensioni dei carrelli per vigneti od oliveti, occorre trasferire il materiale su carrelli di maggiori dimensioni o su scarrabili associati a camion.

Per la realizzazione di una filiera delle agribiomasse innovativa, che entri nella logica sopra descritta, attualmente risulta necessario intervenire sulla marginalità economica a differenti livelli. Nell'analisi dei costi effettuata da P1 e P2 l'aggravio maggiore risulta legato al cantiere e alle operazioni di raccolta per ciò che riguarda le biomasse residuali da potature di vite ed olivo, e più in generale allo stoccaggio e alla conservazione delle biomasse energetiche attraverso strutture fisse, poco automatizzabili ed utilizzabili solamente per tipologie specifiche di prodotti.

Per il recupero delle potature di vite e olivo, che nel territorio toscano occupano una superficie di circa 150000 ha e hanno una produzione in sostanza secca ligno-cellulosica stimabile nell'ordine di 200000 t, sono state proposte varie tipologie di attrezzature e di modelli di cantiere di lavoro. A titolo di esempio riportiamo alcuni articoli prodotti negli ultimi anni:

- Energia dalle biomasse – le tecnologie, i vantaggi per i processi produttivi, i valori economici e ambientali; R.Jodice, E. Tomasinsing, Area SciencePark, n.24 /2006;
- Nuova trincia raccogliitrice Nobili; L. Recchia, M. Vieri, M. Rimediotti, M. Daou. TRP-RT M&MA 2/2006;
- La gestione dei sarmenti. C. Corradi. VigneVini 11/2006;

- Una nuova macchina per la raccolta dei sarmenti” “Qualità di cippato e pellet di vite e prove di combustione; V. Francescato, Antonini E., A. Paniz, S. Grigolato. L'Informatore Agrario, 10/2007;
- I residui di potatura dell'olivo riscaldano l'orticoltura; G. Sparta, G. Giarrizzo. L'Informatore Agrario, 23/2008;
- New shredding machine for recycling pruning residuals; L. Recchia, M. Daou, M. Rimediotti, E. Cini, M. Vieri. Biomass and Bioenergy 33, 2009;
- Guadagnare con i residui legnosi grazie alla trituratrice spagnola; G. Picchi, R. Spinelli, J. Lobo. Informatore Agrario 17/2009;
- Residui di potatura di vite per fare energia; A. Cristoforetti, S. Silvestri. L'Informatore Agrario 10/2009;
- Vendere calore si può e conviene; D. Del Zotto. Terra e Vita 44/2009;
- Raccolta dei residui di potatura conviene per i viticoltori; R. Spinelli N. Magagnotti. L'Informatore Agrario 6/2009;
- Quale Macchina scegliere per raccogliere i residui di potature; M. Valer. L'Informatore Agrario, 8/2010;
- I residui legnosi dell'agricoltura; R. Spinelli, C. Lombardini. L'Informatore Agrario 19/2010;
- Harvesting Vineyard pruning residues for energy use; R. Spinelli, N. Magagnotti, C. Nati. Biosystems Engineering 105, 2010;
- Industrial harvesting of olive tree pruning residue for energy biomass; R. Spinelli, G. Picchi. Bioresource Technology 101, 2010;
- Il cippato di vite nella caldaia annulla i costi per gasolio o gpl; V. Francescato, M. Golfetto. L'Informatore Agrario 11/2010.

2.5 Logistica e Trasporto

Come già detto uno degli aspetti che presenta una maggiore criticità è senz'altro la fase logistica, infatti in tutti i prodotti agricoli l'anello delicato della filiera è il costo di trasporto che va ad incidere pesantemente visti i bassi valori dei prodotti.

Il caso dei sottoprodotti è ancora più delicato visto che vanno valorizzate proprio le produzioni che di per se non hanno ancora un valore.

Va anche considerata la forma in cui verrà trasportato il prodotto verso il centro di stoccaggio, noi prendiamo in considerazione un prodotto trinciato e compattato, come visto prima. In questo caso le ipotesi da prendere in considerazione per trasportare i residui colturali ai centri di stoccaggio del Consorzio Agrario di Siena possono essere tre:

1. in proprio dall'azienda agricola
2. tramite trasportatore
3. tramite scarrabili del Consorzio Agrario di Siena

Caso 1

Le aziende agricole generalmente utilizzano come mezzo di trasporto una trattoria con carrello trasportatore, in questo caso i costi da considerare sono i consumi medi del trattore (comprensivi degli ammortamenti) moltiplicati per la distanza da percorrere, la distanza è sicuramente modesta e prevedibilmente di circa 10 Km.

Caso 2

In questo caso è da prevedere al ricorso ad un autotrasportatore contoterzista, che applicherà le tariffe a chilometro del momento, senza limitazioni al chilometraggio.

Caso 3

Attraverso un "Mezzo Scarabile" del Consorzio Agrario di Siena, con questa definizione si intende il solo cassone del camion (motrice) che viene lasciato per un periodo di circa 24 ore in azienda e che viene poi ritirato dal camion del Consorzio Agrario di Siena, questo modo ha un raggio di convenienza economica per distanze in un raggio di 15 Km dal centro di stoccaggio.

2.6 Stoccaggio e conservazione

Lo stoccaggio e la conservazione è una delle attività tipiche del Consorzio Agrario Siena e generalmente vengono stoccate derrate alimentari, come cereali o oleaginose, ma comunque è possibile stoccare differenti produzioni, sia attraverso la realizzazione di strutture a questo dedicate che attraverso la trasformazione e riadattamento di strutture già esistenti.

La capacità di stoccaggio del Consorzio Agrario di Siena è notevole e come già detto precedentemente è così identificabile:

- a) 10.000 mc di magazzini di stoccaggio in muratura
- b) 150.000mc di silos metallici
- c) 3.000 mq di piazzali attrezzati
- d) 10.000 mq di piazzali esterni

Di seguito le tabelle 2.3 e 3.4 esemplificano la situazione, la prima relativa alla capacità di stoccaggio effettiva, la seconda relativa alla capacità di stoccaggio potenziale:



Figura 2.3 – Capacità di stoccaggio effettiva

Lo stoccaggio effettivo indica le chilotonnellate (kt) di cereali che possono essere stoccate in silos e magazzini delle varie agenzie, (in parte potrebbero essere utilizzate)



Figura 2.4 - Capacità di stoccaggio potenziale

Lo stoccaggio potenziale indica i $m^2 \times 1000$ di superficie che c'è nelle varie agenzie e che in caso di necessità potrebbe essere utilizzata per realizzare strutture di stoccaggio di biomasse energetiche.

3 Prototipo innovativo per la microcogenerazione

a cura di

*Lapo Canuti, Giuseppe Grazzini, Adriano Gabellini, Adriano Milazzo,
Silvano Pieri, Roberto Berti, Dario Paganini*

3.1 Classificazione delle utenze rurali della Toscana

3.1.1 Identificazione delle aree rurali

Ai fini del progetto si ritiene opportuno anzitutto identificare univocamente le aree rurali della regione Toscana. Si ritiene che l'identificazione più adatta delle zone rurali sia quella del Documento Unico di Programmazione per l'attuazione nella Regione Toscana dell'iniziativa comunitaria "LeaderPlus" che classifica come rurali i territori comunali, suddivisi per provincia di appartenenza, riportati nell'allegato 3.

Dalle tabelle dell'Appendice 1 si ottiene pertanto che le aree rurali della Toscana coprono una superficie complessiva pari a 1.646.563 ettari (71,6% dell'intero territorio regionale) nella quale risiedevano, nell'anno 1999, 774.668 abitanti (22% della popolazione regionale complessiva) con una densità media pari a 47 abitanti per kmq.

Per quanto concerne la classificazione energetica delle aree rurali sarà necessario effettuare una serie di ipotesi in quanto non è possibile reperire dati di consumo energetico disaggregati a causa della liberalizzazione del mercato energetico che rende tali dati oggetto di concorrenza commerciale sul territorio e pertanto non più disponibili.

3.1.2 Stima dei consumi elettrici complessivi imputabili alle aree rurali

Relativamente alla suddivisione dei consumi elettrici non è disponibile una disaggregazione dei dati di consumo a livello territoriale comunale ma è disponibile unicamente una suddivisione a livello provinciale per settore economico di attività. Pertanto si farà la logica assunzione che l'intero consumo elettrico agricolo sia ubicato nelle aree rurali mentre per quanto riguarda il consumo elettrico residenziale e terziario, che pure è parzialmente imputabile anche alle aree rurali in quanto distribuito territorialmente, verrà imputato alle aree rurali unicamente come quota proporzionale alla quota di popolazione complessiva della regione Toscana.

I consumi elettrici provinciali della regione Toscana nell'anno 2007 (Fonte : Terna), suddivisi per provincia e per settore economico di attività sono riportati nella tabella 3.1 :

Provincia	Agricoltura	Industria	Terziario	Domestico	Totale
Arezzo	35,3	634,9	453,5	369,9	1.493,6
Firenze	42,9	1.565,8	1.765,6	1.140,3	4.514,7
Grosseto	56,0	265,7	337,6	292,8	952,2
Livorno	15,9	2.279,7	572,5	403,7	3.271,7
Lucca	16,8	2.204,6	566,8	475,9	3.264,1
Massa Carrara	2,0	484,0	242,0	219,8	947,9
Pisa	16,8	913,4	697,4	466,5	2.094,0
Pistoia	22,8	522,3	375,9	338,8	1.259,8
Prato	2,6	705,8	359,2	274,6	1.342,2
Siena	58,5	483,9	457,8	312,2	1.312,4
TOTALE :	269,6	10.060,1	5.828,2	4.294,6	20.452,5

Tabella 3.1 – Consumi Elettrici Province Toscane per settore economico (GWh/anno).

In base alle assunzioni elencate in precedenza si possono pertanto stimare i consumi elettrici delle aree rurali della regione Toscana nell'anno 2007 come riportato nella tabella 3.2 e nella figura 3.1:

Provincia	Agricoltura	Terziario rurale	Domestico rurale	Totale
Arezzo	35,3	99,8	81,4	216,4
Firenze	42,9	388,4	250,9	682,2
Grosseto	56,0	74,3	64,4	194,7
Livorno	15,9	126,0	88,8	230,7
Lucca	16,8	124,7	104,7	246,2
Massa Carrara	2,0	53,2	48,4	103,6
Pisa	16,8	153,4	102,6	272,9
Pistoia	22,8	82,7	74,5	180,0
Prato	2,6	79,0	60,4	142,0
Siena	58,5	100,7	68,7	227,9
TOTALE :	269,6	1.282,2	944,8	2.496,6

Tabella 3.2 – Consumi Elettrici Aree Rurali Province Toscane (GWh/anno).

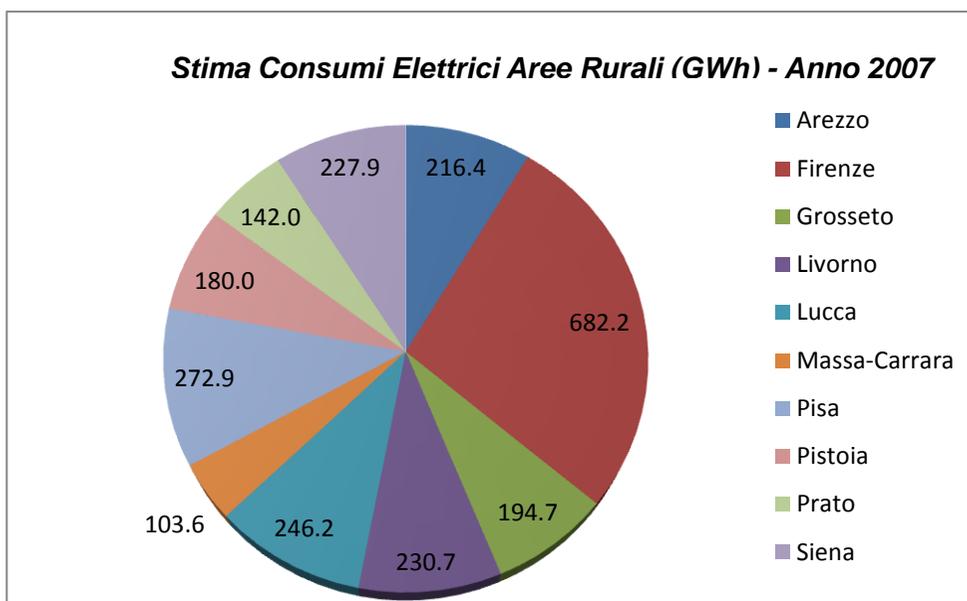


Figura 3.1 – Stima dei Consumi elettrici in aree rurali della Toscana.

3.1.3 Stima dei consumi termici complessivi imputabili alle aree rurali

Per quantificare i consumi termici si faranno alcune assunzioni semplificative necessarie per stimare il consumo termico degli edifici ubicati nelle aree rurali.

La prima assunzione fatta per cercare di quantificare il consumo termico è considerare che l'intero consumo di gas naturale venga utilizzato per i consumi termici trascurando così che una parte di questo consumo è invece utilizzata per la generazione termoelettrica e per l'autotrazione stradale ma considerando altresì che è anche vero che una parte dei combustibili liquidi (GPL e gasolio) viene invece utilizzata per consumi termici come il riscaldamento invernale di edifici, specie nelle aree rurali. Questa assunzione è supportata dai dati del censimento ISTAT del 2001 da cui risulta che l'87% degli impianti di riscaldamento installati nelle abitazioni della Toscana è costituito da impianti di riscaldamento singolo che nella grande maggioranza dei casi sono caldaie alimentate a gas metano.

La seconda assunzione è invece considerare che il consumo termico residenziale nelle aree rurali sia proporzionale alla popolazione residente e quindi considerarlo in quota proporzionale alla quota di popolazione complessiva della regione Toscana.

Poiché il consumo complessivo di gas naturale nella regione Toscana è stato pari, nell'anno 2005, a 3,29 milioni di tep (Fonte : PIER Toscana) ovvero a 3,823 miliardi di metri cubi, si può attribuire una quota proporzionale di questo consumo, pari al 22%, come consumo termico delle utenze rurali che risulta pertanto pari a **841 milioni di metri cubi di gas metano**.

3.1.4 Stima dei consumi energetici specifici delle abitazioni nelle aree rurali

Anche in questo caso è necessario effettuare una assunzione relativa agli edifici per quantificare il consumo energetico specifico “medio” di energia elettrica e energia termica di un edificio ubicato in aree rurali.

L'assunzione fatta è che le abitazioni delle aree rurali abbiano un consumo energetico specifico equivalente alle abitazioni delle aree urbane. In realtà è probabile che il consumo energetico delle abitazioni (escluse le seconde case) ubicate nelle aree rurali sia più elevato in quanto queste hanno in genere superficie maggiore, controbilanciato dal fatto però che nelle aree rurali si fa spesso ricorso a combustibili non censiti (ad esempio legna da ardere) per il riscaldamento invernale, abbassando quindi il peso statistico dell'utilizzo di gas metano per uso di riscaldamento invernale.

Alla luce dell'assunzione di cui sopra e considerato che risultano esservi in Toscana 378.775 abitazioni ubicate in comuni classificati come rurali (Fonte : Censimento ISTAT 2001) il consumo energetico specifico medio di una abitazione rurale può essere stimato come segue :

Stima consumo elettrico medio abitazione rurale :

Consumo specifico di energia elettrica in una abitazione rurale =
Consumo elettrico domestico rurale/Numero abitazioni rurali
ovvero $(944.800 \times 10)/378.775 = \mathbf{2.494 \text{ kWh}_{\text{elettrici}}/\text{anno}}$

Stima consumo termico medio abitazione rurale :

Consumo specifico di energia termica di una abitazione rurale =
(Consumo gas metano abitazioni rurali x potere calorifico gas metano)/Numero abitazioni rurali
ovvero $(841.000.000 \times 10)/378.775 = \mathbf{22.203 \text{ kWh}_{\text{termici}}/\text{anno}}$

I dati così ricavati risultano pertanto abbastanza congruenti con i valori di consumo medi indicati dai gestori di reti energetiche, quali l'ENEL Distribuzione, che considera un consumo elettrico medio pari a 2.800 kWh/anno ad abitazione.

Si può pertanto vedere che il consumo termico ha un impatto molto più rilevante del consumo elettrico nelle abitazioni ubicate nelle aree rurali in quanto è, in termini assoluti, circa 9 volte superiore.

Dal punto di vista della taglia e del rendimento del microgeneratore da utilizzare ciò è molto importante in quanto un profilo di consumo di questo genere giustifica l'utilizzo nelle abitazioni rurali di macchine alimentabili a biomassa legnosa di taglia molto piccola, attorno ai 3 kW elettrici di potenza installata, che sono caratterizzate da rendimenti elettrici inferiori al 10% .

3.1.5 Stima dei consumi energetici specifici delle aziende agricole nelle aree rurali

Analogamente alle assunzioni effettuate in precedenza anche per le aziende agricole è necessario effettuare delle assunzioni relative ai consumi di energia elettrica per individuare delle classi di potenza elettrica significative.

In base al Censimento generale dell'Agricoltura effettuato nell'anno 2000 sono state classificate in Toscana oltre 130.000 aziende agricole suddivise per classe di superficie agricola utilizzata (SAU) come riportato più in dettaglio nella tabella 3.3:

Provincia	SAU < 10 ettari	SAU fra 10 e 20 ettari	SAU da 20 a 50 ettari	SAU fra 50 e 100 ettari	SAU oltre 100 ettari	Totale
Arezzo	20.323	1.163	674	203	113	22.476
Firenze	14.440	1.116	762	280	185	16.783
Grosseto	12.316	2.631	1.976	477	225	17.625
Livorno	5.328	410	213	71	48	5.980
Lucca	15.909	227	111	27	12	16.286
Massa Carrara	9.204	145	42	9	12	9.412
Pisa	13.896	682	657	276	188	15.699
Pistoia	14.165	186	75	25	11	14.462
Prato	2.187	70	34	16	20	2.327
Siena	11.156	965	976	466	405	13.968
TOTALE :	118.834	7.595	5.520	1.850	1.219	135.018

Tabella 3.3 – Suddivisione aziende agricole per SAU – anno 2000.

Alla luce delle indicazioni della tabella 3.3 si può facilmente ipotizzare che il consumo elettrico non sia affatto equamente distribuibile fra le aziende, che presentano superfici e quindi presumibilmente anche impianti consumatori di energia (pompe, cantine, frantoi, stalle, etc ...), di dimensioni ben diverse.

In condizioni di questo genere è ragionevole ipotizzare che il consumo elettrico complessivo delle aziende sia distribuito come segue :

- Aziende con SAU inferiore a 10 ettari : 25% del consumo elettrico totale
- Aziende con SAU fra 10 e 50 ettari : 25% del consumo elettrico totale
- Azienda con SAU oltre i 50 ettari : 50% del consumo elettrico totale

Pertanto in considerazione delle assunzioni di cui sopra si può stimare il consumo elettrico medio di tre diverse classi di aziende agricole ubicate nelle aree rurali come segue :

Stima consumo elettrico azienda agricola piccola (SAU < 10 ettari) :

$$(269.600.000 \times 0,25)/118.834 = \mathbf{567 \text{ kWh}_{\text{elettrici}}/\text{anno}}$$

Stima consumo elettrico azienda agricola media (10 ettari < SAU < 50 ettari) :

$$(269.600.000 \times 0,25)/13.115 = \mathbf{5.139 \text{ kWh}_{\text{elettrici}}/\text{anno}}$$

Stima consumo elettrico azienda agricola grande (50 ettari < SAU) :

$$(269.600.000 \times 0,50)/3.069 = \mathbf{43.923 \text{ kWh}_{\text{elettrici}}/\text{anno}}$$

Profili di consumo elettrico di questo tipo possono essere associati a potenze elettriche contrattuali installate dell'ordine di 1,5 kW per l'azienda agricola piccola, che è assai probabile che in molti casi coincida con una abitazione rurale e non abbia nemmeno una fornitura elettrica propria, dei 6 kW per l'azienda agricola media e di potenze comprese fra 15 e 30 kW per l'azienda agricola grande.

Potenze elettriche installate superiori sono improbabili perché più facilmente ricadenti nel campo dell'industria (agroindustria settore food) che in quello delle aziende agricole vere e proprie.

Per quanto riguarda la stima del fabbisogno termico di una azienda agricola la quantificazione è molto difficile e va affrontata caso per caso in quanto legata allo specifico tipo di coltivazione ed alla stagionalità specifica del consumo termico (ad esempio cerealicoltura, olivicoltura, vigneto, etc.).

La quantificazione del fabbisogno termico per quanto riguarda l'attività turistica (agriturismo), che si è molto diffusa negli ultimi anni, è più semplice in quanto è possibile utilizzare i parametri degli alberghi una volta note le superfici degli edifici ed il numero di camere/appartamenti.

Non va però dimenticato che se è vero che l'attività agrituristica incrementa i consumi elettrici di una azienda agricola non è altrettanto vero che lo faccia in uguale percentuale per quelli termici dato che in Toscana la stagione agrituristica si concentra nei mesi compresi fra Aprile ed Ottobre e quindi non nella stagione invernale ove è concentrato il maggior fabbisogno di energia termica.

3.1.6 Rilevazione in campo e quantificazione dei consumi elettrici e termici di alcune aziende agricole ubicate nelle aree rurali

A titolo di rilevazione in campo, quantificazione e verifica dei consumi elettrici e termici stimati per le aziende agricole ubicate in aree rurali della Toscana con le modalità di cui al precedente capitolo, il Dipartimento di Energetica (DIE) dell'Università di Firenze ha effettuato delle indagini presso alcune aziende agricole campione che hanno dimostrato interesse agli obiettivi del progetto Moderno.

Le aziende agricole esaminate ed i risultati rilevati durante l'indagine condotta dal DIE sono riportati nell'allegato 4.

3.1.7 Stima dei consumi energetici specifici delle aziende artigiane nelle aree rurali

Come si può facilmente desumere dalla tabella 3.2, con le ipotesi fatte, i consumi elettrici del settore terziario, fra i quali ricadono la maggioranza delle imprese artigiane, ubicato nelle aree rurali della Toscana sono quasi equivalenti, da soli, alla somma dei consumi energetici delle aziende agricole e delle utenze residenziali ubicate nelle aree rurali.

Sebbene questo dato possa essere falsato dalla presenza “impropria” di terziario ubicato in territori comunali di aree rurali ma in realtà asservito in gran parte ai fabbisogni di abitanti residenti in aree urbane confinanti (come ad esempio gli outlet ed alcuni centri commerciali) va però tenuto conto che esso comprende anche i consumi delle aziende artigiane e del commercio a servizio dell’agricoltura e degli abitanti delle aree rurali come ad esempio piccoli supermercati, rivendite di attrezzi agricoli, depositi di materiali edili, officine di riparazione meccanica, etc.

A causa della promiscuità tipica del settore terziario che per sua natura serve utenze di tipo diversificato quali l’agricoltura, i residenti, il turismo è pertanto difficile disaggregare i consumi elettrici delle aziende artigiane dai consumi elettrici generali del settore terziario, dato che i consumi stessi variano in modo molto sensibile da una utenza ad un'altra ed quindi necessario fare ricorso ad alcune assunzioni.

In base al Censimento Generale ISTAT effettuato nell’anno 2001 in Toscana nei comuni rurali avevano sede oltre 18.000 aziende artigiane suddivise per numero di dipendenti come riportato più in dettaglio nella tabella 3.4:

Aree rurali provincia	Azienda artigiane con num. dipendenti ≤ 5	Azienda artigiana con num. dipendenti tra 6 e 20	Azienda artigiana con num dipendenti ≥20	Totale
Arezzo	3.690	567	50	4.307
Firenze	2.332	321	27	2.680
Grosseto	2.454	192	6	2.652
Livorno	857	84	--	941
Lucca	1.086	98	5	1.189
Massa				
Carrara	795	59	2	856
Pisa	1.274	126	7	1.407
Pistoia	1.062	95	5	1.162
Siena	2.898	343	27	3.268
TOTALE :	16.448	1.885	129	18.462

Tabella 3.4 – Suddivisione aziende artigiane per numero dipendenti – Anno 2001.

La prima assunzione è ipotizzare che il consumo elettrico delle aziende artigiane sia pari al 70% del consumo elettrico complessivo del settore terziario, attribuendo quindi il 30% del consumo elettrico a settori diversi (commercio, servizi, etc ...). La seconda assunzione è ipotizzare che il consumo elettrico complessivo delle aziende artigiane sia distribuito in funzione del numero degli addetti dell'azienda artigiana con le seguenti percentuali :

- Aziende artigiana con numero di dipendenti inferiore a 5 : 35% del consumo elettrico totale
- Aziende artigiana con numero di dipendenti compreso fra 6 e 19 : 35% del consumo elettrico totale
- Azienda artigiana con oltre 20 dipendenti : 30% del consumo elettrico totale

Con riferimento alle assunzioni di cui sopra si può pertanto stimare il consumo elettrico medio di tre diverse classi di aziende artigiane ubicate nelle aree rurali come segue:

Stima consumo elettrico azienda artigiana piccola (< 5 dipendenti) :

$$((1.282.200.000 \times 0,70) \times 0,35)/16.448 = \mathbf{19.099 \text{ kWh}_{\text{elettrici}}/\text{anno}}$$

Stima consumo elettrico azienda artigiana media (6 < dipendenti < 20) :

$$((1.282.200.000 \times 0,70) \times 0,35)/1.885 = \mathbf{166.652 \text{ kWh}_{\text{elettrici}}/\text{anno}}$$

Stima consumo elettrico azienda artigiana grande (> 20 dipendenti) :

$$((1.282.200.000 \times 0,30) \times 0,30)/129 = \mathbf{894.558 \text{ kWh}_{\text{elettrici}}/\text{anno}}$$

Profili di consumo elettrico di questo tipo possono essere associati a potenze elettriche contrattuali installate dell'ordine dei 10-15 kW per l'azienda artigiana piccola, dei 90-100 kW per l'azienda artigiana media e dei 500 kW per l'azienda artigiana grande.

Questi profili di consumo elettrico risultano congruenti con le tipologie contrattuali standard di potenza elettrica impegnata delle aziende artigiane, incluse quelle grandi dotate di capannone ed allacciamento elettrico in media tensione (15.000 V) con cabina elettrica propria.

3.2 Analisi delle soluzioni tecnologiche migliori per la microgenerazione elettrica da caldaie a biomassa

3.2.1 Identificazione della taglia di potenza elettrica e del combustibile di alimentazione di interesse ai fini del progetto

Alla luce dei risultati della classificazione delle utenze elettriche nelle aree rurali, si è anzitutto provveduto ad identificare la taglia di potenza elettrica degli impianti di microgenerazione di interesse.

Tale taglia è stata identificata nell'intervallo compreso fra 3 kW (utenza residenziale rurale) e 15 kW (azienda agricola grande e azienda artigiana piccola).

Per quanto riguarda il combustibile di alimentazione questo è stato identificato come biomassa legnosa solida nella definizione più ampia del termine, ovvero comprendente cippato di legname forestale ed agricolo, pellets di legname vario, sansa e nocciolino di sansa, residui di cereali, etc... .

I combustibili liquidi, come l'olio vegetale, e gassosi, come il biogas da digestione anaerobica, sono stati esclusi dall'ambito di interesse del progetto in quanto sono poco consoni all'utilizzo della biomassa disponibile nelle aree rurali della Toscana, che è uno degli obiettivi di sostenibilità di questo progetto.

Inoltre l'olio vegetale è già stato oggetto di intenso sviluppo commerciale negli ultimi anni, con utilizzo di biomassa importata dall'estero, mentre gli impianti a biogas si sono consolidati su taglie di allevamenti animali di dimensioni più grandi di quelli normalmente presenti in Toscana.

3.2.2 Identificazione e valutazione delle tecnologie pubblicizzate

Una volta definita la taglia di potenza ed il combustibile da utilizzare ha avuto inizio la fase di identificazione e reperimento di informazioni sulle tecnologie di microgenerazione pubblicizzate e proposte da vari sviluppatori. Per ogni tecnologia pubblicizzata si è quindi effettuata una valutazione analitica dei pro e dei contro utilizzando i criteri descritti qui di seguito in ordine di importanza :

- A. Tipo di tecnologia e stadio di sviluppo della stessa
- B. Disponibilità di prototipi in vendita
- C. Conformità alla taglia di potenza di interesse del progetto
- D. Ore di funzionamento raggiunte
- E. Rendimento elettrico
- F. Problematiche lamentate

Nell'ambito dell'indagine sono state quindi identificate le seguenti tecnologie utilizzate per la realizzazione di impianti di cogenerazione alimentati a biomassa lignocellulosica :

- Gassificazione della biomassa e generazione elettrica con motori alternativi a combustione interna o microturbine
- Gassificazione della biomassa e generazione elettrica con motori a combustione esterna (Stirling)
- Combustione della biomassa e generazione elettrica con microturbina ad aria calda
- Combustione della biomassa e generazione elettrica con ciclo Rankine a fluido organico (ORC)

Si è quindi provveduto a reperire informazioni su ciascuna di queste tecnologie per valutarne l'adeguatezza all'obiettivo del progetto. La descrizione delle caratteristiche e dello stadio di sviluppo di ciascuna tecnologia indagata è riportata nell'allegato 5.

Sono emerse, per ciascuna delle tecnologie esaminate le seguenti considerazioni:

Gassificazione della biomassa e generazione elettrica con motori alternativi a combustione interna o microturbine

- Non esistono impianti di gassificazione per la taglia di interesse. L'alimentazione di motori a combustione con biomassa gassificata presenta comunque significative problematiche tecniche anche per impianti di taglia superiore (100 – 1000 kWe). Il prezzo specifico degli impianti, compreso fra 3.000 e 4.000 €/kWe è il più basso fra quelli esaminati, ma si riferisce ad impianti di taglia più grande.

Gassificazione della biomassa e generazione elettrica con motori a combustione esterna (Stirling)

- I motori Stirling alimentabili a biomassa per la taglia di interesse si sono dimostrati irreperibili. Ciò perchè gli sviluppatori più esperti, nonostante le passate sperimentazioni sulla tecnologia, non sono in grado di fornire impianti, anche a livello prototipale. Inoltre, a parte la coraggiosa esperienza intrapresa a Castel d'Aiano dal CISA con un motore da 35 kWe (e quindi di taglia più grande e con una storia di esercizio ancora troppo breve), non è stato inoltre possibile reperire alcun dato relativo all'effettivo funzionamento in campo dei motori Stirling. L'esperienza di Castel d'Aiano dimostra tuttavia che l'alimentazione della camera di combustione con la biomassa gassificata del pirogassificatore updraft non altera significativamente le problematiche di manutenzione del motore Stirling rispetto ad una alimentazione con gas propano. Il prezzo specifico di 5.800 €/kWe è più elevato del 70% rispetto agli impianti di pirogassificazione di taglia più grande.

Combustione della biomassa e generazione elettrica con microturbina ad aria calda

- La microturbina ad aria calda progettata dalla TEP appare come una tecnologia valida, e già funzionante in parallelo alla rete elettrica per la taglia da 75-80 kWe per la sua semplicità e soprattutto per la possibilità di utilizzare in gran parte macchinari di fabbricazione commerciale come la microturbina TURBEC. Per una taglia di impianto inferiore (fra 3 e 15 kW), poiché non esistono microturbine già realizzate commercialmente disponibili, esiste invece una significativa barriera progettuale e di incertezza tecnica di funzionamento che può essere superata solo con la progettazione ex novo e successiva sperimentazione di una microturbina di potenza fra 3 e 15 kW. Il prezzo specifico attuale di

6.250 €/kWe per la microturbina ad aria da 75-80 kWe è più elevato dell'80% rispetto agli impianti di pirogassificazione di taglia più grande.

Combustione della biomassa e generazione elettrica con ciclo Rankine a fluido organico (ORC)

- L'impianto di microgenerazione a ciclo Rankine con fluido organico (ORC) denominato Piglet da 3 kWe si dimostra ad oggi come l'unica tecnologia congruente con la taglia di impianto di interesse ai fini del progetto e presenta risultati incoraggianti anche dal punto di vista del funzionamento, avendo già oltrepassato le 10.000 ore sul primo prototipo. Il Piglet presenta due soli inconvenienti :
 - Il calore di scarto è recuperabile ad una temperatura molto bassa (35-40°C) poco compatibile con l'impiantistica di riscaldamento pre-esistente negli edifici rurali (termosifoni) che sono normalmente dimensionati per temperature più elevate (tipicamente 70-80°C) e quindi, nei periodi freddi, richiederebbero un sistema di riscaldamento integrativo oppure importanti modifiche all'impianto.
 - Il fluido organico R245fa utilizzato nel ciclo ORC ha un costo elevato ed è un gas ad effetto serra 950 volte più potente della CO₂ per cui eventuali trafile e fuoriuscite sono dannosi per l'atmosfera.

Alla luce dell'esame delle tecnologie suddette condotto fondamentalmente dalla Fondazione per il Clima e la Sostenibilità e dal Dipartimento di Energetica è quindi risultato evidente che :

- Nessuno ha realizzato ad oggi un prototipo adatto per la taglia di impianto di interesse ai fini del progetto ad eccezione della Newcomen
- Il Piglet con ciclo Rankine ORC è l'unico prototipo disponibile ma utilizza fluido organico dannoso per l'atmosfera in caso di fughe/fuoriuscite.
- Allo stadio attuale dello sviluppo tecnologico della taglia di impianto di interesse l'obiettivo primario è la realizzazione di prototipi funzionanti ed in grado di raggiungere almeno le 20.000 ore di funzionamento.
- L'obiettivo secondario del raggiungimento di costi specifici delle tecnologie proposte in €/kWe commercialmente competitivi è comune a tutte le tecnologie, che però si trovano ancora nell'ambito delle

applicazioni prototipali dato che devono prima raggiungere l'obiettivo primario.

E' stato alla luce di questo inquadramento dello stato di sviluppo del settore che è maturata l'idea di progettare ex novo un prototipo, adatto alla taglia di interesse, che fosse totalmente ecocompatibile e quindi utilizzasse una tecnologia allo stesso tempo ben conosciuta ma anche poco innocua per l'atmosfera come il vapore d'acqua.

Il Dipartimento di Energetica ha infatti lanciato l'idea innovativa di utilizzare un alternatore lineare accoppiato ad un motore alternativo a vapore al posto di un ciclo ORC e si è quindi proceduto a verificare se i partner del progetto possedessero le necessarie competenze tecniche per la realizzazione di un simile impianto.

Ne è emerso che :

- La Toscoaragonese è in grado di sviluppare e costruire una caldaia a biomassa lignocellulosica in grado di produrre vapore d'acqua.
- Il Dipartimento di Energetica (DIE) possiede le competenze per fornire la progettazione termodinamica del ciclo a vapore
- La Costruzioni Ottico Meccaniche (COM) ha le competenze per progettare e costruire il motore alternativo a vapore ed accoppiarlo all'alternatore lineare.

Pertanto, esistendo le condizioni di "circolo virtuoso" di competenze in grado di conferire elevata probabilità di successo nella realizzazione di un prototipo di questo genere, totalmente ideato in Toscana, si è deciso di intraprendere questa via avendo in ogni caso presenti tutti i rischi legati alla progettazione ex novo di un prototipo tipici della ricerca sperimentale ed applicata, ma anche l'obiettivo della realizzazione di un impianto di microgenerazione congruente con l'applicazione desiderata.

3.3 Studio termodinamico e dimensionamento della caldaia e del generatore elettrico

3.3.1 Scelta del fluido di lavoro

Sono state esaminate varie opzioni per il fluido di lavoro da utilizzare nel microgeneratore. In linea di principio è infatti possibile utilizzare sia gas che fluidi che subiscono cambiamenti di fase. Questi ultimi introducono nel ciclo una o più trasformazioni isoterme (o con limitata variazione di temperatura), che possono migliorare il rendimento del ciclo. D'altra parte, la presenza di più fasi nel fluido di lavoro può essere nociva per alcuni organi del sistema, in particolare quelli ove si hanno parti in movimento.

La natura del fluido di lavoro condiziona il ciclo termodinamico che si svolge all'interno della macchina e quindi il rendimento di conversione dell'energia termica in energia meccanica.

I fluidi di lavoro possono essere naturali o sintetici. Tra i primi sono ovviamente da annoverare acqua ed aria, disponibili ovunque ed a costo trascurabile. Vi sono poi alcuni prodotti dell'industria chimica, come anidride carbonica, idrogeno, elio, ammoniaca, butano, ecc., che sono disponibili a costi relativamente limitati in quanto prodotti in grandi quantità per altri scopi. Infine si possono utilizzare fluidi specificamente ottimizzati dall'industria chimica per la costruzione di particolari cicli termodinamici: l'esempio più comune è quello dei fluidi frigorigeni, che hanno proprietà termodinamiche tali da massimizzare il rendimento e minimizzare il costo dei sistemi di refrigerazione.

I sistemi ad aria sono stati proposti in vari ambiti e con differenti valide motivazioni. In primo luogo l'aria non pone limitazioni di temperatura poiché non ha un legame fisso tra temperatura e pressione di lavoro. In secondo luogo, e forse questo è l'aspetto più interessante, l'aria si presta a combinare le funzioni di fluido di lavoro del ciclo e di comburente : infatti le più diffuse macchine operanti con aria sono motori a combustione interna, siano essi motori alternativi o impianti con turbine a gas. La combustione interna obbliga a realizzare un ciclo aperto, il che non costituisce un problema se il fluido, essendo aria, è disponibile ovunque a costo nullo. Pertanto sono completamente eliminati gli scambiatori di calore, essendo lo scambiatore "caldo" sostituito dalla camera di combustione e lo scambiatore "freddo" sostituito dall'atmosfera.

Di contro, nel caso in cui la natura del combustibile impedisca la combustione interna al ciclo, i sistemi ad aria sono svantaggiati. Infatti la costruzione di scambiatori di calore aria/fumi (dal lato caldo) o aria/aria (dal

lato freddo) comporta un notevole onere realizzativo e funzionale. I coefficienti di scambio termico per convezione tra un flusso d'aria ed una superficie, con gli usuali valori di velocità del flusso, sono compresi nel campo $30 - 300 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C})$, mentre per l'acqua in ebollizione sono nel campo tra 3.000 e $60.000 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C})$ e salgono addirittura a $6.000 - 120.000 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C})$ nel caso di vapore d'acqua in condensazione. Si comprende quindi facilmente come le superfici di scambio necessarie a parità di potenza termica da scambiare siano enormemente più estese nel caso di scambiatori ad aria. Si dovrà quindi, nel caso degli impianti motori ad aria a combustione esterna, trovare un compromesso tra le perdite per scambio termico con alta differenza di temperatura e la dimensione ragionevole delle superfici di scambio, tenendo presente che all'aumentare delle superfici di scambio aumentano anche le perdite di carico.

Alla luce delle considerazioni di cui sopra l'acqua si presenta come l'unico fluido di lavoro adatto in quanto presenta :

- costo bassissimo o nullo
- assoluta innocuità per l'uomo e per l'ambiente
- favorevoli caratteristiche termodinamiche (alto calore latente di vaporizzazione, elevata temperatura critica, elevato calore specifico e densità in fase liquida, elevati coefficienti di scambio termico durante i cambiamenti di fase)
- compatibilità con molti materiali, specie dopo opportuno trattamento di demineralizzazione
- reperibilità in ogni luogo e in ogni momento

ed è stata pertanto scelta come fluido di lavoro con il quale realizzare il prototipo oggetto del progetto.

3.3.2 Scelta della caldaia

Per la scelta della caldaia è stata ovviamente coinvolta la ditta Toscoaragonese in qualità di costruttore di caldaie a biomassa e partner del progetto Moderno.

Poiché il mercato delle caldaie a biomassa di potenza inferiore ai 100 kW termici è quasi esclusivamente costituito da utenze civili (edifici) che utilizzano acqua calda a temperatura inferiore a 90°C per riscaldamento invernale e produzione di acqua calda sanitaria, tutti i fabbricanti concentrano i loro sforzi di sviluppo in questo settore.

La Toscoaragonese non fa eccezione perché la sua linea di prodotto principale è costituita da caldaie per produzione di acqua calda alimentate a nocciolino di sansa.

In considerazione di quanto sopra non c'era interesse da parte dei costruttori per la costruzione di caldaie a vapore di piccola potenza e quindi non c'era nemmeno disponibilità commerciale di caldaie di questo tipo per le quali si sarebbe in ogni caso reso necessario uno sforzo di sviluppo prodotto dedicato da parte di qualsiasi costruttore.

Toscoaragonese ha quindi raccolto la sfida costruttiva proveniente dallo sviluppo e costruzione di una caldaia alimentata a nocciolino di sansa in grado di produrre vapore acqueo con la qualità e la quantità necessarie per alimentare il prototipo di microgeneratore oggetto del progetto Moderno.

Successivamente Toscoaragonese ha anche individuato una potenziale utenza di tipo più commerciale che necessitava di caldaie a vapore di piccola potenza fra alcuni clienti agroindustriali della società ubicati in Spagna.



Figura 3.2 – Caldaia a vapore Toscoaragonese.

Nella figura 3.2 è mostrata la caldaia a vapore alimentata a nocciolino di sansa sviluppata da Toscoaragonese per l'alimentazione del microgeneratore a vapore del progetto Moderno. Sono chiaramente individuabili i principali componenti della caldaia e cioè:

- Tramoggia di alimentazione nocciolino di sansa
- Ventilatore aria comburente e coclea adduzione nocciolino
- Bruciatore della caldaia
- Corpo cilindrico di produzione vapore
- Quadro elettrico di controllo



Figura 3.3 – Caldaia Toscoaragonese con produzione di vapore acqueo.

Come visibile nella figura 3.3 la caldaia a vapore della Toscoaragonese è stata accesa e provata il 28/1/2011 allo scopo di verificare l'effettiva generazione di vapore tramite combustione di nocciolino di sansa.

Toscoaragonese ha posto particolare attenzione nella realizzazione di una caldaia a biomassa in grado di produrre vapore ad una pressione massima di 5 bar e pertanto esente dall'obbligo della presenza di un conduttore patentato imposto dalla normativa italiana che renderebbe impraticabile ed antieconomico l'esercizio del microgeneratore.



Figura 3.4 – Manometro pressione del vapore caldaia Toscoaragonese.

Nella figura 3.4 è visibile il manometro della pressione del vapore della caldaia della Toscoaragonese durante la prova effettuata il 28/1/2011. Durante la prova è stata raggiunta una pressione di 4,5 bar relativi ritenuta sufficiente dal Dipartimento di Energetica e dalla Costruzioni Ottico Meccaniche per la generazione di vapore saturo di qualità sufficiente per l'azionamento del motore a vapore ideato nell'ambito del progetto.

La caldaia a vapore sviluppata e fornita da Toscoaragonese ha una potenza di $120 \text{ kW}_{\text{termici}}$ che è eccedente rispetto alla potenza di progetto del microgeneratore ed al suo probabile rendimento elettrico. Toscoaragonese ha però confermato di essere in grado di costruire una caldaia a vapore di potenza ridotta ed in grado di essere alimentata anche con cippato una volta definiti i fabbisogni di vapore del microgeneratore tramite esercizio dello stesso.

3.3.3 Scelta del tipo di impianto motore

Una volta scelta l'acqua come fluido motore, risulta automaticamente scelto anche il tipo di ciclo termodinamico, che è essenzialmente un ciclo Rankine a vapore d'acqua. Se le caratteristiche del generatore di vapore (caldaia) lo permettessero, è ben noto che sarebbe vantaggioso surriscaldare il vapore alquanto oltre la temperatura di saturazione che compete alla pressione della caldaia. In questo modo si innalzerebbe la temperatura a cui

viene fornito il calore (compatibilmente con la natura del combustibile e con la resistenza dei materiali della caldaia) e si avrebbe un vapore con minore “umidità” (cioè contenuto di fase liquida) durante l’espansione. Il ciclo di riferimento sarebbe allora il cosiddetto “ciclo Hirn”. Prudenzialmente, nel seguito, si farà riferimento ad una caldaia in grado di produrre vapore saturo o solo lievemente surriscaldato, per cui di fatto si assumerà di entrare nella fase di espansione ad uno stato termodinamico situato sulla curva limite superiore.

A questo punto resta da definire se sia preferibile una espansione in una macchina dinamica (turbina) o in una macchina volumetrica (motrice alternativa).

Dovendo limitare l’analisi a potenze meccaniche modeste, inferiori ai 10 kW, è estremamente difficile riuscire a reperire commercialmente turbomacchine a vapore di questa taglia. Si ritiene che costruire una piccola girante a vapore con adeguato rendimento sarebbe altrettanto difficile. Problematico sarebbe anche il collegamento tra una siffatta girante, che necessariamente dovrebbe ruotare ad altissima velocità, ed un generatore elettrico.

Si è quindi deciso di concentrare lo sforzo progettuale su una motrice alternativa a vapore. Anche limitando l’analisi a questa sola soluzione, rimangono tuttavia possibili varie opzioni e numerosi problemi da risolvere.

3.3.3.1 Considerazioni generali sulle motrici alternative a vapore

Le motrici alternative a vapore sono caratterizzate da un ciclo di lavoro a 6 trasformazioni (Fig. 3.5). Una valvola di ammissione lascia entrare il vapore proveniente dalla caldaia a partire dal punto morto superiore della corsa dello stantuffo (punto 1). Trascorso un tempo sufficiente per l’ammissione della dovuta quantità di vapore, la valvola di ammissione si chiude (punto 2) e il vapore si espande per tutta la restante corsa discendente del pistone, diminuendo la sua temperatura e pressione. In prossimità del punto morto inferiore della corsa (punto 3), si apre la valvola di scarico, dalla quale il vapore fluisce al condensatore. In un primo tratto (3-4), il vapore fluisce ad alta velocità per effetto della pressione residua nel punto 3. Dopo il punto 4 invece il vapore entro il cilindro è sostanzialmente a pressione atmosferica, ed esce spinto dal pistone nella sua corsa ascendente. La valvola di scarico si chiude, sovente con un certo anticipo rispetto al punto morto superiore (punto 5), e il vapore rimasto viene compresso nel volume residuo del cilindro prima che la valvola di ammissione si apra di nuovo (punto 6), ponendo il cilindro alla pressione della caldaia e iniziando un nuovo ciclo.

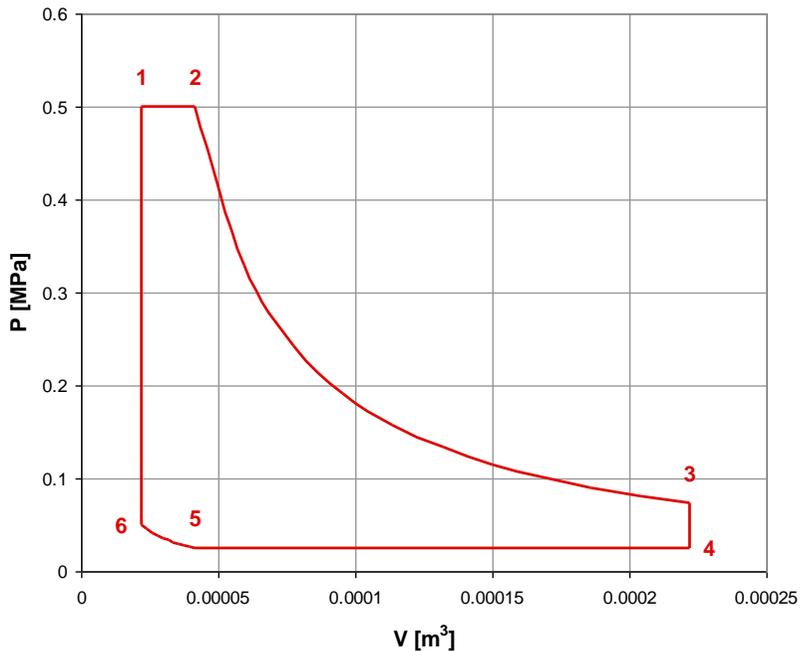


Figura 3.5 – Ciclo di motrice alternativa a vapore.

Le fasi di ammissione 1-2 e scarico 4-5 possono in prima battuta ritenersi a pressione e temperatura costante, anche se il valore di pressione interno al cilindro sarà minore di quello della caldaia durante l'ammissione e maggiore di quello del condensatore durante lo scarico, a causa delle inevitabili perdite di carico nei condotti e nelle luci di passaggio del fluido. Ciò limita il salto entalpico disponibile e quindi il lavoro ottenibile dal ciclo.

Le fasi di espansione 2-3 e di compressione 5-6 possono invece essere considerate adiabatiche, anche se in realtà lo scambio termico tra il fluido e le pareti del cilindro è abbastanza significativo. Le pareti sono spesso caratterizzate da una significativa inerzia termica, per cui tendono a mantenere sostanzialmente costante la propria temperatura. Il calore passa dal fluido alle pareti nelle fasi del ciclo in cui la temperatura è più alta e viceversa nelle fasi più fredde. In tal modo una significativa quantità di energia fluisce direttamente dalla caldaia al condensatore, senza partecipare al ciclo.

La perdita più importante per le motrici alternative a vapore è però quella per incompleta espansione e si estrinseca nello scarico libero 3-4. Considerazioni di ingombro, di costo e di limitazione delle perdite per attrito

meccanico consigliano di interrompere la corsa di espansione nel punto 3, prima che nel cilindro si sia raggiunta la pressione vigente al condensatore.

In linea di principio, la perdita per incompleta espansione è proporzionale, a parità di altre condizioni, alla durata della fase di ammissione. Pertanto, la progettazione del motore è frutto di un compromesso tra gli opposti obiettivi di potenza specifica, che richiederebbe una ammissione lunga, e di rendimento, che richiederebbe una ammissione breve. Il ciclo reale si modifica però sensibilmente rispetto a quello ideale sopra esposto, come si vedrà nel seguito.

3.3.3.2 Accoppiamento diretto tra motrice alternativa a vapore ed alternatore lineare

Una volta decisa l'adozione di una motrice alternativa, una innovazione possibile può riguardare la conversione del moto alternativo dello stantuffo in energia elettrica. A tal fine si può pensare di accoppiare direttamente lo stantuffo del motore a vapore con un alternatore lineare, senza impiegare il classico manovellismo di spinta per la conversione del moto da alternativo a rotativo.

Esempi di motori privi di manovellismo di spinta sono presenti a livello di prototipo o di progetto in vari ambiti tecnici, dai cosiddetti "Cavallini a vapore" usati per pompare liquidi, ai motori a pistoni liberi proposti a metà del secolo scorso come "generatori di gas caldi" per turbine a gas, sino ad alcuni motori Stirling o motori a combustione interna. Le proposte più recenti impiegano sovente generatori elettrici lineari.

Questa soluzione presenta alcuni evidenti vantaggi :

- eliminazione della massa, dell'ingombro e del costo del manovellismo di spinta
- riduzione delle esigenze di lubrificazione
- riduzione delle cause di guasto
- riduzione degli sforzi laterali sul pistone
- riduzione delle perdite meccaniche

Di contro, gli alternatori lineari hanno diffusione limitata e quindi verosimilmente costi elevati.

3.3.3.3 Simulazione dinamica del sistema

Il sistema costituito dal motore alternativo a vapore e dall'alternatore lineare può essere schematizzato come un sistema elastico ad un grado di libertà con smorzamento.

Per individuare alcuni parametri caratteristici del sistema, iniziamo l'analisi da un sistema elastico libero da forze esterne applicate. Il corpo di massa m costituito dall'insieme delle masse oscillanti è vincolato al telaio tramite una molla di costante k e uno smorzatore con smorzamento c in modo che il suo moto è governato dall'equazione differenziale:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

Per risolvere l'equazione differenziale, è utile introdurre una "equazione caratteristica associata":

$$mz^2 + cz + k = 0 \quad (2)$$

Le cui radici sono:

$$z_1 = \frac{-c + \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m} \quad \text{e} \quad z_2 = \frac{-c - \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m} \quad (3)$$

Si può dimostrare che, se $c^2 \neq 4mk$ la soluzione generale della equazione (1) è del tipo:

$$x = Ae^{z_1 t} + Be^{z_2 t} \quad (4)$$

mentre per $c^2 = 4mk$ si ha $x = (A + Bt)e^{-ct/2m}$.

Ponendo:

$$\sqrt{\frac{k}{m}} = \omega_n \quad \text{e} \quad \frac{c}{2m} = \zeta \quad (5)$$

La soluzione generale (4) diviene:

$$x = e^{-\zeta\omega_n t} \left(A e^{\sqrt{\zeta^2 - 1} \omega_n t} + B e^{-\sqrt{\zeta^2 - 1} \omega_n t} \right) \quad (6)$$

Se $c^2 > 4mk$, allora $\zeta^2 - 1 > 0$ e gli esponenti che compaiono nella (6) sono reali. Il moto è aperiodico smorzato. Se viceversa $c^2 < 4mk$, allora la (6) può essere scritta come:

$$x = e^{-\zeta\omega_n t} (Ae^{i\omega_s t} + Be^{-i\omega_s t}) \quad (7)$$

ove $i = \sqrt{-1}$ e $\omega_s = \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1}$. Per le proprietà della funzione esponenziale con esponente complesso, la (7) si può anche scrivere come:

$$x = e^{-\zeta\omega_n t} A \operatorname{sen}(\omega_s t + \varphi) \quad (8)$$

ove le costanti A e φ sono da determinare in funzione delle condizioni iniziali $x(0)$ e $\dot{x}(0)$. La pulsazione dell'oscillazione ω_s del sistema è legata alla frequenza dalla relazione $f = \omega_s / 2\pi$ ed è tanto più vicina alla pulsazione del sistema non smorzato ω_n quanto più piccolo è ζ .

Il moto rappresentato dalla (8) è un moto periodico smorzato, che si estingue tanto più rapidamente quanto più grande è ζ .

Nel caso in cui al sistema sia applicata una forza periodica, ad esempio con legge sinusoidale:

$$F = F_0 \operatorname{sen} \omega t \quad (9)$$

l'equazione differenziale (1) diviene

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \operatorname{sen} \omega t \quad (10)$$

L'integrale generale della (10) è la somma dell'integrale generale della equazione omogenea (1) più un integrale particolare della (10) che può essere scritto come:

$$x = X \operatorname{sen}(\omega t - \psi) \quad (11)$$

ove X e ψ sono costanti calcolabili in funzione dei parametri che compaiono nella (10).

L'integrale (8) dell'equazione omogenea si estingue abbastanza rapidamente. Pertanto, prescindendo dal transitorio iniziale, quello che realmente conta ai fini della progettazione è l'integrale particolare (11). Sostituendo la x calcolata con la (11) e le sue derivate nella (10) ed imponendo che la relazione sia soddisfatta per ogni valore di t , si hanno due equazioni :

$$\begin{aligned} (-m\omega^2 + k)\cos\psi + c\omega\sin\psi &= F_0 / X \\ (-m\omega^2 + k)\sin\psi + c\omega\cos\psi &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Quadrando e sommando membro a membro, si ha l'ampiezza del moto:

$$X = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2}} \quad (13)$$

Dalla seconda delle (12) si ha invece la fase:

$$t \ g\psi = \frac{c\omega}{k - m\omega^2} \quad (14)$$

La tangente individua l'angolo a meno di π . D'altra parte, per la validità delle (12), si può mostrare che dev'essere: $0 \leq \psi < \pi/2$ per $k - m\omega^2 > 0$ e $\pi/2 < \psi \leq \pi$ per $k - m\omega^2 < 0$. Per $k = m\omega^2$ si ha $\psi = \pi/2$. Si comprende meglio il significato fisico dei risultati trovati imponendo l'equilibrio delle forze per via grafica. Data una forza eccitatrice F_0 , la forza d'inerzia (ampiezza $m\omega^2 X$) è sfasata dell'angolo ψ in ritardo rispetto a F_0 . La forza elastica, di ampiezza kX , è in opposizione di fase rispetto alla forza di inerzia. La forza di attrito viscoso, di ampiezza $c\omega X$, è sfasata di $\pi/2$ in anticipo rispetto alla forza elastica. Per l'equilibrio, la risultante della forza d'inerzia, della forza elastica e della forza di attrito viscoso deve essere uguale ed opposta alla forza eccitatrice.

Usando la notazione introdotta in (5) :

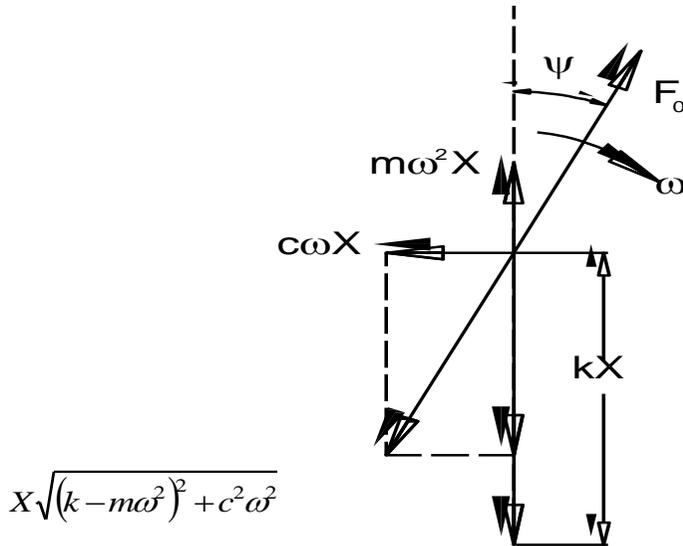


Figura 3.6 – Diagramma di equilibrio.

$$X = \frac{F_0}{m\omega_n^2 \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (15)$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}} \quad (16)$$

In figura 3.7 è mostrato l'andamento della ampiezza adimensionalizzata $Xm\omega_n^2/F_0$ in funzione di ω^2/ω_n^2 per diversi valori di ζ .

L'ampiezza della oscillazione raggiunge il massimo per

$$\omega = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2}$$

che è prossimo a ω_n per piccoli valori di smorzamento. Per $\zeta = 0$ e $\omega = \omega_n$, l'ampiezza diviene infinita. Il valore massimo di ampiezza in generale è :

$$X_{\max} = \frac{F_0/m}{2\zeta\omega_n^2\sqrt{1-2\zeta^2}} \quad (17)$$

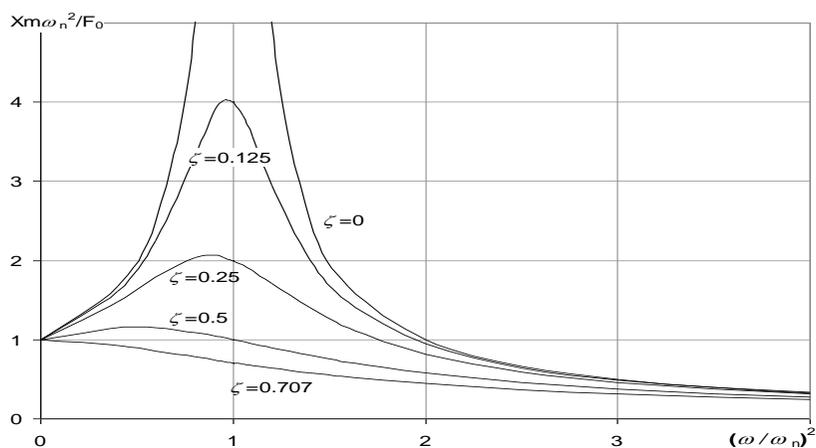


Figura 3.7 – Ampiezza di oscillazione in funzione della pulsazione per diversi valori di smorzamento.

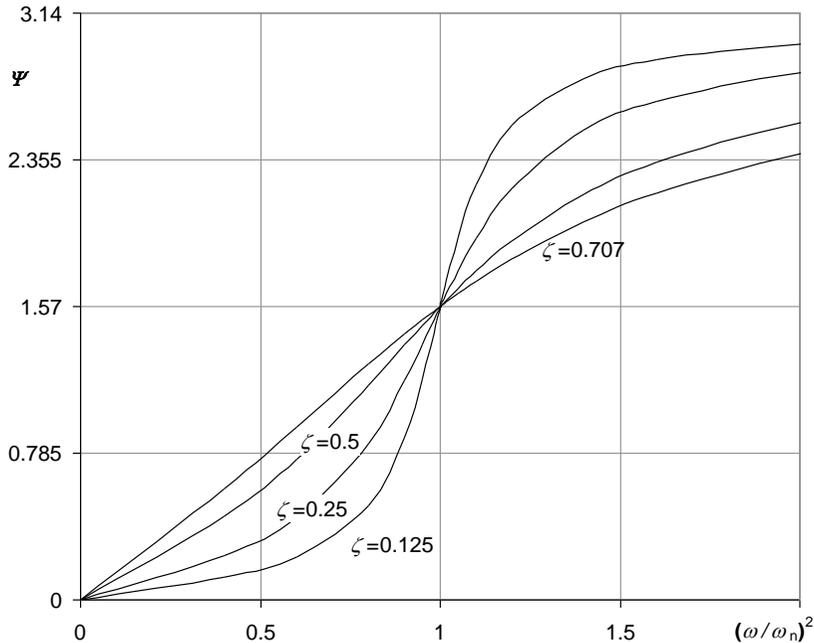


Figura 3.8 – Sfasamento delle oscillazioni in funzione della pulsazione per vari valori di smorzamento.

In figura 3.8 è mostrato lo sfasamento ψ , sempre in funzione di ω^2 / ω_n^2 . Si vede, come anticipato, che per $\omega < \omega_n$ si ha uno sfasamento minore di $\pi/2$ e tanto minore quanto minore è lo smorzamento ζ . Viceversa, per $\omega > \omega_n$ lo sfasamento tende a π , tanto più velocemente quanto più piccolo è ζ . Tutto quanto sopra vale per una forza eccitatrice sinusoidale. Per altre funzioni eccitrici periodiche si può effettuare una scomposizione in serie di Fourier e combinare le soluzioni ottenute per i vari termini della serie. L'equazione differenziale è infatti lineare e quindi vale il principio di sovrapposizione degli effetti.

Tuttavia, dovendo simulare il funzionamento complessivo del motore, con i suoi scambi di massa ed energia, conviene inserire direttamente l'equazione differenziale (10) nel sistema di equazioni complessivo, come descritto in seguito.

3.3.3.4 Simulazione termodinamica del sistema

In primo luogo occorre definire le condizioni al contorno per il funzionamento del motore. A tal fine si è costruito il ciclo dell'intero impianto rappresentato in figura 3.9.

Il primo dato è quello della pressione operativa della caldaia a vapore fornita dalla Toscoaragonese. Poiché la pressione di taratura della valvola di sicurezza presente sulla caldaia è di 5 bar relativi (cioè circa 6 bar assoluti), si stabilisce come condizione operativa normale una pressione di evaporazione di 5 bar assoluti. Risulta quindi individuata la trasformazione di evaporazione 2-3, alla temperatura di circa 152°C.

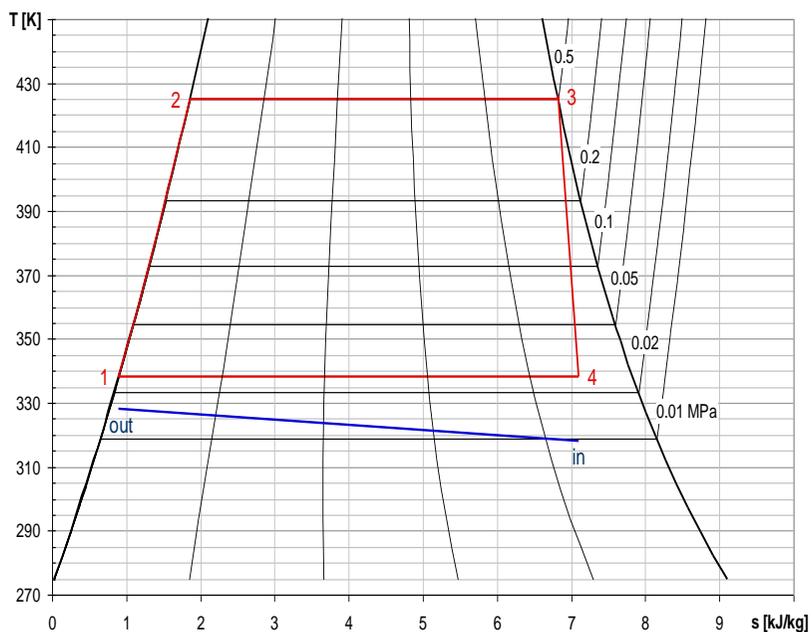


Figura 3.9 – Ciclo termodinamico del sistema completo.

Per fissare il lato inferiore del ciclo (tratto 4-1), bisogna individuare le condizioni vigenti al condensatore. A tal fine si suppone di voler produrre acqua calda a 60°C (condizione “out” sulla curva in blu) a partire da un ritorno di acqua dall’impianto a 45°C. (condizione “in”). Si impone una differenza di temperatura di 5°C tra il punto “out” dell’acqua e il punto 1 del ciclo, corrispondente all’uscita della condensa. In tal modo, la temperatura di condensazione risulta di 65°C, corrispondente ad una pressione di 0.025 MPa. Ovviamente questo valore è puramente esemplificativo e potrà essere variato in funzione delle esigenze dell’utenza termica.

A questo punto si può costruire anche il lato sinistro del ciclo, osservando che la trasformazione effettuata dalla pompa di alimento della caldaia non è visibile a questa scala, per cui il tratto 1-2 che rappresenta il riscaldamento del liquido prima dell'evaporazione risulta praticamente coincidente con la curva limite inferiore.

Il vapore uscente dalla caldaia è considerato saturo. Pertanto l'espansione evolve lungo una linea 3-4 dipendente dall'efficienza della trasformazione di espansione, cioè della macchina che materialmente estrae il lavoro dal vapore del ciclo. Supponendo ad esempio un rendimento di espansione $\eta = 0.75$, si ha la linea 3-4 mostrata in Figura 3.9. Tale linea è puramente teorica e ha l'unico scopo di mostrare come, con valori realistici di efficienza della macchina, il titolo del vapore all'uscita della stessa (punto 4) sia relativamente elevato ($x = 0.9$). In altri termini, solo il 10% del vapore, all'uscita del motore alternativo a vapore sarà condensato. Naturalmente il funzionamento della macchina dovrà essere compatibile con questa formazione di condensa.

3.3.3.5 Simulazione termodinamica del motore

Poichè la conformazione del motore, dei suoi organi accessori e dell'alternatore è descritta nel capitolo "Progetto elettromeccanico del microgeneratore" qui si farà unicamente riferimento alle caratteristiche che hanno influito sul modello termodinamico del funzionamento. Si è già descritto come sia possibile simulare un sistema oscillante eccitato da una forza periodica. Nella fattispecie del motore in esame, la forza elastica non è stata ottenuta con una molla a spirale in acciaio armonico a caratteristica sostanzialmente lineare, bensì con una molla ad aria. Tale soluzione è stata esplicitamente richiesta dal costruttore dell'alternatore lineare, per evitare spinte non perfettamente assiali dovute alle asimmetrie costruttive delle molle ad elica. Questo ha richiesto una modellazione dedicata alla molla ad aria, che si compone di due camere contrapposte ed è dotata di particolari accorgimenti per compensare gli inevitabili trafileamenti attraverso il gioco tra pistone e cilindro.

Vista l'analogia tra le problematiche di progettazione del motore a vapore e della molla ad aria, queste verranno trattate insieme al presente paragrafo. In ogni caso rimane un termine di elasticità convenzionale, legato alle molle a lamina che vincolano la parte mobile dell'alternatore allo statore.

Altro scostamento rispetto al sistema oscillante classico è la presenza di un termine di smorzamento di natura diversa rispetto ad un fenomeno di attrito tra solidi o di scorrimento di un fluido viscoso. Infatti nell'alternatore

si hanno conduttori elettrici percorsi da corrente che interagiscono con il campo magnetico costante generato dai magneti permanenti. La forza resistente dipende dall'intensità del campo magnetico e dalla corrente circolante. D'altra parte, la corrente circolante dipende dalla forza elettromotrice generata, che risente anche della natura e dall'entità del carico presente sul circuito. Pertanto, oltre alla modellazione dinamica e termodinamica, sarebbe stata necessaria anche una modellazione elettrica del generatore e del circuito ad esso collegato. Tale compito esula dagli obbiettivi del progetto e si è preferito introdurre l'alternatore nella simulazione complessiva come uno smorzamento fittizio, le cui caratteristiche sono state dedotte dai dati forniti dal costruttore.

Per il calcolo delle proprietà termodinamiche di aria e vapore si sono usate le funzioni del NIST (*National Institute of Standards and Technology*) racchiuse nel programma "Refprop", che possono essere incorporate in un foglio Excel e richiamate come funzioni a livello di cella o di macro.

Per la risoluzione del sistema di equazione differenziali che costituiscono il modello si è impiegato un algoritmo di integrazione di Runge Kutta del 4° ordine (cioè in grado di calcolare le funzioni che risolvono il sistema differenziale con una precisione dell'ordine dell'intervallo di calcolo elevato alla quinta potenza). L'intervallo di calcolo è stato fissato in 0.0001 secondi, in modo da seguire senza problemi tutti i fenomeni del ciclo. Per confronto, si noti che l'intero ciclo motore, volendosi produrre corrente alternata alla frequenza di 50 Hz, ha una durata di 0,02 secondi.

Il funzionamento è simulato a partire da motore fermo, in modo da dare un'idea di un possibile transitorio di avviamento. Pertanto il ciclo è ripetuto sino a che la sua forma diviene stabile e tutte le grandezze assumono un andamento periodico. Dalle simulazioni effettuate si è evinto che a tal fine sono sufficienti 4000 intervalli di integrazione, pari a 0.4 secondi.

Il programma è stato scritto usando l'editor Visual Basic incorporato nel software Microsoft Excel.

Le variabili dipendenti sono 12 e segnatamente :

- 1 - posizione pistone
- 2 - velocità pistone
- 3 - massa di vapore nel cilindro
- 4 - energia interna del vapore
- 5 - lavoro
- 6 - vapore consumato
- 7 - pressione camera anteriore molla ad aria
- 8 - massa aria camera anteriore molla ad aria
- 9 - temperatura camera anteriore molla ad aria

- 10- pressione camera posteriore molla ad aria
- 11- massa aria camera posteriore molla ad aria
- 12- temperatura camera posteriore molla ad aria

Dalla posizione del pistone è immediatamente ricavabile il volume della camera. Da questo e dalla massa di vapore presente all'interno si ricava la densità del vapore. Dall'energia interna complessiva si ricava il valore specifico dividendo per la massa. Densità ed energia interna specifica determinano univocamente lo stato termodinamico del vapore, per cui, usando le funzioni NIST si possono ricavare le altre funzioni di stato (temperatura, pressione, entalpia ed entropia).

Nota la temperatura del vapore si può ricavare anche la potenza termica dispersa per convezione alle pareti, usando la posizione istantanea del pistone per calcolare la superficie interna della camera.

Nota la velocità istantanea del pistone si ricava la potenza meccanica istantanea scambiata tra questo ed il vapore.

Nelle fasi di ammissione e di scarico occorre anche conoscere la portata di fluido entrante/uscente e le sue condizioni. E' stata esplicitamente prevista la possibilità che, in caso di sbilanciamento delle pressioni, i flussi di ammissione e scarico si possano invertire.

La velocità del fluido in ingresso è determinata dall'equazione dell'energia, a partire dalla differenza di entalpia tra le condizioni del generatore di vapore e le condizioni di pressione vigenti nel cilindro. Queste ultime sono determinate considerando una trasformazione isoentropica tra le due pressioni. Il salto entalpico così ottenuto è poi ridotto moltiplicandolo per un rendimento di espansione, rappresentativo delle perdite di carico subite dal vapore nel percorso di ingresso attraverso la valvola. Un controllo sulla velocità verifica l'eventuale superamento delle condizioni soniche, raggiunte le quali la velocità non può aumentare ulteriormente. Nota la pressione e l'entalpia del vapore entrante, si possono calcolare le altre grandezze di stato, prima tra tutte la densità che serve, nota la sezione della valvola e la velocità, a calcolare la portata in massa entrante nel cilindro. Dall'entalpia e dalla velocità si calcola anche l'entalpia totale $h_0 = h + v^2/2$ del vapore entrante, che servirà nel bilancio energetico complessivo del cilindro.

La fase di scarico è simulata analogamente, tranne il fatto che in questo caso le caratteristiche del fluido uscente sono calcolate facendo riferimento ad una trasformazione isoentropica a partire dalle condizioni del cilindro, alla quale viene poi applicato un rendimento di espansione.

E' stato simulato anche il trafileamento del vapore attraverso l'inevitabile gioco tra pistone e cilindro. A tal fine si è considerato il volume al di sotto del pistone comunicante con il condensatore e quindi alla stessa pressione di questo. Per il resto, il passaggio del fluido è stato modellato in analogia con il flusso uscente dalla luce di scarico, ma ovviamente il passaggio avviene per tutta la durata del ciclo. In questo caso non è prevista

l'inversione del ciclo, poiché la pressione nel cilindro non scende mai al di sotto di quella del condensatore.

Piuttosto complessa è la modellazione della molla ad aria, in quanto tale elemento deve mantenere stabile il suo funzionamento per un numero indefinito di corse, malgrado il trafileamento di aria attraverso il gioco. Per compensare tale effetto, si è prevista una luce di ingresso "di reset" che viene scoperta dal pistone nella zona in cui la pressione dovrebbe tornare a pressione atmosferica. Nel caso la pressione dovesse scendere al di sotto della pressione atmosferica perché una frazione della massa d'aria è andata perduta per trafileamento nella parte ad alta pressione del ciclo, la luce di reset provvede a far entrare nuova aria nella molla.

Si può a questo punto procedere a calcolare le derivate delle 12 variabili dipendenti, che hanno le seguenti espressioni:

$$\frac{dv}{dt} = [(p - p_{c.o.})A_d - (p_a - p_p)A_{a.s.} - c v - k(s - s_0)] / m_p + g \quad \text{velocità}$$

(18)

$$\frac{ds}{dt} = v \quad \text{posizione}$$

(19)

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_i - \dot{m}_{o.traf} - \dot{m}_{r.c.} \quad \text{massa vapore nel cilindro}$$

(20)

$$\frac{d\eta}{dt} = \dot{m}_i \quad \text{consumo vapore}$$

(21)

$$\frac{du}{dt} = \dot{m}_i h_{f,i} - \dot{m}_{o.traf} h_{f,o} - \dot{m}_{r.c.} h_{f,r} - \dot{q}_f \quad \text{energia interna vapore}$$

(22)

$$\frac{dl}{dt} = i \quad \text{lavoro compiuto}$$

(23)

$$\frac{dm_{as}}{dt} = -\dot{m}_{as-traf} - \dot{m}_{as-reset} \quad \text{massa molla ad aria anteriore}$$

(24)

$$\frac{dT_{as}}{dt} = \frac{\dot{i}_a - \dot{q}_a - h_{as-raf} - h_{as-reset}}{m_{as}R} (k-1)$$

temperatura molla ad aria
anteriore

(25)

$$\frac{dp_{as}}{dt} = p_{as} \left(\frac{1}{m_{as}} \frac{dm_{as}}{dt} + \frac{1}{T_{as}} \frac{dT_{as}}{dt} + \frac{A_{as}v}{V_{as}} \right)$$

pressione molla ad aria
anteriore

(26)

$$\frac{dm_{asp}}{dt} = -\dot{m}_{asptraf} - \dot{m}_{aspres}$$

massa molla ad aria
posteriore

(27)

$$\frac{dT_{asp}}{dt} = \frac{\dot{i}_a - \dot{q}_a - h_{as-raf} - h_{as-reset}}{m_{asp}R} (k-1)$$

temperatura molla ad aria
posteriore

(28)

$$\frac{dp_{asp}}{dt} = p_a \left(\frac{1}{m_{asp}} \frac{dm_{asp}}{dt} + \frac{1}{T_{asp}} \frac{dT_{asp}}{dt} + \frac{A_{asp}v}{V_{asp}} \right)$$

pressione molla ad aria
posteriore

(29)

Nelle precedenti espressioni valgono i seguenti significati dei simboli :

t	tempo	v	velocità	A	superficie pistone
s	posizione pistone	p	pressione	A_{as}	superficie molla ad aria
s_0	posizione riferimento	p_{cond}	pressione condensatore	p_a	pressione molla ad aria
p_p	pressione post. molla	c	smorzamento	k	costante elastica
m_p	massa mobile totale	g	accelerazione di gravità	m	massa vapore
\dot{m}_{in}	portata entrante	\dot{m}_{out}	portata scaricata	\dot{m}_{traf}	portata trafilata
m_v	vapore consumato	u	energia interna	h_0	entalpia totale
\dot{q}	potenza termica	\dot{j}	potenza meccanica	l	lavoro
m_{as}	massa aria molla	T_{as}	temperatura aria molla	p_{as}	pressione aria molla

Si può vedere che la (18) è la (10) particolarizzata al caso in esame, la (19) è il legame tra velocità e posizione, la (20) è il bilancio di massa del cilindro, la (21) è il calcolo del consumo, la (22) è il bilancio di energia, la (23) è il calcolo del lavoro, la (24) è il bilancio di massa della molla ad aria, la (25) è il bilancio di energia della molla ad aria (nel quale si è usata la relazione $c_p=R/(k-1)$, che lega il calore specifico a pressione costante alla costante R dei gas perfetti), la (26) è l'equazione dei gas perfetti e infine le (27-29) sono analoghe alle (24-26) per la camera posteriore della molla a gas.

Oltre al nucleo fondamentale del programma che risolve il sistema di equazioni differenziali, sono necessarie una serie di funzioni ausiliarie che calcolano le sezioni istantanee di passaggio delle luci di ammissione e di scarico, la sezione della luce di reset della molla ad aria e lo smorzamento equivalente all'azione dell'alternatore lineare. Quest'ultimo calcolo verrà descritto al paragrafo che riguarda la modellazione dell'alternatore lineare a partire dai dati sperimentali forniti dal costruttore.

Tra i parametri di input del programma, i principali sono :

- massa oscillante totale (pistone + parte mobile alternatore + pistone molla ad aria)
- rigidezza elastica (molle dell'alternatore)
- fattore d'attrito meccanico
- prodotto BL (Intensità di campo magnetico per lunghezza conduttori indotti)
- carico applicato al circuito (puramente resistivo)
- corrente di corto circuito dell'alternatore
- diametro del cilindro motore
- gioco tra pistone e cilindro (per il calcolo del trafilamento di vapore)
- temperatura della parete del cilindro
- coefficiente di scambio termico convettivo tra vapore e parete del cilindro
- dimensioni e fasatura delle luci di ammissione e scarico
- diametro del cilindro della molla ad aria
- gioco tra pistone e cilindro della molla ad aria
- volume aria al di sopra ed al di sotto del pistone ad aria
- condizioni vapore al generatore ed al condensatore

I valori istantanei scritti sul foglio di output sono :

- posizione e velocità dell'equipaggio mobile
- massa, pressione, temperatura ed energia interna del vapore nel cilindro
- lavoro compiuto
- vapore consumato
- massa, pressione e temperatura dell'aria nelle due camere della molla ad aria

In figura 3.10 si riporta un esempio di output riferito al tempo. Vengono pure calcolati alcuni risultati globali, tra i quali la potenza e il rendimento medi sull'intero periodo di funzionamento e la potenza a regime su un ciclo. Inoltre viene costantemente monitorata la corsa del pistone, che deve essere inferiore a 26 millimetri per non danneggiare l'alternatore. A tal fine, si devono regolare opportunamente i parametri di progetto e di esercizio del sistema, poiché i fine corsa previsti non devono intervenire nel normale funzionamento.

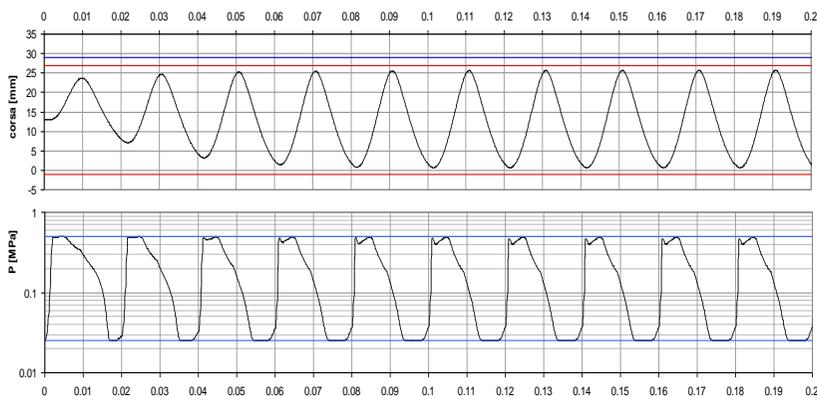


Figura 3.10 – Risultati della simulazione.

Come si vede in figura 3.10, il funzionamento appare stabile già dopo 0.2 secondi dall'avviamento. Ovviamente tale risultato è da confermare in pratica, perché il modello contiene numerose semplificazioni.

Nel grafico della corsa sono segnate con linee rosse le posizioni estreme ammesse. Il volume del cilindro cresce quando la posizione del pistone si muove verso la parte alta del grafico (nella realtà accade il contrario, poiché il cilindro ha la testa in alto ed il pistone è spinto dal vapore verso il basso). L'andamento della posizione con il tempo è abbastanza simile ad una sinusoidale, il che dovrebbe garantire una forma d'onda abbastanza regolare in uscita dall'alternatore lineare.

Nel grafico della pressione sono mostrate in blu le linee relative alla pressione del generatore di vapore e del condensatore. E' da notare che gli eventi di apertura e chiusura delle valvole sono temporizzati in modo fisso, essendo le valvole azionate da un piccolo motore sincrono. In particolare, l'apertura della valvola di ammissione avviene esattamente ai valori $t = 0.2, 0.4, 0.6$, etc. La fase di ammissione presenta un calo di pressione dopo un picco iniziale, presumibilmente riconducibile al fatto che la valvola di ammissione si apre in anticipo rispetto al punto morto superiore del pistone, per cui la pressione ha inizialmente un brusco aumento allorché il flusso proveniente dalla caldaia a vapore investe il pistone ancora in fase ascendente o fermo. In seguito il pistone inizia la sua corsa discendente, aumentando il volume del cilindro e richiamando altro vapore, il cui flusso è però limitato dalla sezione di passaggio della valvola.

Nella simulazione mostrata in figura 3.10, la chiusura della valvola di ammissione avviene dopo 5.6 millisecondi. La fase di ammissione è seguita dalla espansione del vapore nel cilindro. Tale fase non è adiabatica, in quanto si è simulato lo scambio termico convettivo. Dato il limitato effetto dello

scambio termico sul ciclo (in accordo con i ridottissimi tempi a disposizione), la schematizzazione dello scambio termico è molto semplificata, con un coefficiente di convezione ed una temperatura di parete costante.

All'aprirsi della valvola di scarico (dopo 9.2 millisecondi), la pressione crolla piuttosto rapidamente (si noti che la scala è logaritmica). La fase di scarico spontaneo non è però istantanea come nel ciclo ideale, a causa della sezione di scarico finita, nella quale si stabiliscono condizioni soniche. Terminata tale fase, si ha uno scarico forzato, con il pistone che spinge il vapore fuori dal cilindro: in tale fase la velocità del vapore è più bassa e praticamente la pressione nel cilindro coincide con quella del condensatore. Infine la valvola di scarico si chiude con 1 millisecondo di anticipo rispetto alla fine del ciclo, per cui la pressione inizia lentamente a risalire prima del brusco picco dovuto alla riapertura della valvola di ammissione.

Lo stesso ciclo è mostrato nella successiva Figura 3.11 in funzione della posizione del pistone.

Il ciclo mostrato in figura 3.11 è in realtà la sovrapposizione di tutti i cicli simulati, a partire dall'istante $t = 0.1$ secondi. Si vede che il funzionamento è praticamente stabile. Il ciclo è abbastanza regolare, se si eccettua il già notato picco di pressione all'apertura dell'ammissione, che tuttavia ha un'estensione molto limitata in termini di corsa del pistone, per cui il suo effetto sul funzionamento è trascurabile. E' piuttosto evidente l'apertura della valvola di scarico. La fasatura scelta rappresenta un compromesso tra la perdita di lavoro conseguente al brusco decremento di pressione che si ha quando la valvola si apre e il lavoro negativo che si dovrebbe spendere se la pressione rimanesse alta per una frazione maggiore della corsa ascendente del pistone. In altri termini, il punto più a destra del ciclo, corrispondente alla massima corsa del pistone, è circa a metà dell'altezza di quello che nel ciclo ideale sarebbe il tratto verticale dello scarico spontaneo. In tal modo si consegue il massimo rendimento.

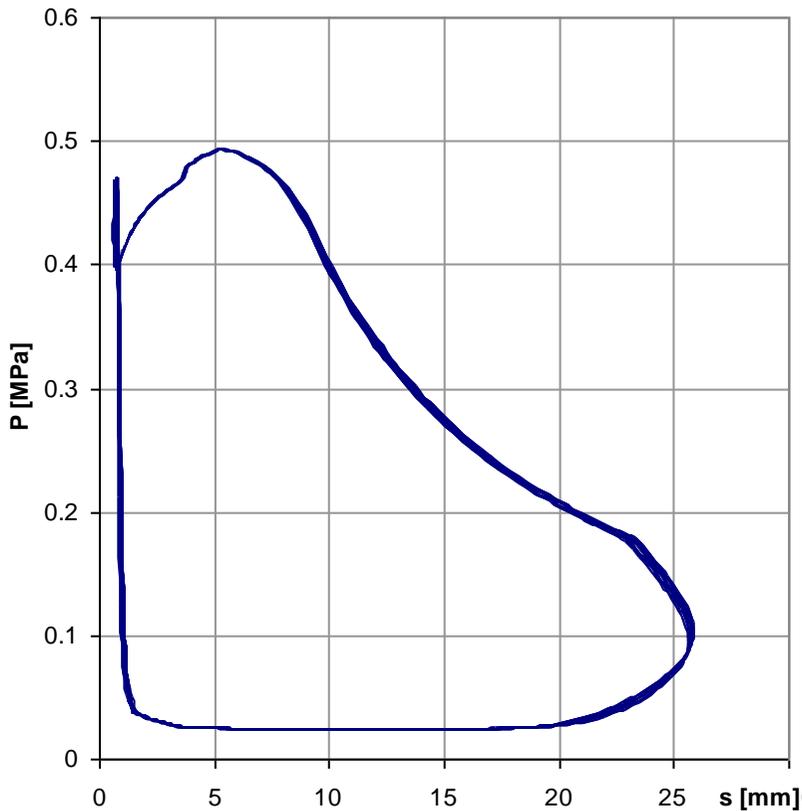


Figura 3.11 – Ciclo motore simulato.

A questo proposito, il motore simulato ha un rendimento di circa il 70%. Si sottolinea che tale rendimento riguarda la sola espansione, cioè la conversione dell'energia del vapore in lavoro meccanico. Altra cosa è il rendimento termodinamico complessivo del ciclo, che con i valori prima accennati per i parametri di generatore e condensatore, risulterebbe intorno al 13%. Quest'ultimo valore è da valutare tenendo presente che stiamo trattando un sistema di microgenerazione, nel quale l'energia termica è resa disponibile a temperatura attorno agli 80°C. Inoltre la taglia del motore è decisamente piccola: la potenza generata nella simulazione è di 4.8 kW: ovviamente su una taglia così piccola molti effetti di perdita hanno una maggiore incidenza percentuale.

3.3.3.6 Simulazione dell'alternatore

L'alternatore è stato acquistato negli Stati Uniti dal fornitore CFIC QDRIVE, modificato in fabbrica per il funzionamento a 50 Hz e 220 V. Si tratta di un alternatore a magneti permanenti montati su un equipaggio mobile a forma di stella ad otto punte, che scorre entro uno statore a costruzione lamellare, sul quale sono montati gli avvolgimenti fissi. L'equipaggio mobile è vincolato a scorrere senza attrito mediante una sospensione elastica realizzata con 4 lamine in acciaio armonico.

I dati riportati in figura 3.12 mostrano che l'alternatore possiede uno smorzamento meccanico ed una rigidità elastica intrinseche pari rispettivamente a 63.48 N·s/m e 166.58 kN/m. Tali valori sono stati direttamente inclusi nel modello. Il comportamento elastico è lineare con ottima approssimazione, come si vede dal grafico forza/spostamento che porta al calcolo della rigidezza elastica. In queste condizioni l'alternatore privo di carico elettrico ha un comportamento elastico smorzato come descritto nel grafico in basso (Free Decay). La frequenza delle oscillazioni libere è di 26,5 Hz. Da qui la necessità di introdurre una ulteriore rigidità elastica (cioè la molla ad aria), onde innalzare la suddetta frequenza propria del sistema, compensando anche l'aumento di massa. A questo proposito, il costruttore precisa che la massa dell'equipaggio mobile dell'alternatore è di poco superiore a 6 kg. Ad essa vanno aggiunti il pistone, la molla ad aria e gli organi di collegamento, la cui massa verrà specificata con precisione nella parte del report riguardante il progetto meccanico del motore.

Oltre ai dati meccanici, il costruttore precisa l'induttanza (57 mH) e la resistenza (0.96 Ohm) degli avvolgimenti dell'alternatore. Infine è specificato il coefficiente $B\ell$, cioè il prodotto tra l'intensità di campo magnetico B prodotto dai magneti permanenti e la lunghezza complessiva ℓ dei conduttori immersi nel campo. Tale parametro è ricavato sperimentalmente dal diagramma a destra in figura 3.12, che mostra la forza che si sviluppa sull'equipaggio mobile dell'alternatore in funzione della corrente circolante nei suoi avvolgimenti, in forza della legge di Lorentz $\vec{F} = \vec{I}\ell \times \vec{B}$. Anche tale diagramma è lineare con ottima approssimazione, per cui il coefficiente $B\ell$ è da ritenersi costante.

In aggiunta ai dati della figura 3.12, è da considerare la caratteristica dell'alternatore mostrata nella figura 3.13.

Test Date	Project	Motor Type	Serial Number	Mechanical Resistance R_m (N's/m)	Stiffness K (kN/m)
January 26, 2011	979CS	297	362	63.48	166.58
Free Decay Frequency f (Hz)	Moving Mass m (kg)	Inductance L_e (mH)	Maximum Displacement S_{max} (mm)	Electrical Resistance R_e (Ω)	Transduction Coefficient B_t (N/A)
26.50	6.0157	57	Not Tested	0.96	92.21

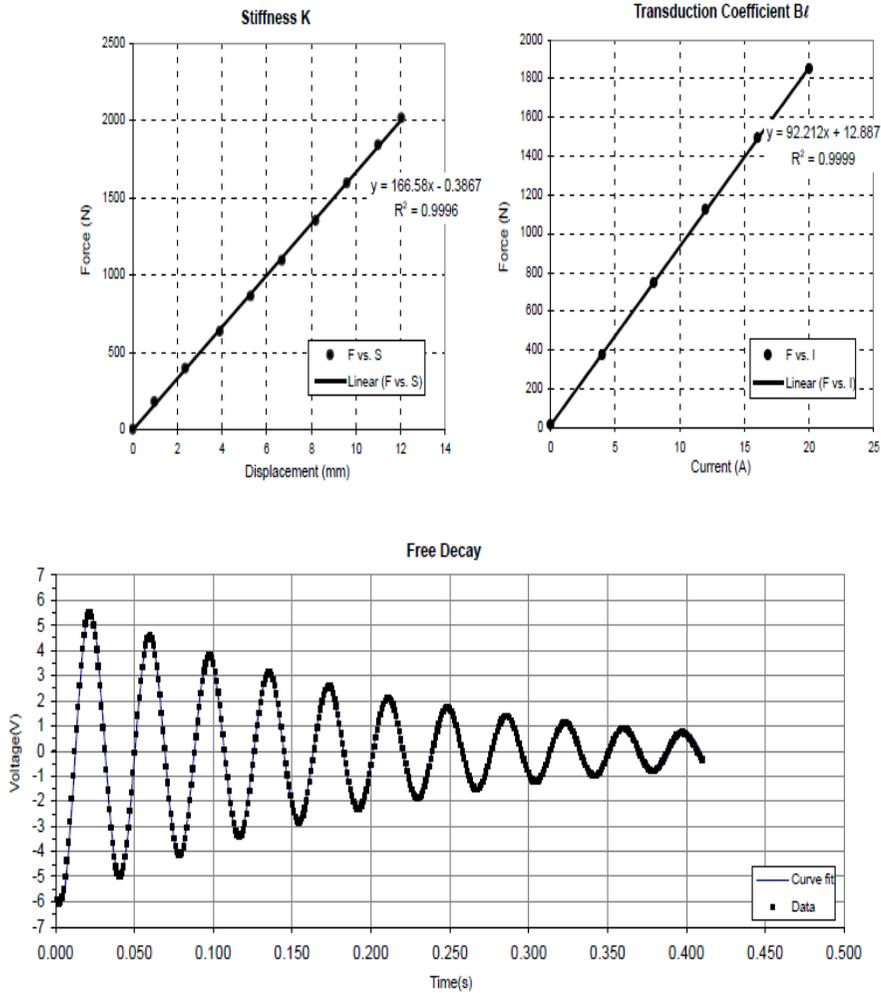


Figura 3.12 – Dati misurati sull'alternatore lineare.

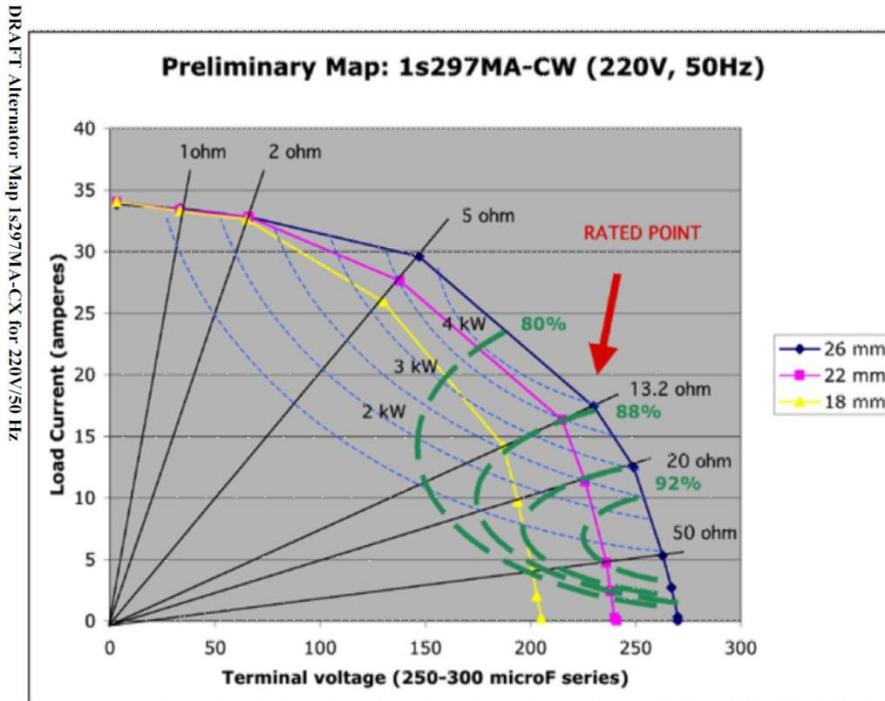


Figura 3.13 – Caratteristica dell’alternatore lineare.

In tale diagramma è mostrato l’andamento della corrente fornita al carico esterno (puramente resistivo) applicato all’alternatore, in funzione della tensione ai morsetti, per valori della corsa pari a 18, 22 e 26 mm.

Il costruttore prescrive l’aggiunta di un condensatore da 250 μF in serie al circuito, per compensare lo sfasamento introdotto dall’induttanza degli avvolgimenti.

Le curve sperimentali riportate sul diagramma sono assimilabili ad ellissi. Ciò significa che per ciascun valore della corsa si può assumere una relazione del tipo:

$$V = V_0 \sqrt{1 - \left(\frac{I}{I_0}\right)^2} \quad (30)$$

tra la tensione V e la corrente I , essendo V_0 la tensione a circuito aperto.

Trovata la tensione a circuito aperto per ciascun valore di corsa, si è costruita una relazione in forma di potenza $s = aV_0^b$ tra la corsa e tale

tensione. Essendo il carico resistivo $R = V/I$, si può calcolare la corrente come:

$$I = \frac{1}{\sqrt{R^2 \left(\frac{a}{s}\right)^{2/b} + \left(\frac{1}{I_0}\right)^2}} \quad (31)$$

Pertanto, nel modello si assegna il carico esterno e la corsa per trovare la corrente I . Da questa si calcola lo smorzamento che agisce sul sistema oscillante:

$$d = \frac{BL \cdot I \sqrt{2}}{\pi \cdot f \cdot s} + Rm \quad (32)$$

3.3.4 Progetto elettromeccanico del microgeneratore

3.3.4.1 Introduzione

Visto dall'angolazione particolare della progettazione elettromeccanica, il microgeneratore a vapore oggetto del progetto "Moderno" costituisce l'implementazione di un insieme di requisiti definiti sulla base delle considerazioni rivenienti da quanto esposto nei paragrafi precedenti, ovvero :

- Fluido di lavoro costituito da vapore saturo a bassa pressione
- Generazione del vapore tramite caldaia a biomassa lignocellulosica
- Motore alternativo a pistone libero
- Generazione elettrica per mezzo di un alternatore lineare, di bassa potenza, funzionante direttamente a tensione (220 V) e frequenza di rete (50 Hz).

La caldaia di produzione del vapore saturo alla pressione di 5 Bar, necessario per l'alimentazione del motore alternativo a vapore è stata fornita da Toscoaragonese, partner del progetto "Moderno".

Per l'approvvigionamento dell'alternatore lineare sono state compiute alcune ricerche ma si è rapidamente constatata l'esistenza di un singolo fornitore che disponesse di un prodotto con adeguato grado di maturità, oltre che di rispondenza generale alle esigenze del progetto. Questa unicità di fornitura, che potrebbe essere giudicata potenzialmente imprudente per lo sviluppo di un prodotto commerciale, non è stata però ritenuta elemento critico poiché il prodotto, ancorché coperto da brevetto, non ha elementi tecnologici tali da rendere intrinsecamente non riproducibile la sua funzione.

L'elemento saliente di questo componente è il fatto che esso lavora in modo totalmente assente da frizione (friction free), grazie al fatto che l'oscillatore, che genera la corrente elettrica (magneti mobili), è sospeso su molle, senza organi di guida.

Questa caratteristica richiama, quasi inevitabilmente il terzo requisito : cioè, che il motore alternativo sia esso pure concepito come friction free. Il concetto base è quello del cosiddetto "pistone libero", in cui, un pistone, rigidamente connesso con la parte oscillante dell'alternatore, scorre all'interno di un cilindro, senza nessun contatto con le pareti di questo. Il cilindro costituisce la camera di espansione del vapore che, introdotto per mezzo di un opportuno sistema di distribuzione provoca il moto alternativo.

Questa architettura ha in se un elemento di grande novità rispetto alla comune idea di motore a vapore che ci viene dalla tecnologia della prima rivoluzione industriale : la legge di moto della parte oscillante è determinata

solo dalla massa dell'oscillatore, dall'elasticità complessiva del sistema di sospensione e dal modo in cui si effettua l'ammissione del vapore. Non ci sono manovellismi o altri dispositivi che influenzano la traiettoria del pistone e la frequenza del moto.

In altre parole, il moto è di tipo risonante. Cioè, la massa, l'elasticità ed il ritmo di ammissione sono accordati in modo che si abbia l'oscillazione naturale opportuna, sia per generare l'onda elettrica desiderata ai capi dell'alternatore, sia, anche, per mantenere i corretti parametri di regolazione del ciclo termico.

Questo aspetto, insieme alla rispondenza alle esigenze del progetto, fa di questo dispositivo una reinterpretazione fortemente innovativa della tecnologia dei motori alternativi a vapore, a cui si è voluto attribuire un chiaro elemento identificativo con l'acronimo GEA – VA (Generatore Elettrico Alternativo a Vapore Acqueo) che costituisce l'elemento chiave del microgeneratore oggetto del progetto “Moderno”.

3.3.4.2. Descrizione

La figura 3.14 mostra lo schema complessivo del sistema di microgenerazione, di cui il generatore GEA-VA è la parte disegnata in blu.

Il vapore proveniente dalla caldaia passa attraverso un separatore di condensa, che ne estrae gli eventuali residui liquidi, prima di essere immesso nel generatore. Una piccola parte dello stesso vapore viene inviata, mediante una diramazione, ad azionare la pompa di recupero della condensa. Un secondo scaricatore di condensa raccoglie i residui liquidi che si formano nel motore, nell'anticamera di ammissione.

Il vapore utilizzato, che esce dallo scarico del generatore, viene quindi inviato al condensatore, in cui ritorna in fase liquida. Il condensato (acqua), assieme alla condensa raccolta direttamente dai due scaricatori, viene quindi reinviato, tramite pompa di circolazione, al serbatoio della caldaia.

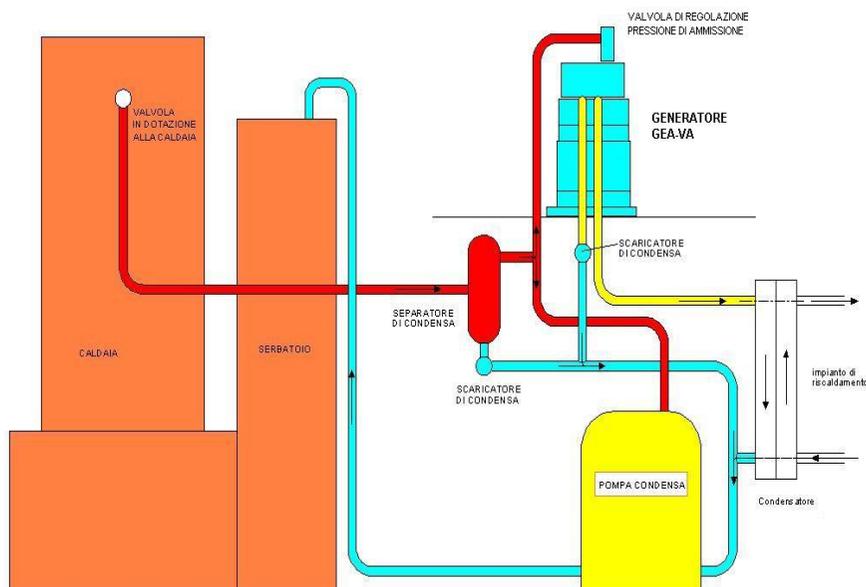


Figura 3.14 – Schema impianto di microgenerazione a vapore.

Nella figura 3.15 è invece mostrata una vista tridimensionale del generatore GEA-VA. Vediamo una struttura portante, costituita da due piastre collegate da quattro colonne, nella cui parte bassa è appeso l'alternatore lineare. Nella parte alta, appoggiato su quattro colonnini regolabili, c'è l'assieme motore, che costituisce, insieme alla struttura portante, l'oggetto specifico di progettazione e realizzazione meccanica.

Le parti oscillanti del motore e dell'alternatore sono collegate rigidamente con uno speciale giunto sferico che ha lo scopo di assicurare il corretto allineamento tra di esse.

La disposizione in verticale ha un preciso significato tecnico, di cui si parlerà più avanti. La posizione reciproca, con l'alternatore in basso ed il motore in alto, ha lo scopo di facilitare lo smaltimento del calore, quasi tutto concentrato nel motore.

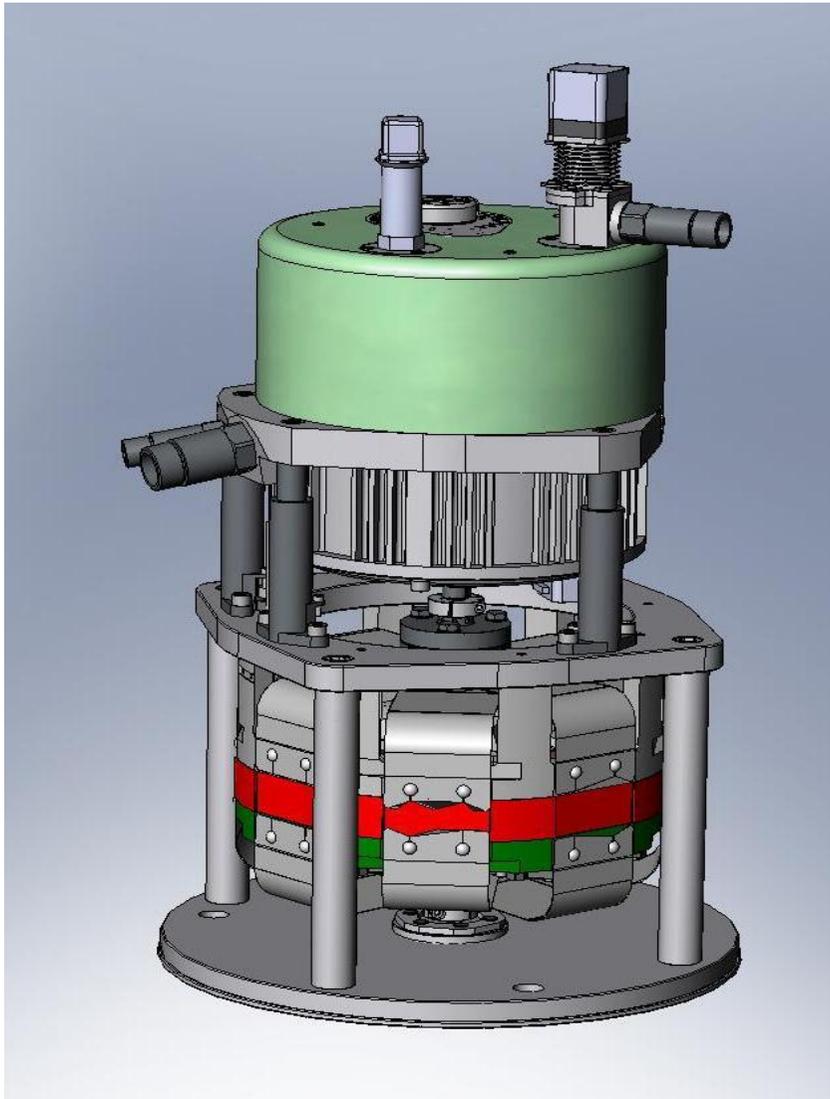


Figura 3.15 – Vista 3D generatore GEA-VA.

Nella parte più alta del motore c'è un carter di protezione termica in PTFE. Al di sopra di esso possiamo invece vedere la valvola di regolazione dell'ammissione, il sensore di misura della pressione ed il motore sincrono che aziona la distribuzione del vapore. La valvola, azionata con un motore passo-passo, è stata progettata e costruita espressamente per questo apparecchio.

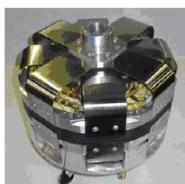
L'ingresso del vapore avviene attraverso il tubo visibile sulla valvola, mentre lo scarico avviene attraverso l'altro tubo che spunta dal centro del gruppo motore sulla sinistra. Il terzo tubo, che si vede vicino all'altro, serve per il recupero della condensa che, come già detto, può formarsi nell'anticamera di ammissione.

Sotto l'alternatore è montato un sistema di fine corsa meccanico che ha lo scopo di preservare le parti del motore e dell'alternatore da eventuali cause di malfunzionamento che avessero come effetto un ampliamento della corsa oltre i limiti ammessi. Esso è basato su due corone di respingenti in gomma solidali al fondo della struttura portante, su cui possono scontrare due corone meccaniche solidali all'oscillatore.

3.3.4.3 Scelta dell'alternatore lineare

Data per assegnata una potenza elettrica massima di circa 5 kW, ed una volta individuato un particolare fabbricante come il più promettente per competenza e maturità di prodotto, sono state esaminate due soluzioni estraendole dal catalogo del suddetto fabbricante :

- Due alternatori accoppiati da 2 kW ciascuno
- Un singolo alternatore da 5 kW



La prima soluzione poteva consentire un montaggio a pistoni contrapposti, con conseguente forte riduzione delle vibrazioni. Data la particolare modalità di moto del sistema, si è rapidamente constatato che la soluzione a due alternatori richiedeva un sostanziale raddoppio anche delle altre parti, con conseguente aggravio di costo. Peraltro, già per l'alternatore, il costo di un esemplare da 2 kW era poco inferiore a quello da 5 kW.

Quindi, dopo alcuni studi preliminari, il progetto si è sviluppato direttamente sull'alternatore da 5 kW STAR 1S297M/A. E' da far notare che la versione standard del prodotto è stata sviluppata per il mercato USA e quindi per funzionare frequenza di 60 Hz mentre la versione speciale utilizzata per il GEA-VA è cablata per 50 Hz ed ha una potenza elettrica di circa 4 kW.

I parametri che caratterizzano l'alternatore, dal punto di vista elettromeccanico e dinamico sono i seguenti :

- Corsa massima 26 mm
- Frequenza 50 Hz.
- Fattore di smorzamento dato dalla forza elettromotrice 80 N/A.
- Massa oscillante 6.2 Kg
- Rigidezza intrinseca del sistema di sospensione a molla 165 N/mm.
- Tensione 233.2 V (rms)
- Corrente erogata 17.7 A (rms)

Alcuni di questi dati sono ricavabili anche dal diagramma riportato nella figura 3.13 e dalla figura 3.12.

Il sistema motore deve incaricarsi di provocare la corsa richiesta, alla frequenza richiesta, vincendo lo smorzamento, per ottenere la tensione e la corrente indicate. Queste condizioni di lavoro, massime di riferimento, sono legate da relazioni fisiche definite nel modello di simulazione. Così che, riducendo, per esempio, la corsa si può ottenere una potenza minore su un carico utilizzatore più piccolo come risulta dalle considerazioni espresse nel paragrafo "Simulazione termodinamica del motore".

3.3.4.4 Strutturazione Dinamica

Applicando l'equazione dinamica del moto, al sistema elastico oscillante del solo alternatore, si vede subito che la rigidezza intrinseca delle sue molle non consente di arrivare alla frequenza desiderata di 50 Hz. Lo stesso costruttore (Fig. 3.12) dichiara una frequenza naturale di 26.5 Hz. Considerando che la rigidezza compare al quadrato nell'equazione e considerando anche il contributo di massa del pistone e delle altre parti ad esso solidali, si vede rapidamente che è necessario aggiungere rigidezza elastica per ulteriori 750 N/mm, cioè fino a oltre 5 volte quella propria dell'alternatore.

In un primo momento si è studiata la possibilità di realizzare un gruppo di molle elastiche meccaniche, da aggiungere in serie tra la parte fissa e quella oscillante dello stesso alternatore. La soluzione aveva un vantaggio indubbio, dato dal fatto che le molle meccaniche hanno un'elevata linearità. Nel nostro caso, ciò significa che, una volta tarata la rigidezza per ottenere la frequenza richiesta, essa rimane sintonizzata anche se si cambia l'ampiezza della corsa.

Purtroppo, un incremento così grande di rigidità significa dover applicare all'oscillatore un carico aggiuntivo elevatissimo (circa 1000 Kg al massimo della corsa). Questo, effettuato mediante contatto meccanico esponeva al rischio di forze trasversali che avrebbero provocato pericolosi sbandamenti del pistone, se non addirittura rischi di rotture nell'alternatore.

Di conseguenza, si è optato per una soluzione basata su una molla elastica ad aria. Sostanzialmente, si tratta di un secondo pistone, solidale con quello motore, che si muove all'interno di una camera chiusa, entro cui provoca compressioni e rarefazioni alternate dell'aria ivi contenuta. L'elemento elastico è l'aria stessa che, premendo uniformemente sul pistone assicura un trasferimento del carico rigorosamente assiale, se la superficie del pistone è ortogonale all'asse di moto.

In realtà, il comportamento elastico dell'aria non è lineare essendo questa soggetta ad una trasformazione politropica assimilabile ad una adiabatica. Questa non linearità si traduce in una modifica della legge del moto rispetto a quella sinusoidale di un moto armonico puro.

Una possibile controindicazione, per questa modifica, potrebbe essere costituita dal fatto che potrebbe introdurre distorsioni nella forma d'onda dell'elettricità da immettere in rete mediante parallelo alla stessa.

Questo problema, del resto comune ad altri tipi di generatori elettrici, può però essere facilmente risolto interponendo un opportuno circuito di rifasamento. Un secondo effetto della non linearità della molla ad aria è che il suo contributo varia al variare della corsa. Infatti, per il particolare andamento della trasformazione politropica, per una corsa minore la rigidità media equivalente diminuisce e di conseguenza, diminuisce la frequenza naturale di oscillazione. Pertanto per ovviare all'inconveniente è necessario cambiare il volume della camera d'aria nel caso in cui si debba cambiare la corsa, in modo da ripristinare la massima pressione necessaria.

Durante le analisi effettuate col modello di simulazione si è constatato che il miglior comportamento della molla ad aria si ottiene quando il retro del suo pistone è in comunicazione con l'ambiente esterno.

3.3.4.5 Sistema di Distribuzione

Una importante caratteristica del GEA-VA è che funziona con bassa pressione di alimentazione del vapore acqueo (5 bar). Ciò è molto utile per la sicurezza dell'impianto ma richiede sezioni di passaggio del vapore particolarmente ampie. Considerando l'area di tale sezione ed i tempi in cui essa deve rimanere aperta per l'ammissione e per lo scarico, risulta che quasi tutta la sezione frontale del cilindro è interessata dal sistema di distribuzione.

La distribuzione si compone di un piattello troncoconico, denominato farfalla, su cui sono praticate due aperture simmetriche a spicchio di cerchio. La farfalla è inserita in una struttura, denominata testa, che copia la sua superficie posteriore e su cui sono praticate altre aperture corrispondenti, tali che, quando la farfalla gira, le sue due aperture mettono in comunicazione la camera di espansione alternativamente con l'anticamera di ammissione e il volume di scarico.

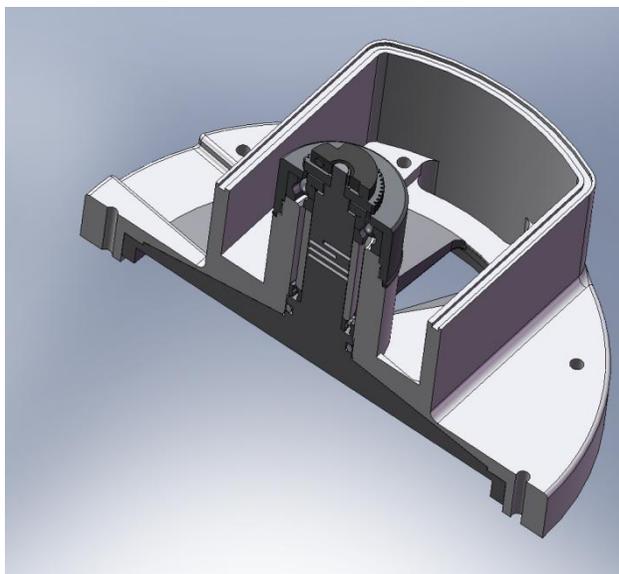


Figura 3.16 – Distribuzione del generatore GEA-VA.

La farfalla ruota a velocità costante di 1500 giri/minuto, in modo che, ad ogni giro, realizza due cicli di ammissione.

Durante la fase di scarico, il vapore passa prima in un volume separato ma incluso nello spazio dell'anticamera di ammissione. Da qui, attraverso due aperture laterali, passa in una camera secondaria di scarico, che costituisce il retro del pistone e da cui, attraverso il tubo di scarico è collegato direttamente al condensatore.

In questo modo, il retro del pistone si trova alla pressione del condensatore, che è inferiore alla pressione atmosferica, migliorando così il rendimento.

Un motore sincrono, azionato direttamente dalla tensione di rete, è collegato alla farfalla mediante una trasmissione di opportuno rapporto e gli conferisce pertanto il moto necessario. L'azionamento alla tensione di rete assicura infatti automaticamente una fasatura del generatore uguale a quella della rete stessa.

Nella figura 3.17 viene mostrata una sezione della parte motore del GEA-VA, in cui sono visibili la maggior parte dei suoi componenti, inclusi alcuni già descritti ed altri che saranno descritti in seguito.

La parte posteriore del pistone ad aria, come già accennato, è in comunicazione con l'ambiente esterno, anche se ciò non è visibile nella figura 3.17. Lo stesso vale anche per la fessura, presente sul cilindro dell'aria, indicata come feritoia di rifasamento.

La parte indicata come fondo mobile costituisce il fondo della camera d'aria. Essa può essere mossa assialmente mediante un meccanismo a vite, azionato da un motore passo-passo.

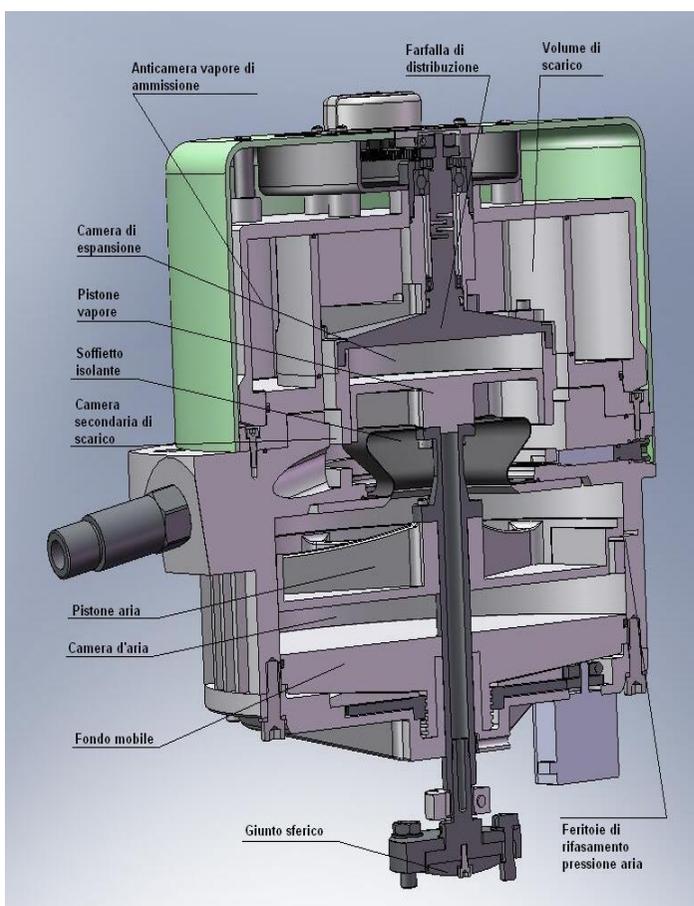


Figura 3.17 – Sezione della parte motore del generatore GEA-VA.

3.3.4.6 Gestione dei Giochi

Come già detto nell'introduzione, l'oscillatore è concepito per non avere nessun contatto con la parte fissa, se non quello esercitato dalle molle di sospensione e dalla pressione dei fluidi sui pistoni. Questo fatto è molto importante perché, in teoria, se si esclude l'usura dei cuscinetti di alcune parti accessorie e la fatica delle molle di sospensione, rende illimitata la vita del motore.

Per dare efficacia a questa caratteristica è necessario che, tra i cilindri che formano la camera d'aria e la camera di espansione del vapore ed i due rispettivi pistoni, rimanga del gioco, attraverso cui si verificano trafileamenti di vapore o di aria.

Siccome non si vuol sigillare questo gioco con fasce elastiche o altri accorgimenti striscianti di tenuta, per non perdere la caratteristica friction free, occorre che il gioco sia ridotto al minimo e che quindi vengano anche messi in atto accorgimenti opportuni per mitigarne gli effetti negativi.

La strategia di gestione dei giochi adottata è costituita dalle azioni descritte di seguito :

- **Compatibilità di materiali.** I pistoni ed i cilindri sono rigorosamente dello stesso materiale in modo da non avere effetti di dilatazione che possano aumentare il gioco o peggio provocare grippaggio durante la vita del motore.
- **Accuratezza delle lavorazioni.** Le tolleranze di lavorazione sono state attentamente studiate per assicurare il minimo gioco possibile
- **Disposizione delle parti.** Il generatore è montato in verticale, in modo che il peso dei pistoni non induca pericolose flessioni dell'asta di collegamento dell'oscillatore.
- **Accuratezza del montaggio.** Al montaggio dei pistoni è prevista un'operazione di accurata centratura di essi, rispetto ai rispettivi cilindri, in modo da distribuire uniformemente il gioco sulla circonferenza. Dopo il centraggio, i pistoni vengono bloccati nella loro posizione fino al momento della connessione meccanica con l'oscillatore dell'alternatore, che avviene, come già detto in precedenza, mediante uno speciale giunto sferico che preserva l'allineamento.
- **Il vapore che trafile dalla camera di espansione si raccoglie direttamente nella retrocamera di scarico, che è separata dall'ambiente esterno mediante un soffiello elastico di silicone.** Questo evita che si possa disperdere nell'ambiente e mantiene il salto di pressione tra lo stesso ambiente ed il condensatore. Ovviamente, si tratta di vapore

perso che provoca una piccola perdita di potenza. Questa è stata studiata col modello di simulazione ed è risultata trascurabile.

- L'aria che trafile dalla camera d'aria verso il retro, cioè verso l'ambiente esterno rischia di far perdere progressivamente pressione alla molla ad aria. Per ovviare a ciò, ci sono due feritoie, indicate in Figura 3.17 che mettono in comunicazione diretta l'ambiente esterno con la camera d'aria nel momento in cui, in base al ciclo, la pressione dei due ambienti deve risultare uguale. In questo modo, si recupera l'aria trafileta ripristinando la pressione nominale ad ogni ciclo.



Figura 3.18 – Componenti del motore



Figura 3.19 – Componenti del motore

3.3.4.7 Sistema di Controllo

Tutte le funzioni di controllo dell'apparecchiatura GEA-VA sono riunite in un quadro elettronico il cui schema preliminare è riportato in figura 3.21.

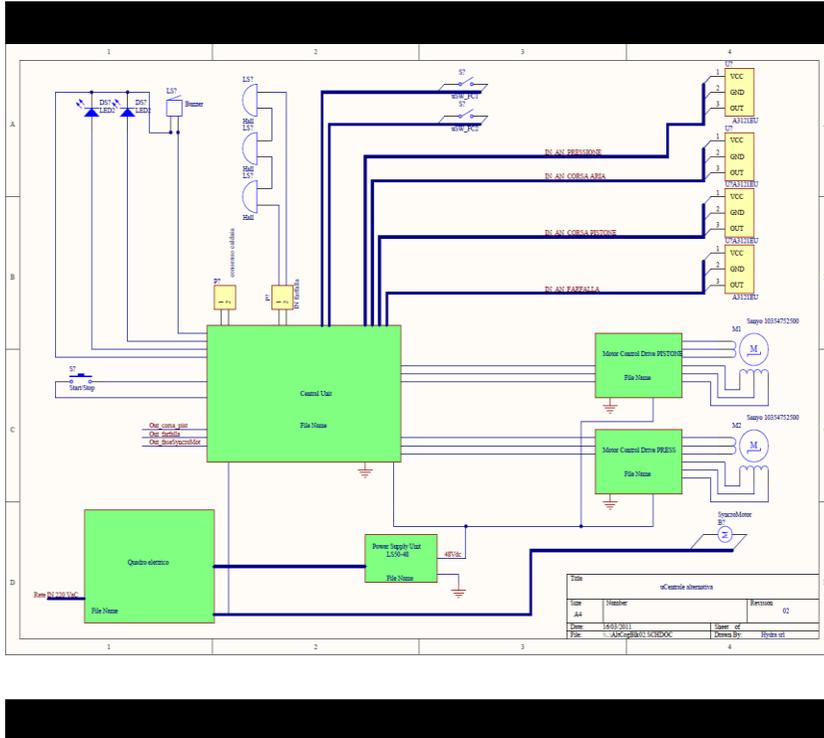


Figura 3.21 – Schema sistema di controllo del generatore GEA-VA.

Come già accennato nell'introduzione, il moto dell'oscillatore è determinato solo dal ciclo di espansione del vapore e dall'azione armonica del sistema elastico di sospensione.

Il ciclo di espansione è governato dalla distribuzione, che regola le fasi di ammissione e scarico, secondo una temporizzazione determinata, all'interno di ogni ciclo. La farfalla ruota a velocità costante, in modo da ripetere il ciclo con cadenza fissa di 50 Hz.

Durante la fase attiva del ciclo, quando la pressione del vapore all'interno della camera di espansione è superiore a quella del condensatore, l'oscillatore è spinto in avanti e, pur frenato dalla forza elettromagnetica che genera la corrente, carica il sistema elastico. Al termine della corsa in avanti, quando la spinta del vapore si esaurisce, inizia la fase di scarico, nella quale

l'oscillatore è spinto all'indietro dal sistema elastico che si scarica e che forniscono anche la spinta per la semionda elettromagnetica negativa.

Questo travaso di forze, deve avvenire in modo che, all'inizio del ciclo successivo, il pistone deve trovarsi in prossimità del punto morto superiore, nella posizione (fase) di miglior rendimento. Ciò si verifica solo se la spinta del vapore ed il contributo del sistema elastico sono dosati correttamente. Poiché la temporizzazione dell'ammissione e dello scarico sono prefissati dalla forma della farfalla ed anche la rigidità delle molle meccaniche è fissa, per regolare la fase, rimane soltanto la pressione del vapore ed il volume della camera d'aria.

Per gestire questi elementi ci sono due organi di regolazione ed alcuni sensori quali :

- Sensore index di zero della farfalla di distribuzione **SI**
- Sensore lineare di misura della corsa oscillatore **SC**
- Elettrovalvola di regolazione fine della pressione di ammissione **VP**
- Misuratore trasmettitore pressione di ammissione **SP**
- Dispositivo elettromeccanico di regolazione lunghezza camera d'aria **RA**
- Sensore lineare di misura della lunghezza camera d'aria **SA**

La lettura dei sensori e gli azionamenti dei dispositivi di regolazione sono controllati da una scheda elettronica a microprocessore secondo la logica seguente :

- Una maglia di controllo **VP-SP** viene regolata a loop chiuso per mantenere la pressione costante ad un valore assegnato, indipendentemente da eventuali fluttuazioni della pressione di caldaia. La regolazione avviene variando la sezione di passaggio tra la caldaia e l'anticamera di ammissione.
- Una seconda maglia di controllo, esterna alla precedente, dalla lettura di **SI** e di **SC** determina la fase corrente e modifica la pressione assegnata se detta fase non corrisponde a quella ottimale. Questa regolazione avviene in tempo reale, in fase di accensione per raggiungere il valore ottimale della fase ed in seguito per compensare possibili fluttuazioni delle condizioni operative o ambientali, incluse piccole fluttuazioni del carico elettrico esterno.
- Se è necessario variare in modo consistente la potenza elettrica erogata, occorre modificare l'ampiezza della corsa e, di conseguenza, la lunghezza della camera d'aria, secondo una legge prefissata. Per

fare ciò, si deve attivare una fase di cambio di marcia, nella quale entra in funzione una maglia di controllo **RA-SA** che sposta la parete di fondo alla nuova posizione assegnata. Contestualmente, viene variata anche la pressione assegnata alla maglia **VP-SP**, essa pure secondo una legge prefissata.

- La lettura della corsa **SC** fornisce anche l'informazione per due fine corsa software, che devono entrare in funzione, chiudendo l'afflusso di vapore prima di quelli meccanici menzionati sopra, in caso di mal funzionamento. I due fine corsa software sono dei parametri numerici che si confrontano con la posizione corrente dell'oscillatore. Uno è un parametro fisso che definisce la posizione di testa della camera di espansione ed uno è un parametro variabile che definisce la posizione effettiva della parete di fondo della camera d'aria, letta dal sensore **SA**.

Il campo di possibile variazione della potenza erogata è limitato dal fatto che, variando la corsa, si modifica lo spazio nocivo della camera di espansione del vapore, e quindi, il rendimento complessivo. La legge di variazione della lunghezza della camera d'aria e della pressione di ammissione, in funzione della potenza da erogare, è stata definita in via teorica utilizzando il modello di simulazione e sarà validata ed ottimizzata durante la fase sperimentale, così come anche il valore ottimale della fase.

Oltre agli elementi già menzionati sopra, il quadro elettronico incorpora alcune spie luminose, un segnalatore acustico, un interruttore di sicurezza e un segnale di "pronto all'invio vapore" inviato dal pannello di controllo della caldaia.

Il circuito di collegamento dell'alternatore con l'utilizzatore esterno, che pure è incluso nel pannello non è mostrato nello schema di Figura 3.14. Tale circuito include però il condensatore di compensazione dell'induttanza interna dell'alternatore ed un interruttore salvavita.

3.3.4.8 Prestazioni attese del microgeneratore GEA-VA

Nella tabella 3.5 si riportano le prestazioni progettuali attese dal prototipo di microgenerazione del GEA-VA.

GEA- VA

PRESTAZIONI PROGETTUALI ATTESE

Tipo motore	Alternativo
Alimentazione	Vapore saturo
Pressione di alimentazione vapore	4 bar
Temperatura vapore all'ingresso	150°C
Temperatura condensazione vapore	65°C
Alimentazione caldaia	Biomassa lignocellulosica
Tipo di generatore elettrico	Alternativo a magneti permanenti
Tensione/Frequenza/Fattore di potenza	230 V AC monofase/50 Hz
Potenza elettrica generatore	4 kWe
Consumo orario di combustibile	12 → 15 kg/h
Rendimento elettrico	8-10%
Rendimento complessivo dell'impianto	67-85%
Potenza termica utilizzabile	30 kWt
Temperatura acqua calda generata dal condensatore ad acqua	60°C

Tabella 3.5 – Prestazioni attese del microgeneratore GEA-VA.

4 Fabbisogni termici e potenzialità eoliche e solari

a cura di

Daniele Grifoni, Marco Napoli, Luca Fibbi, Giovanni Gualtieri, Francesca Calastrini, Gaetano Zipoli

4.1 Gradi Giorno per il riscaldamento

L'impiego della microgenerazione da biomassa risulta particolarmente conveniente laddove vi siano elevati fabbisogni termici e pertanto sia richiesta energia sotto forma di calore.

Il calcolo degli specifici fabbisogni energetici, ed in particolare di quelli termici, a livello di singola azienda, e/o di comprensorio agricolo, richiederebbe la conoscenza di informazioni altamente dettagliate in funzione delle specifiche esigenze connesse alle specifiche attività produttive. Tali analisi richiederebbero valutazioni quantomeno su base giornaliera, se non addirittura oraria.

Pertanto, pur non essendo la sola voce a determinare il fabbisogno termico, ci siamo focalizzati sul fabbisogno termico richiesto per il riscaldamento che può essere valutato più semplicemente sulla base delle caratteristiche climatiche del territorio.

4.1.1 Gradi Giorno D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412

Abbiamo utilizzato come base di riferimento i Gradi Giorno (GG) per il riscaldamento riportati nel D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412. Seguendo la definizione del citato D.P.R. i Gradi Giorno di una località, sono computati come la somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente interno, convenzionalmente fissata a 20 °C, e la temperatura media esterna giornaliera; l'unità di misura utilizzata è il Grado-Giorno. In particolare per periodo convenzionale di riscaldamento viene fatto riferimento al periodo dell'anno che mediamente presenta temperatura media giornaliera inferiore a 12°C.

Il territorio della Regione Toscana, in base al D.P.R. n° 412 è suddiviso nelle seguenti sei zone climatiche (Fig. 4.1) in funzione della sommatoria dei Gradi-Giorno:

Zona A: comuni aventi un numero di Gradi-Giorno non superiore a 600;

Zona B: comuni aventi un numero di Gradi-Giorno maggiore di 600 e non superiore a 900;

Zona C: comuni aventi un numero di Gradi-Giorno maggiore di 900 e non superiore a 1400;

Zona D: comuni aventi un numero di Gradi-Giorno maggiore di 1400 e non superiore a 2100;

Zona E: comuni aventi un numero di Gradi-Giorno maggiore di 2100 e non superiore a 3000;

Zona F: comuni aventi un numero di Gradi-Giorno maggiore di 3.000.

Dalla figura 4.1 emerge che le zone A e B non sono presenti sul territorio regionale toscano, essendo tipiche di aree più miti (Italia meridionale).

Il parametro Gradi-Giorno è sovente utilizzato per indicare il fabbisogno di energia necessaria per riscaldamento in quanto il citato D.P.R. definisce il fabbisogno energetico normalizzato per la climatizzazione invernale (FEN) come la quantità di energia primaria globalmente richiesta, nel corso di un anno, per mantenere negli ambienti riscaldati la temperatura al valore costante di 20 °C durante una stagione di riscaldamento, il cui periodo è convenzionalmente fissato per ciascuna zona climatica, diviso per il volume riscaldato e i gradi-giorno della località.

Nel D.P.R. sono riportati i gradi giorno e le zone climatiche per il riscaldamento invernale aggiornati in accordo con i successivi decreti del Ministero delle Attività Produttive (ex Ministero dell'Industria, del Commercio e dell'Artigianato).

È stato creato un geodatabase, relativo ai soli Comuni della Regione Toscana (Fig. 4.2). In questa rappresentazione ciascun Comune è caratterizzato da un valore omogeneo dei gradi giorno sull'intero territorio di competenza. Per i Comuni non presenti nella lista del D.P.R. si è fatto ricorso al testo del D.P.R. stesso che prevede in tale situazione di attribuire ai suddetti i gradi-giorno del Comune più vicino in linea d'aria, posto sullo stesso versante e rettificati, in aumento o in diminuzione, di una quantità pari ad un centesimo del numero di giorni di durata convenzionale del periodo di riscaldamento per ogni metro di quota sul livello del mare in più o in meno rispetto al comune di riferimento.

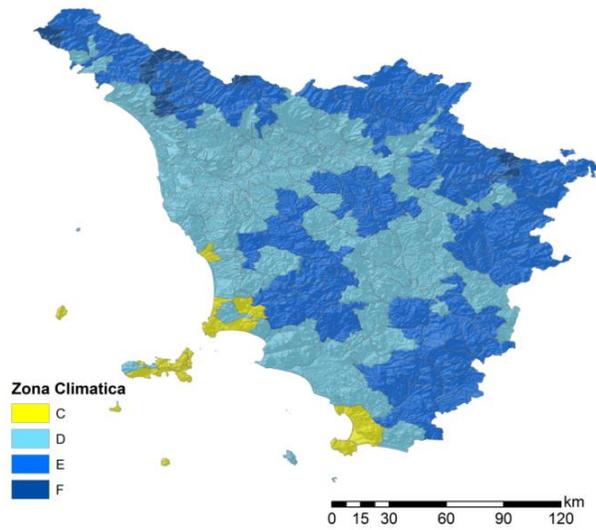


Figura 4.1 - Zone climatiche della Regione Toscana

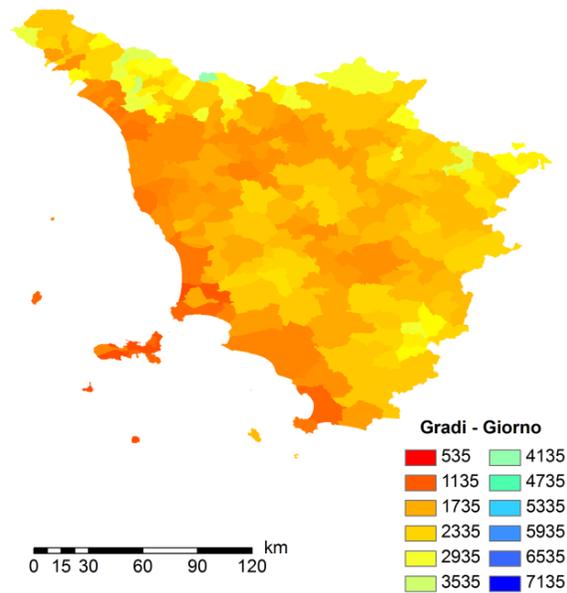


Figura 4.2 - Carta dei Comuni della Toscana classificati per Gradi-Giorno annui: valore omogeneo sull'area comunale

Il summenzionato D.P.R. prevede, inoltre, che il valore dei gradi-giorno possa variare all'interno di ciascun territorio Comunale in aumento o in diminuzione, di una quantità pari ad un centesimo del numero di giorni di durata convenzionale del periodo di riscaldamento per ogni metro di quota sul livello del mare in più o in meno rispetto alla Casa Comunale di riferimento. In figura 4.3 abbiamo ricalcolato il valore dei gradi giorno su ciascun punto dei vari territori comunali sulla base del criterio sopra detto, ottenendo così una informazione sui gradi giorno spazializzata su tutto il territorio regionale. Come si può vedere (Fig. 4.3), sebbene all'interno della stessa area Comunale si riscontri una certa continuità, in alcuni casi si determinano forti distorsioni confrontando i confini di Comuni adiacenti, soprattutto se questi presentano le rispettive Case Comunali a quote differenti e ancor più se rientrano in differenti aree climatiche. Tale mappa permette di meglio visualizzare fabbisogni termici per il riscaldamento sul territorio regionale.

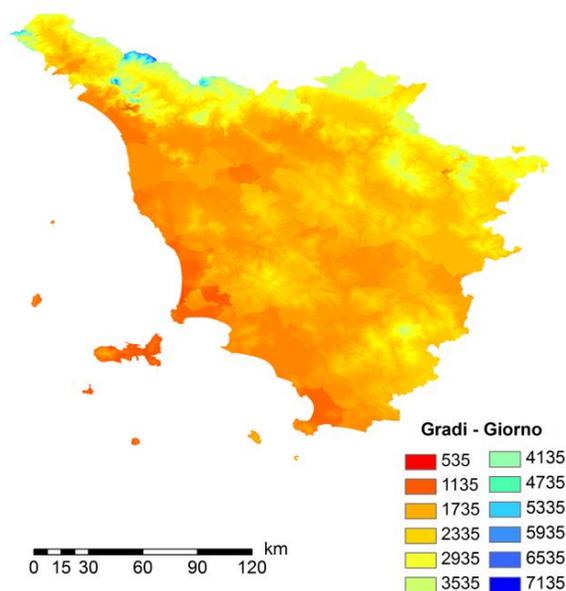


Figura 4.3 - Carta dei Comuni della Toscana classificati per Gradi-Giorno annui spazializzati secondo la metodologia proposta del D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412

4.1.2 Individuazione del possibile impatto del cambiamento climatico sui Gradi-Giorno per il riscaldamento

I dati relativi ai Gradi-Giorno analizzati nel precedente paragrafo sono stati calcolati per la gran parte su serie storiche di temperatura media giornaliera relative al periodo precedente gli anni '90 (non è dato di sapere quale sia il periodo esatto per ciascuna località menzionata) e pertanto è verosimile che negli ultimi anni tali valori possano aver subito delle variazioni in conseguenza del cambiamento climatico osservato su scala planetaria. Obiettivo del presente paragrafo è stato quello di quantificare il possibile impatto del cambiamento climatico sui gradi-giorno cumulati annualmente. A tal fine sono state individuate 21 stazioni meteorologiche distribuite sul territorio regionale con dati rilevati di temperatura minima e massima a partire dal 1955 e fino al 2008. La carta che segue (Fig. 4.4) rappresenta la distribuzione delle stazioni sul territorio regionale, mentre nella tabella 4.1 vengono indicati gli enti di appartenenza, le loro coordinate geografiche (UTM) e le rispettive quote.

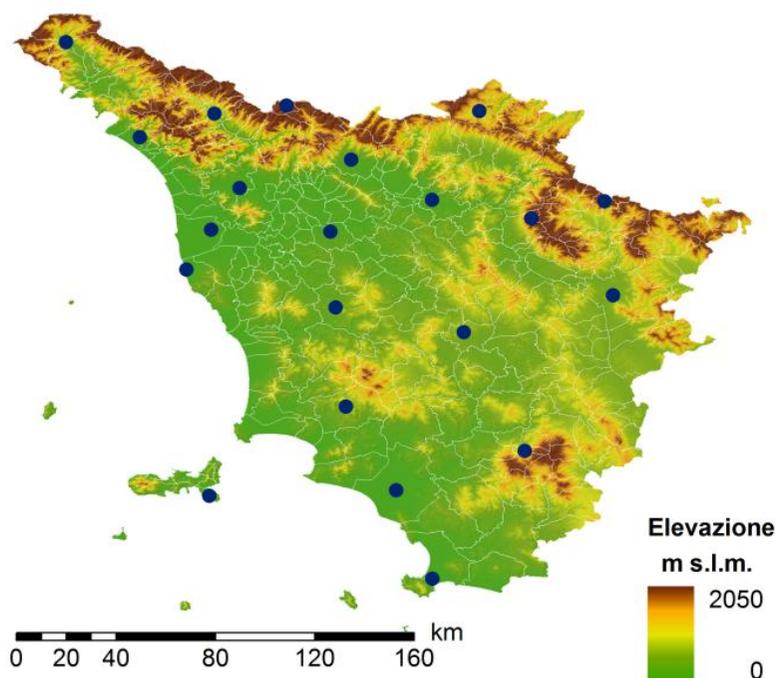


Figura 4.4 - Dislocazione delle 21 stazioni sul territorio Regionale

Stazione meteorologica	Ente di appartenenza	Coordinate UTM_X	Coordinate UTM_Y	Altitudine (m.s.l.m.)
Arezzo	Idrografico di Pisa	730805	4815384	249
Boscolungo	Idrografico di Pisa	633977	4888891	1340
Camaldoli	Idrografico di Pisa	727025	4853030	1110
Castel del Piano	Idrografico di Pisa	706920	4752060	596
Castelnuovo Garf.	Idrografico di Pisa	613275	4885305	280
Elba Calamita	Aeronautica Militare	614306	4731893	380
Firenzuola	Idrografico di Bologna	689640	4888022	454
Grosseto	Aeronautica Militare	669415	4735216	5
Livorno	Idrografico di Pisa	606140	4822595	9
Lucca	Idrografico di Pisa	620990	4855580	25
Massa	Idrografico di Pisa	591800	4875450	38
Massa Marittima	Idrografico di Pisa	653850	4768500	362
Orbetello	Idrografico di Pisa	681025	4699970	1
Peretola	Idrografico di Pisa	676985	4852101	38
Pisa	Idrografico di Pisa	613017	4838671	3
Pistoia	Idrografico di Pisa	653080	4867535	88
Pontremoli	UCEA	570117	4913436	247
San Miniato	Idrografico di Pisa	647740	4838630	132
Siena	Idrografico di Pisa	687630	4799185	346
Vallombrosa	Idrografico di Pisa	706000	4845450	972
Volterra	Idrografico di Pisa	649965	4808235	465

Tabella 4.1 - Anagrafica delle stazioni meteo impiegate.

La scelta del dataset climatico di temperature minime e massime giornaliere è dipesa essenzialmente dalla effettiva disponibilità di dati osservativi per un arco di tempo sufficientemente lungo. Le stazioni meteorologiche poste in ambiente urbano sono state scartate a priori allo scopo di evitare il probabile effetto “isola di calore” che avrebbe potuto alterare l’effettivo “segnale” climatico (per esempio a causa di successive modifiche ed ampliamenti del tessuto urbano vicino alla stazione di misura). Questa scelta potrebbe non risultare ideale dovendo analizzare eventuali variazioni del clima urbano, ma in questo caso, essendo il progetto incentrato su aree rurali, è stata ritenuta la più adeguata. Sono state, inoltre, scartate le serie climatiche con osservazioni relative ad un periodo di tempo troppo breve (inferiore a 30 anni). L’ubicazione delle 21 stazioni meteorologiche è stata considerata adatta per i nostri scopi (altitudine, latitudine e longitudine eterogenee fra di loro e quindi sufficientemente rappresentative dell’intera regione Toscana). Per ogni serie climatica di riferimento sono stati controllati i dati mancanti, che sono risultati in numero trascurabile (per ciascuna stazione meteorologica i dati mancanti sono andati dallo 0.2 al 5% rispetto

all'intero dataset). I dati delle stazioni sono stati sottoposti al controllo di qualità per la ricerca di dati "sospetti". Le serie storiche così ottenute sono state oggetto anche di omogeneizzazione (Craddock test).

A partire dai dati giornalieri delle temperature (valore medio giornaliero) è stato determinato il valore dei gradi-giorno cumulati annui (cumulati sul periodo compreso fra autunno e primavera) di ciascuna stazione per l'intero periodo disponibile.

Prima di procedere allo studio del trend dei gradi giorno per le varie località (periodo 1955-2008) si è proceduto all'effettuazione della verifica di coerenza fra i valori da noi calcolati e quelli riportati nel D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412; per ciascuna stazione impiegata è stato ricavato il valore medio annuo dei gradi-giorno relativo al periodo 1961-1990, tutto ciò al fine di poter confrontare i valori di Gradi-Giorno computati a partire dai dati delle 21 stazioni con il relativo valore di Gradi-Giorno riportato nel D.P.R..

Per tre delle stazioni utilizzate (Camaldoli, Elba Calamita e Vallombrosa), non essendo disponibili i dati nel DPR, è stata applicata la metodologia indicata nello stesso DPR per il loro calcolo. In figura 4.5 viene riportata la regressione fra i gradi giorno riportati nel decreto (ordinate) e quelli ricalcolati con i dati delle 21 stazioni disponibili per il periodo 1961-90.

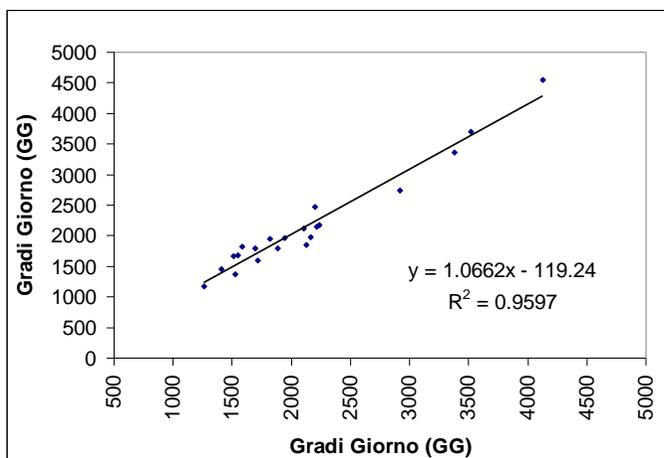
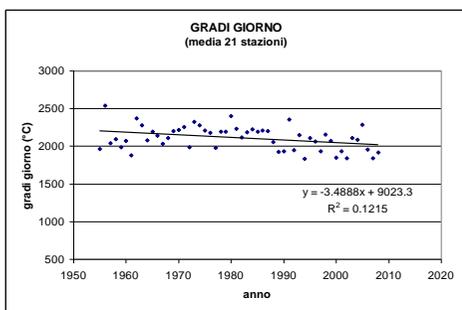


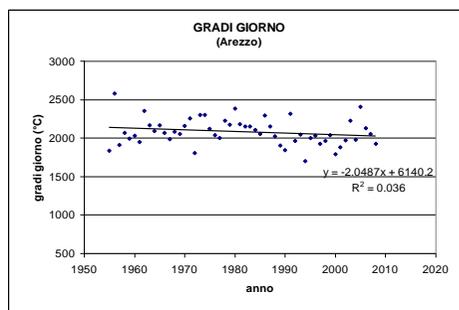
Figura 4.5 - Regressione per le 21 stazioni tra i Gradi-Giorno riportati nel D.P.R. (ascisse) e i Gradi-Giorno ricalcolati sulle 21 stazioni (ordinate)

Dal grafico si evidenzia un'ottima correlazione tra la le due serie di dati e ciò fornisce un supporto statisticamente valido per poter definire il campione di stazioni da noi impiegato (21 stazioni) sufficientemente rappresentativo al fine di poter stimare l'impatto del cambiamento climatico almeno su queste 21 stazioni.

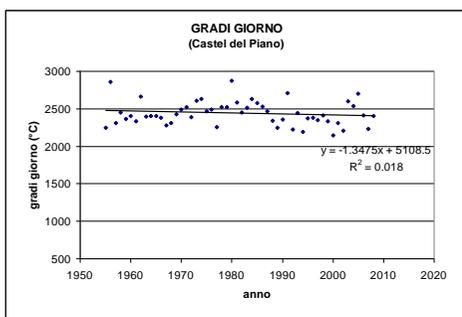
Il grafico visualizzato di seguito (Fig. 4.6a) rappresenta il trend della media dei gradi giorno delle 21 stazioni esaminate (periodo 1955-2008).



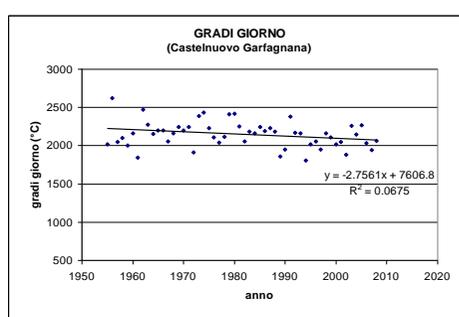
a



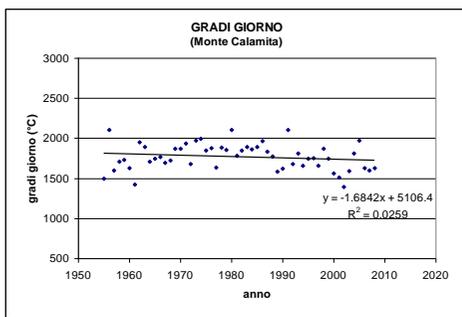
b



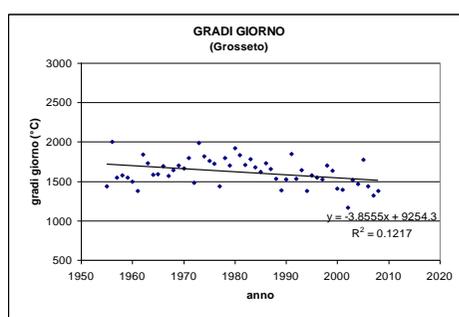
c



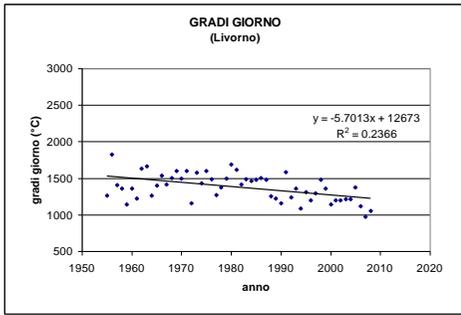
d



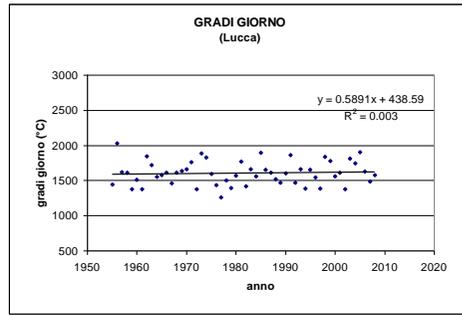
e



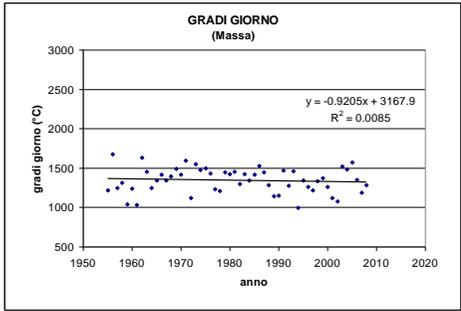
f



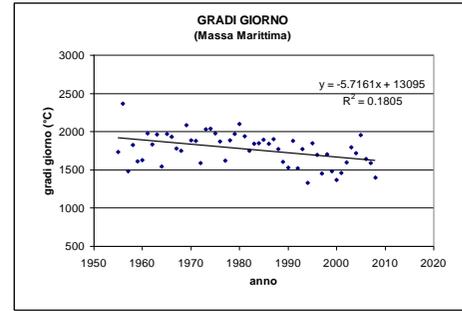
g



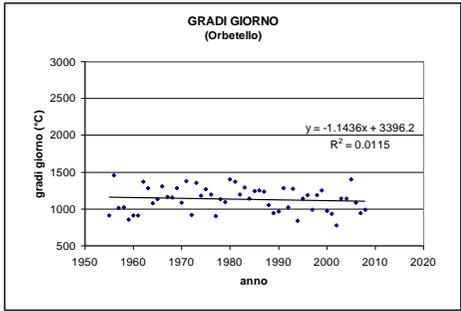
h



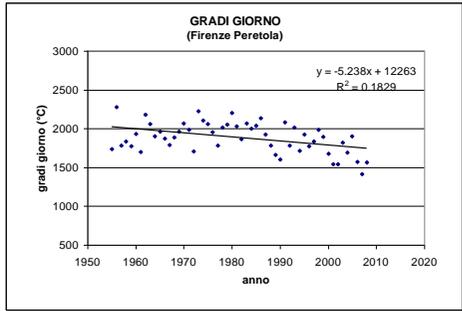
i



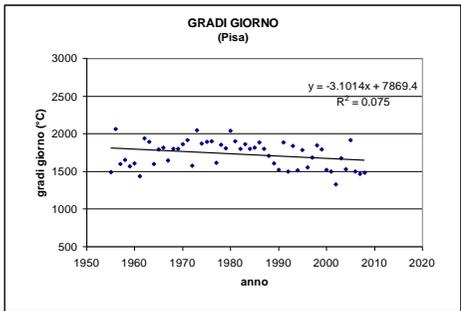
l



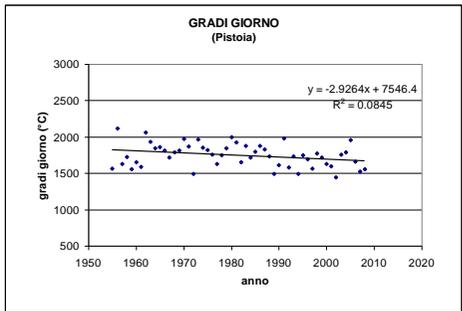
m



n



o



p

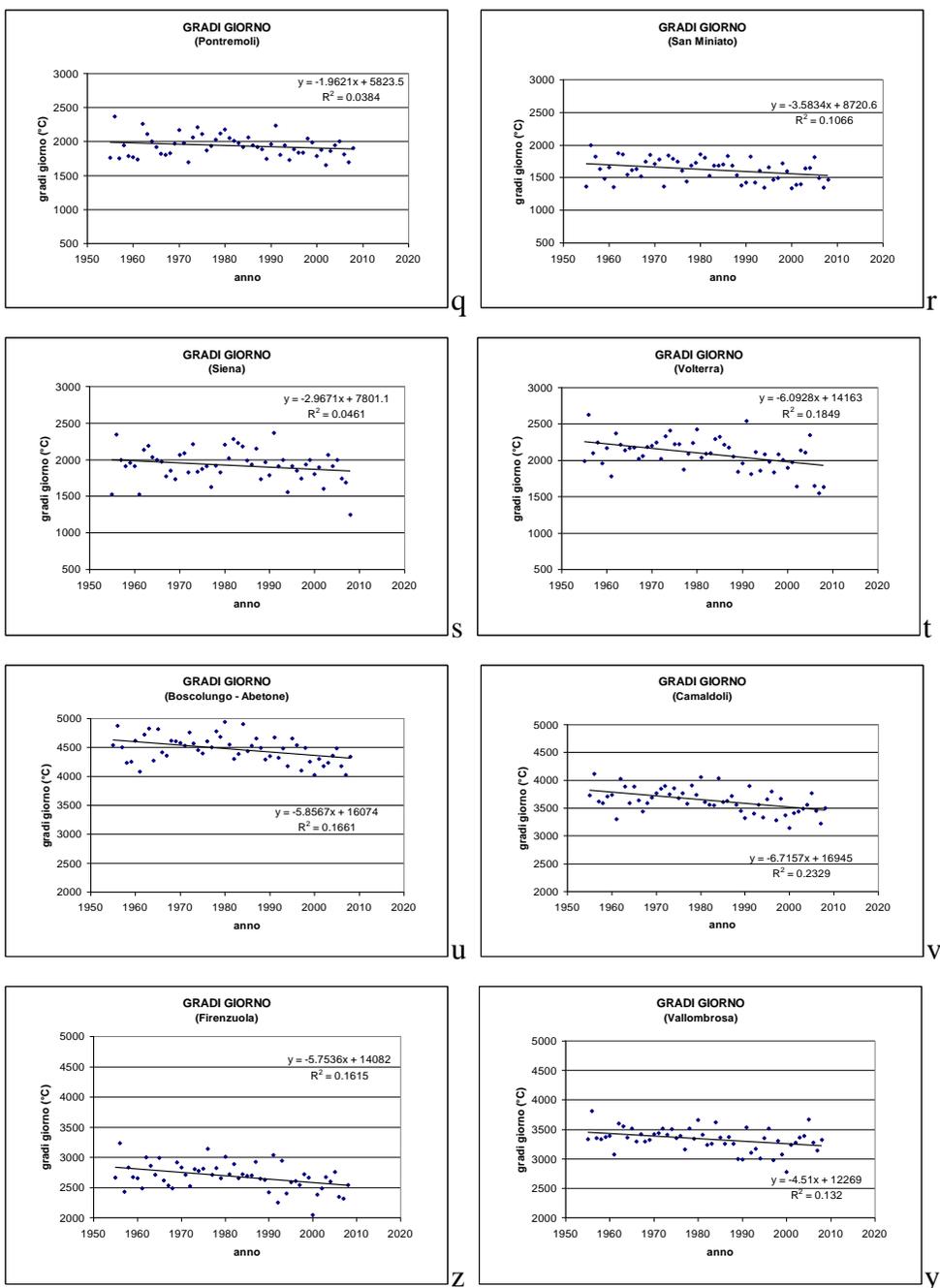


Figura 4.6 - Gradi Giorno annui nel periodo 1955 – 2008: valore medio sulle 21 stazioni (a) e sulle singole località (b-y)

Dall'analisi dei trend si nota come gran parte delle località (Fig. 4.6 b-y) siano caratterizzate dalla tendenza ad avere un numero di gradi giorno cumulati annui decrescenti nel periodo considerato.

Al fine di meglio visualizzare quali siano le zone del territorio regionale che hanno osservato un progressivo calo del numero di gradi giorno cumulati annui, abbiamo utilizzato i dati relativi alle 21 stazioni per la creazione di carte spazializzate di Gradi Giorno e delle relative variazioni. La spazializzazione dei gradi giorno sul territorio toscano utilizzando soltanto 21 stazioni non può avere la pretesa di modificare i dati di riferimento visualizzati nelle figure 4.2 e 4.3 precedentemente descritte, tuttavia può essere impiegata per mettere in risalto, in modo puramente indicativo le variazioni climatiche delle diverse aree della regione; per avere una indicazione più attendibile sarebbe necessario un numero di stazioni decisamente superiore. A tale proposito si sono prodotte le carte relative ai gradi giorno dei periodi 1961-1990 (Fig. 4.7), 1989-2008 (Fig. 4.8a) e 1999-2008 (Fig. 4.8b). I dati rilevati nelle 21 stazioni meteorologiche hanno rappresentato il punto di partenza per produrre la mappatura dei gradi giorno della Toscana e per poter spazializzare tali dati sul territorio regionale si è cercata la relazione intercorrente fra gradi-giorno e le variabili topografiche e morfologiche del territorio. Tenendo conto di tali relazioni, i dati puntuali delle 21 stazioni sono stati spazializzati, estendendoli all'intera Toscana.

La carta riferita al periodo 1961-1990 (Fig. 4.7) è stata confrontata geostatisticamente con le carte ottenute per i periodi 1989-2008 e 1999-2008.

Di seguito si riportano le variazioni dei Gradi-Giorno annui relativi al periodo 1989-2008 rispetto al periodo 1961-1990 in termini di variazione percentuale (Fig. 4.9a) e assoluta (Fig. 4.9b) e le variazioni dei Gradi-Giorno annui relativi al periodo 1999-2008 rispetto al periodo 1961-1990 in termini di variazione percentuale (Fig. 10a) e assoluta (Fig. 10b).

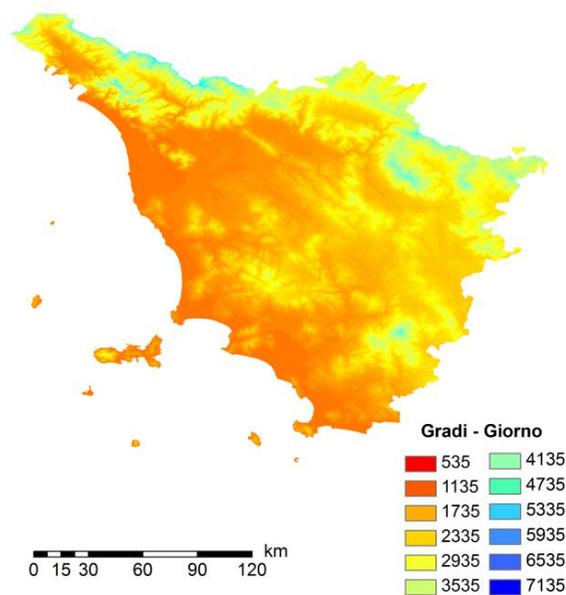


Figura 4.7 - Carta della distribuzione dei Gradi-Giorno annui spazializzati utilizzando le 21 stazioni selezionate sul territorio regionale. Periodo di riferimento 1961-1990

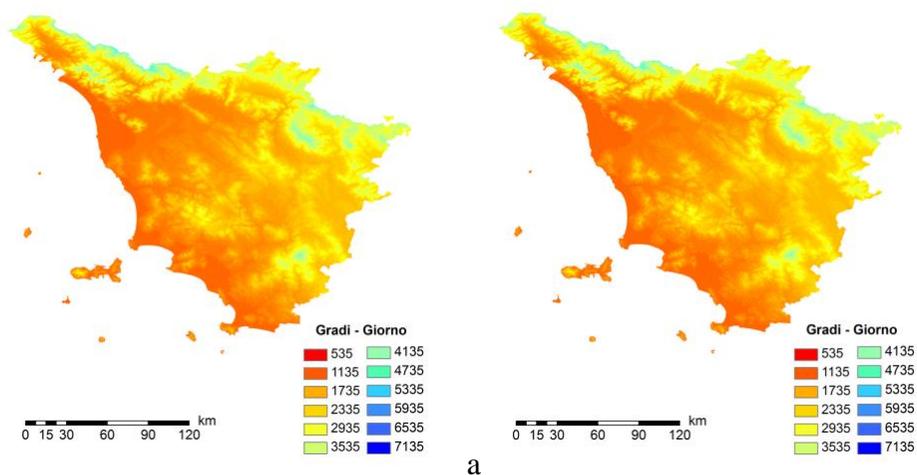


Figura 4.8 - Carta della distribuzione dei Gradi-Giorno annui spazializzati utilizzando le 21 stazioni selezionate sul territorio regionale. Periodi di riferimento 1989-2008 (a) e 1999-2008 (b)

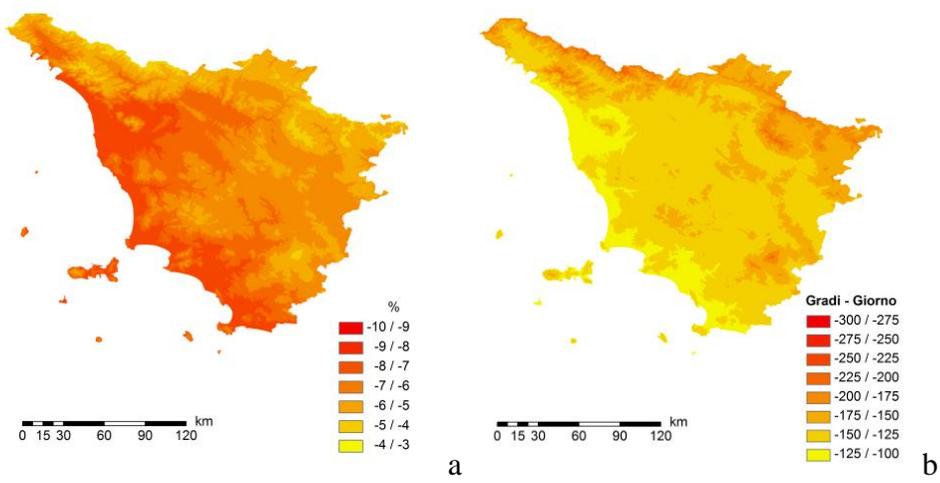


Figura 4.9 - Carta della variazione dei Gradi-Giorno annui relativi al periodo 1989-2008 rispetto al periodo 1961-1990: variazione percentuale (a) e variazione assoluta (b)

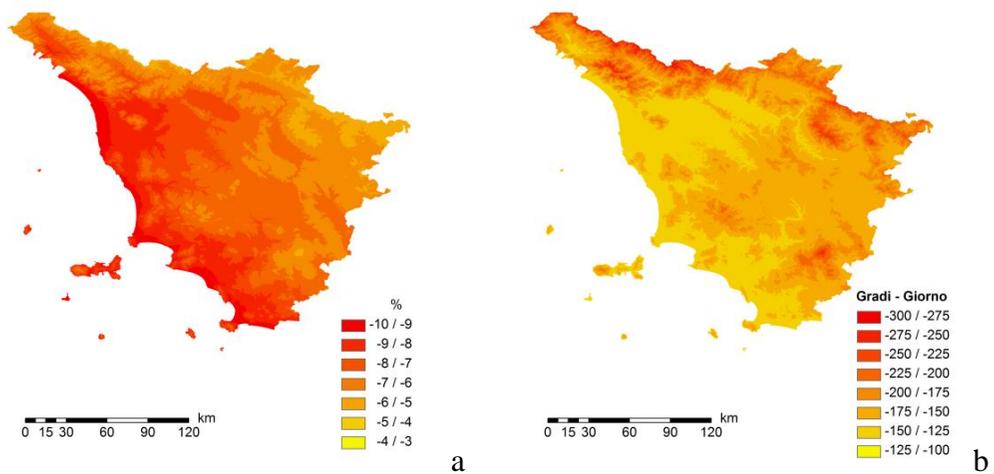


Figura 4.10 - Carta della variazione dei Gradi-Giorno annui relativi al periodo 1999-2008 rispetto al periodo 1961-1990: variazione percentuale (a) e variazione assoluta (b)

4.2 Radiazione solare

La disponibilità di dati di radiazione rilevati a terra da stazioni meteorologiche risulta piuttosto limitata, anche in considerazione della non certificata qualità dei dati rilevati. Inoltre l'ottenimento di carte di radiazione mediante la spazializzazione dei pochi dati disponibili, determinerebbe errori significativi nelle zone prive di stazioni. In considerazione di ciò l'approccio seguito nel presente progetto è stato quello di affidarsi a dati di radiazione stimati a livello territoriale mediante opportune metodologie. In particolare è stato valutata l'opportunità di impiegare dati stimati da satellite e da modello meteorologico. Da un confronto con dati rilevati a terra il dato stimato da satellite è risultato decisamente più coerente rispetto a quello stimato da modello meteorologico. Il possibile impiego di tali dati ai fini della stima della radiazione era già stato verificato nell'ambito del Progetto STAR finanziato dalla Regione Toscana nel 2009 (Vaccari et al., 2009). Nel presente lavoro l'archivio di tali dati è stato aggiornato e ulteriori procedure sono state implementate al fine di facilitare l'estrazione e l'analisi dei dati. I dati satellitari sono inoltre stati oggetto di ulteriori elaborazioni volte a rendere i dati più coerenti con le caratteristiche del territorio e con il loro impiego.

4.2.1 I dati DSSF

La figura 4.11 illustra l'estensione del dominio spaziale coperto dal satellite MSG2 relativamente all'area centrata sull'Europa, costituito da 651 righe e da 1701 colonne.

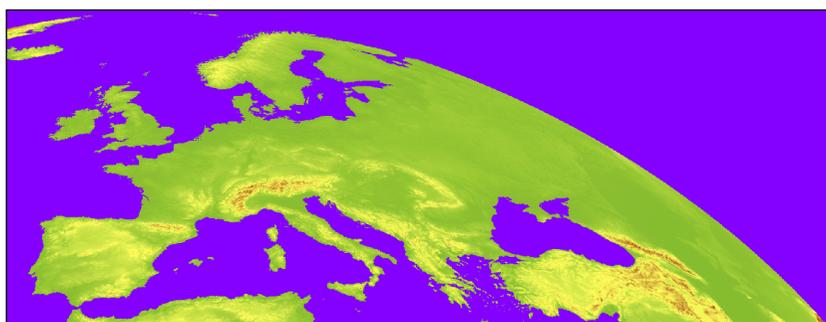


Figura 4.11 - Mappa dell'orografia del dominio spaziale sull'Europa coperto dal satellite MSG2. Fonte: <http://landsaf.meteo.pt>

In tabella 4.2 sono riassunte le caratteristiche dei dati di radiazione DSSF scaricati, archiviati ed elaborati nel presente lavoro.

Proprietà	Ente	EUMETSAT
	Iniziativa	Land Surface Analysis Satellite Applications Facility (LSA SAF)
Strumentazione	Satellite	MSG2
	Orbita satellite	geostazionaria
	Radiometro	MSG/SEVIRI
	Canali del radiometro	VIS 0.6 μ m, NIR 0.8 μ m, SWIR 1.6 μ m
Dominio spaziale	N. righe	651
	N. colonne	1701
	Area geografica	Europa
	Dimensione pixel (al Nadir)	3.1 Km
Variabile	Nome	Down-welling Surface Short-wave Radiation Flux (DSSF)
	Descrizione	Quantità di energia radiativa nel range di lunghezza d'onda 0.3 μ m-4.0 μ m per unità di tempo e superficie
	Unità di misura	W/m ²
	Formato	Intero
	Fattore di scala	10
	Codifica dato mancante	-1
Dati di radiazione	Codifica ore	UTC
	Passo temporale	30 minuti
	Tipo acquisizione	istantanea
	Formato	HDF5
Dati secondari	Copertura nuvolosa	Ottenuta dal <i>software</i> Nowcasting and Very Short Range Forecasting Satellite Application Facility (NWC SAF)
	Contenuto di vapore acqueo	Ottenuto dal modello previsionale di ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Inghilterra)

Tabella 4.2 - Caratteristiche dei dati DSSF. Fonte: <http://landsaf.meteo.pt>

4.2.1.1. Archivio dati di radiazione DSSF

È stato realizzato un archivio di dati di radiazione DSSF, ottenuto a partire dai *file* originali in formato HDF5 messi a disposizione da LSA-SAF e scaricati dal relativo sito. Per le specifiche dei dati si rimanda al paragrafo precedente (Tab. 4.2). I dati DSSF sono stati archiviati per anno e per mese. Il periodo coperto va dallo 01/03/2005 al 28/02/2011, e copre pertanto un totale di 6 anni. Sono stati inoltre archiviati i *file* "statici" contenenti le informazioni geofisiche del dominio spaziale coperto dal satellite (latitudine, longitudine e modello digitale del terreno).

L'archivio risiede su macchina Unix denominata "Aria". Parallelamente a quello in formato HDF5, sulla macchina è stato preparato un archivio speculare in formato ASCII, strutturato analogamente a quello HDF5, ottenuto estraendo la variabile "DSSF" dai *file* originali HDF5 tramite il comando <h5dump>.

4.2.1.2 Procedura di estrazione dei dati di radiazione

- Descrizione generale

In figura 4.12 è illustrato il diagramma a blocchi della procedura di elaborazione dei dati DSSF sviluppata, che lavora sulla macchina "Aria".

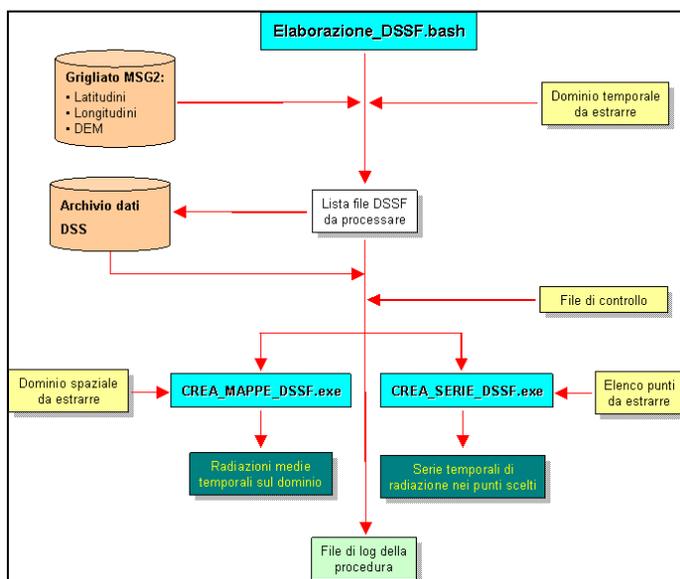


Figura 4.12 - Architettura della procedura di elaborazione dei dati DSSF

La procedura è costituita da uno *script bash* denominato <Elaborazione_DSSF.bash> e da due eseguibili compilati in FORTRAN PG90, denominati <CREA_MAPPE_DSSF.exe> e <CREA_SERIE_DSSF.exe>, invocati all'interno della stessa procedura *bash*.

Il primo eseguibile è finalizzato alla creazione delle mappe di radiazione media sul dominio, mentre il secondo ha lo scopo di creare le serie temporali di radiazione (semioraria) nei punti scelti.

I *file di input* che l'utente deve preparare – comuni a qualsiasi scelta – sono il *file* del dominio temporale scelto e uno specifico *file* di controllo in base al quale avviene la scelta se creare le mappe delle radiazioni medie sul dominio spaziale oppure le serie temporali nei punti scelti. Nel primo caso, sarà necessario preparare il *file* del dominio spaziale da estrarre, mentre nel secondo occorrerà specificare l'elenco dei punti in corrispondenza dei quali estrarre le serie temporali.

La procedura accede preliminarmente alle informazioni generali del grigliato globale del satellite MSG2, quali i valori di latitudine, longitudine e quota altimetrica relativi a ciascun punto dell'intero dominio spaziale. In un *file* in ingresso denominato <Date.txt> l'utente deve specificare il dominio temporale scelto, a partire dal quale la procedura provvederà a crearsi internamente l'elenco di tutti i *file* di radiazione da estrarre, completi di percorso e nome, generando un *file* denominato <ListaFile.asc>. La lista di *file* presente in <ListaFile.asc> guiderà il successivo ciclo della procedura *bash*, finalizzato ad accedere ad ogni passo a ciascuno dei *file* in elenco.

A seconda delle scelte operate nel *file* di controllo, verrà lanciato l'eseguibile per la creazione delle mappe <CREA_MAPPE_DSSF.exe>, oppure quello per la creazione delle serie temporali <CREA_SERIE_DSSF.exe>. Nel primo caso, l'eseguibile leggerà in ingresso il *file* del sottodominio spaziale scelto dall'utente e denominato <Dominio_Mappe.txt>, mentre nel secondo l'eseguibile leggerà in ingresso il *file* contenente l'elenco dei punti da estrarre e denominato <Punti.txt>. In particolare, nel *file* <Dominio_Mappe.txt> dovranno essere specificati i valori iniziali e finali delle righe e delle colonne da estrarre rispetto al grigliato globale, mentre nel *file* <Punti.txt > dovranno essere riportati, per ogni punto in elenco, le coordinate (Lat, Long) ed il relativo nome (etichetta). Relativamente a quest'ultima opzione, all'interno dell'eseguibile <CREA_SERIE_DSSF.exe> è stata implementata una specifica *subroutine* in grado d'individuare la cella (riga, colonna) del grigliato globale corrispondente alle coordinate (Lat, Long) dello specifico punto processato.

In uscita, la procedura produrrà tre tipi di risultati: due *file* di dati DSSF elaborati ed un *file* di *log* complessivo della procedura. I *file* generati sono tutti in formato ASCII.

4.2.1.3 Risultati prodotti: le mappe di radiazione media

Nel caso si scelga la creazione delle mappe, verrà generato un unico *file* contenente le radiazioni medie sul dominio scelto, punto per punto, secondo la struttura illustrata in (Fig. 4.13). Nel nome del *file* compariranno data/ora iniziali e finali dell'estrazione, oltre al tipo di media. Esempi di nomi sono <RAD_medie_mensili_01012006-31012010.txt>, <RAD_medie_stagionali_01062005-31082010.txt>, etc.

Il *file* è strutturato in modo tale che i punti possano essere immediatamente georeferenziati e i relativi valori di radiazione spazializzati e di seguito interpolati tramite isocurve. Tale struttura è pensata per consentire una rapida post-elaborazione grafica dei dati tramite *software* quali ArcGIS, MapInfo, Surfer, etc. In particolare, ciascun punto del grigliato, individuato dai codici di riga e colonna del grigliato originale, contiene i valori di latitudine e longitudine (necessari per la georeferenziazione) e la quota altimetrica. A questi vengono associati i valori di radiazione cumulata giornaliera elaborati, mediati in base alle opzioni scelte, espressi sia in KWh/m²giorno che MJ/m²giorno.

NR,	NC,	LAT,	LONG,	Qs1m,	RAD_KWh_m2,	RAD_MJ_m2
395,	520,	45.01,	8.53,	151.,	5.632,	20.276
395,	521,	45.01,	8.57,	152.,	5.650,	20.341
395,	522,	45.01,	8.61,	140.,	5.650,	20.340
395,	523,	45.01,	8.65,	97.,	5.665,	20.396
395,	524,	45.01,	8.69,	87.,	5.677,	20.437
395,	525,	45.01,	8.74,	66.,	5.649,	20.336
395,	526,	45.01,	8.78,	58.,	5.700,	20.519
395,	527,	45.01,	8.82,	68.,	5.715,	20.574
395,	528,	45.01,	8.86,	68.,	5.723,	20.604
395,	529,	45.02,	8.90,	68.,	5.727,	20.617
395,	530,	45.02,	8.94,	68.,	5.735,	20.644
395,	531,	45.02,	8.98,	73.,	5.722,	20.598
395,	532,	45.02,	9.02,	76.,	5.714,	20.569
395,	533,	45.02,	9.06,	78.,	5.691,	20.487
395,	534,	45.02,	9.10,	83.,	5.645,	20.322
395,	535,	45.02,	9.14,	119.,	5.614,	20.210
395,	536,	45.02,	9.19,	195.,	5.592,	20.133
395,	537,	45.02,	9.23,	240.,	5.584,	20.101
395,	538,	45.02,	9.27,	222.,	5.579,	20.084
395,	539,	45.02,	9.31,	100.,	5.568,	20.066

Figura 4.13 - Esempio del *file* delle radiazioni medie generato dalla procedura

4.2.1.4 Risultati prodotti: le serie temporali di radiazione nei punti

Nel caso si scelga la creazione delle serie temporali, verrà generata una serie di *file*, uno per ciascun punto in elenco, contenente le serie semiorarie delle radiazioni, secondo la struttura illustrata in (Fig. 4.14). Nel nome dei *file* comparirà l'etichetta del punto specificata dall'utente nel *file* <Punti.txt>, oltre a data/ora iniziali e finali dell'estrazione. Esempi di nomi sono <Sesto_F_01012008h0000-31122008h2330.txt>, <Pistoia_01012007h0000-31122007h2330.txt>, etc.

I *file* sono strutturati in modo tale da consentirne una rapida importazione tramite fogli di calcolo come Excel, nonché l'elaborazione grafica e statistica dei relativi valori di radiazione. In particolare, all'interno di ciascun *file* sono riportati i record temporali contenenti i valori di radiazione semioraria estratti in corrispondenza del punto, espressi sia in kWh/m² che MJ/m².

ID,	AAAA,	MM,	GG,	HH,	Mn,	RAD_W_m2,	RAD_J_m2,
1,	2007,	01,	01,	00,	00,	0.000,	0.,
1,	2007,	01,	01,	00,	30,	0.000,	0.,
1,	2007,	01,	01,	01,	00,	0.000,	0.,
1,	2007,	01,	01,	01,	30,	0.000,	0.,
1,	2007,	01,	01,	02,	00,	0.000,	0.,
1,	2007,	01,	01,	02,	30,	0.000,	0.,
1,	2007,	01,	01,	03,	00,	0.000,	0.,
1,	2007,	01,	01,	03,	30,	0.000,	0.,
1,	2007,	01,	01,	04,	00,	0.000,	0.,
1,	2007,	01,	01,	04,	30,	0.000,	0.,
1,	2007,	01,	01,	05,	00,	0.000,	0.,
1,	2007,	01,	01,	05,	30,	0.000,	0.,
1,	2007,	01,	01,	06,	00,	0.000,	0.,
1,	2007,	01,	01,	06,	30,	0.000,	0.,
1,	2007,	01,	01,	07,	00,	0.000,	0.,
1,	2007,	01,	01,	07,	30,	0.000,	0.,
1,	2007,	01,	01,	08,	00,	0.000,	0.,
1,	2007,	01,	01,	08,	30,	0.000,	0.,
1,	2007,	01,	01,	09,	00,	0.000,	0.,
1,	2007,	01,	01,	09,	30,	31.500,	113400.,
1,	2007,	01,	01,	10,	00,	63.600,	228960.,

Figura 4.14 - Esempio dei *file* delle serie temporali delle radiazioni semiorarie generate dalla procedura

4.2.1.5 Tempi di calcolo

La procedura di elaborazione dei dati DSSF viene eseguita su una macchina Unix con 4 GB di RAM, processore Xeon D2.66 Hz, su cui è operativo il sistema Centos 5.3. I suoi tempi di calcolo sono mediamente dell'ordine di 10 minuti per il processamento di un mese di dati, ossia all'incirca 1440÷1488 *file*. Questo significa, ad es., all'incirca $10 \times 12 = 120$ minuti per il calcolo della mappa delle medie annuali, o $10 \times 6 = 60$ minuti per il calcolo della mappa delle medie dal 2005 al 2010 di ciascun mese (medie mensili "climatologiche").

I tempi di calcolo sono gli stessi per entrambe le opzioni di calcolo (creazione delle mappe o delle serie temporali). In particolare, anche specificando nel *file* <Punti.txt> un rilevante numero di punti da estrarre (20 o più), i tempi di calcolo della procedura ne risentono in maniera minima.

4.2.1.6 Verifica dei dati di radiazione stimata (Hgo) con dati di radiazione misurata

Oltre alle verifiche effettuate nel precedente progetto STAR (Vaccari et al, 2009) sono state effettuate ulteriori verifiche sui dati delle stazioni del Polo Scientifico (Sesto Fiorentino) e di Barberino del Mugello. In Figura 4.15a si riporta il confronto fra dati DSSF e dati stazione del Polo Scientifico di Sesto Fiorentino nel periodo 2006-2009 e relativa regressione (Fig. 4.15b).

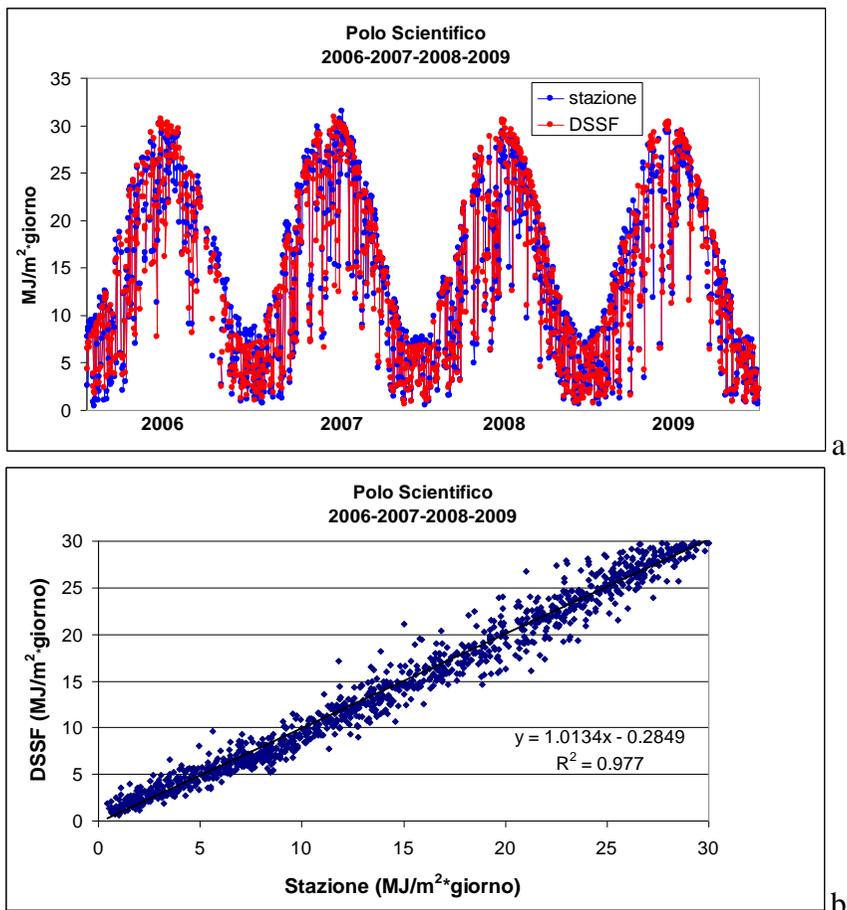


Figura 4.15 - Confronto fra i dati DSSF e i dati della stazione di rilevamento del Polo Scientifico di Sesto Fiorentino per il periodo 2006 – 2009 in termini di integrale giornaliero (MJ/m² giorno) (a); Regressione tra i dati DSSF (ordinate) e i dati rilevati (ascisse) al Polo Scientifico di Sesto Fiorentino (b)

In tabella 4.3 si riportano i valori di Errore Medio (ME) di Errore Medio Assoluto (MAE) e di Root Mean Square Error (RMSE) su base mensile e annuale.

	Radiazione media giornaliera (MJ/m ² giorno)	ME (%.)	MAE (%)	RMSE (%)
Gennaio	5.05	-3.9	14.7	18.3
Febbraio	8.2	-0.75	8.9	10.28
Marzo	11.58	-4.5	9.0	11.6
Aprile	18.61	-2.2	6.6	8.3
Maggio	21.66	1.4	6.9	8.8
Giugno	22.65	2.1	7.0	9.0
Luglio	25.93	2.5	4.6	6.3
Agosto	21.62	0.5	4.7	6.2
Settembre	17.18	-1.2	4.9	6.2
Ottobre	10.72	-3.1	8.9	11.3
Novembre	6.36	-9.9	12.9	16.0
Dicembre	4.53	-7.0	14.25	18.6
Anno	14.27	-0.65	7.1	9.5

Tabella 4.3 - Valori di ME, MAE e RMSE derivanti dal confronto fra dati DSSF e dati Stazione nel periodo 2006-2009 su base mensile e annuale

Dall'analisi dei dati in tabella, che peraltro non si discostano molto da quelli relativi alla stazione di Barberino (dati non mostrati), emerge un MAE del 7%, tuttavia il ME si riduce fino a -0.65% a causa di una compensazione sull'anno legata ad una sottostima invernale e da una sovrastima estiva.

4.2.2 Metodologia impiegata per la stima della radiazione su superficie inclinata e con effetto dell'orizzonte reale

I dati di radiazione stimata DSSF sono stati impiegati per la creazione di carte di radiazione globale espressa come integrale medio giornaliero su superficie orizzontale per ciascun mese dell'anno (H_{go} espressa in $\text{kWh m}^{-2} \cdot \text{giorno}^{-1}$ e con risoluzione spaziale pari a circa 5 km) sul periodo marzo 2005 – febbraio 2011 (6 anni completi). Di seguito viene presentata la metodologia impiegata per il calcolo della radiazione incidente su superficie comunque inclinata e con l'effetto dell'orizzonte reale.

4.2.2.1 Scomposizione della radiazione H_{go} stimata da satellite nelle componenti diffusa e diretta

A partire dai dati di H_{go} (spazializzati ad una risoluzione di 300 m sul territorio regionale) sono state determinate le componenti diretta e diffusa della radiazione solare secondo la metodologia proposta da Liu e Jordan (1960).

Il metodo sviluppato da Liu e Jordan (1960) si basa sull'ipotesi che il rapporto tra l'irradiazione solare diffusa sul piano orizzontale (H_{dfo}) e quella globale su base giornaliera (H_{go}) sia funzione del Kt (indice di chiarezza) secondo la seguente formula:

$$(H_{dfo}/H_{go}) = (1.39 - 4.027 \cdot Kt + 5.531 \cdot Kt^2 - 3.108 \cdot Kt^3) \quad (1)$$

A tal fine è stato necessario il calcolo dell'indice di chiarezza (Kt). Tale indice viene definito, per una determinata località geografica, come il rapporto tra la radiazione solare globale e la radiazione extraterrestre incidenti sul piano orizzontale. Questo indice assume valori prossimi a zero nel caso di cielo in prevalenza molto nuvoloso o coperto, mentre valori più alti (comunque inferiori ad 1) nel caso di cielo sereno. La radiazione extraterrestre giornaliera media su superficie orizzontale per ciascun mese dell'anno (H_{ex}) e per ciascun cella del dominio considerato (espressa in $\text{kWh m}^{-2} \cdot \text{g}^{-1}$) è stata calcolata seguendo l'algoritmo proposto da Bird and Riordan (1984). Si è pertanto proceduto al calcolo dell'indice di chiarezza medio mensile per ciascuna cella del dominio considerato, sul periodo marzo 2005 – febbraio 2011, effettuando il rapporto tra H_{go} e H_{ex} . A titolo di esempio in figura 4.1 sono riportati i valori di Kt per la regione Toscana relativi al mese di Dicembre (Fig. 4.16a) e al mese di Luglio (Fig. 4.16b). In allegato 6 sono riportate le 12 mappe mensili di Kt alla risoluzione spaziale di circa 300 m.

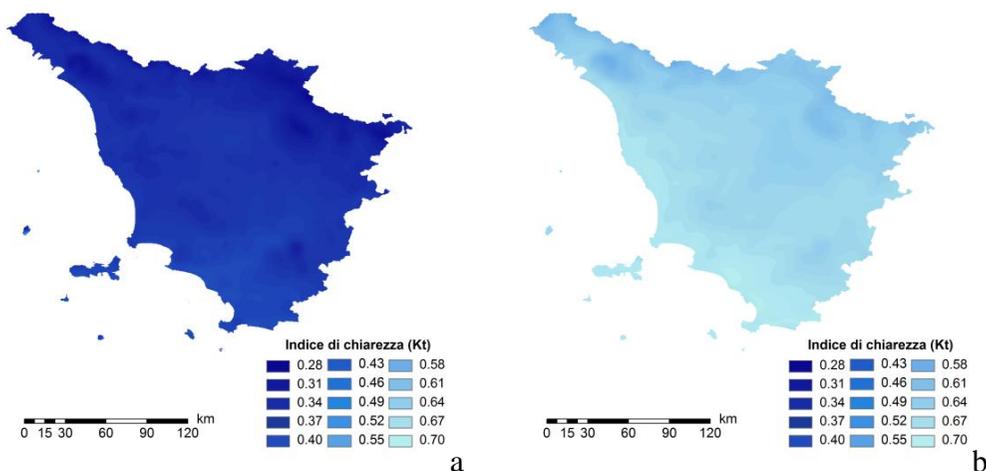


Figura 4.16 - Valore del Kt medio del mese di Dicembre (a) e del mese di Luglio

Sono state prodotte le carte di radiazione diffusa media giornaliera su superficie orizzontale per ciascun mese dell'anno (H_{dfo} espressa in $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{giorno}$ e con risoluzione spaziale pari a 300 m) moltiplicando, per ogni cella del dominio, il valore ottenuto dall'equazione 1 per i dati di radiazione H_{go} (equazione 2) e quindi le carte di radiazione diretta media giornaliera su superficie orizzontale per ciascun mese dell'anno (H_{dro} espressa in $\text{kWh m}^{-2} \cdot \text{g}^{-1}$ e con risoluzione spaziale pari a 300 m) (equazione 3).

$$H_{dfo} = (1.39 - 4.027 \cdot Kt + 5.531 \cdot Kt^2 - 3.108 \cdot Kt^3) \cdot H_{go} \quad (2)$$

$$H_{dro} = H_{go} - H_{dfo} \quad (3)$$

Sono state ottenute così le carte di radiazione diretta e diffusa media giornaliera su superficie orizzontale di ciascun mese dell'anno sulla Regione.

Al fine di procedere alla verifica dell'algoritmo di Liu e Jordan e quindi alla sua applicabilità sul territorio regionale sono stati utilizzati i dati di radiazione globale, diffusa e diretta rilevati presso la stazione meteorologica del LAMMA nel periodo gennaio 2008 – dicembre 2010. E' stato calcolato il Kt mensile per l'intero periodo mediante il rapporto fra la radiazione globale giornaliera media mensile misurata al LAMMA e la corrispondente radiazione extraterrestre calcolata come visto precedentemente. Applicando l'algoritmo sono state stimate le componenti diffusa e diretta giornaliera media mensile su superficie orizzontale. Tali variabili sono state oggetto di confronto con i dati misurati.

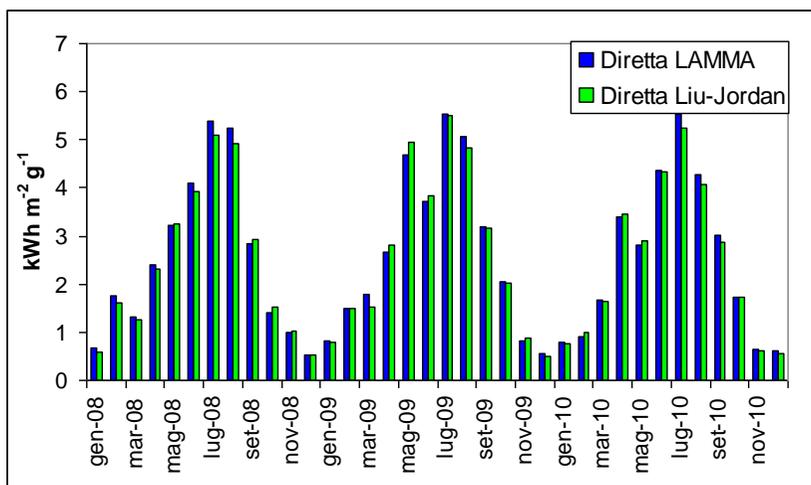


Figura 4.17 - Confronto fra la radiazione diretta giornaliera media mensile rilevata dalla stazione del LAMMA (Sesto Fiorentino) e quella stimata mediante l'algoritmo di Liu e Jordan (1960)

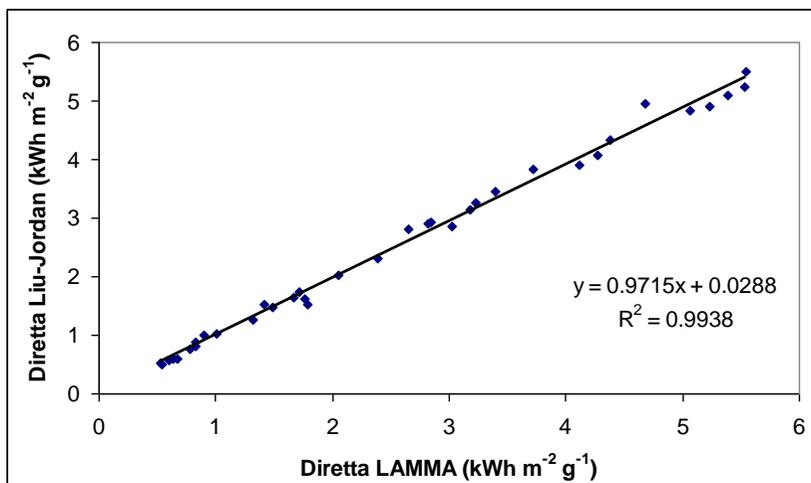


Figura 4.18 - Regressione fra la radiazione diretta giornaliera media mensile rilevata dalla stazione del LAMMA (Sesto Fiorentino) e quella stimata mediante l'algoritmo di Liu e Jordan (1960)

In figura 4.17 si rileva l'ottima corrispondenza tra gli andamenti dei dati mensili misurati e stimati di radiazione diretta. Tale corrispondenza è confermata anche dalle forti correlazioni esistenti fra valori misurati e stimati che evidenzia coefficienti di determinazione altamente significativi (Fig. 4.18).

Risultati analoghi sono stati ottenuti anche per la componente diffusa della radiazione essendo essa la differenza fra la radiazione globale e la radiazione diretta (dati non mostrati).

4.2.2.2 Introduzione dell'effetto dell'orizzonte reale e del piano comunque inclinato sulla radiazione stimata da satellite

La metodologia impiegata per la determinazione dell'irraggiamento su una superficie comunque inclinata (per superficie comunque inclinata si considera anche il caso limite di superficie orizzontale) è stata sviluppata a partire dalle linee guida riportate nella normativa UNI 8477/1, adottata a livello nazionale recante istruzioni per il “*Calcolo degli apporti per applicazioni in edilizia. Valutazione dell'energia raggiante ricevuta*”.

Obiettivo del lavoro è stato anche quello di valutare l'effetto della morfologia del territorio sulla radiazione incidente.

In linea generale la radiazione globale incidente su un piano comunque inclinato di un angolo β rispetto all'orizzontale e orientato verso sud (H_{gi}) risulta dalla combinazione della componente diretta della radiazione (H_{dri}), della componente diffusa (H_{dfi}) e della eventuale radiazione riflessa (H_{ri}) (quest'ultima risulta assente nel caso $\beta = 0$).

$$H_{gi} = H_{dri} + H_{dfi} + H_{ri} \quad (4)$$

I dati di H_{go} stimati da satellite come messo in evidenza nelle precedenti sezioni del report, sono relativi ad una superficie orizzontale e non tengono in considerazione l'effetto del possibile ombreggiamento dovuto alla presenza di orografia.

Per aggiungere l'effetto dell'orografia e quello relativo all'inclinazione del piano ai dati stimati da satellite è stato utilizzato l'algoritmo di calcolo proposto da Bird and Riordan (1984). Esso permette di calcolare per ciascun istante e per qualsiasi punto del globo lo spettro di radiazione globale, diretta e diffusa su una superficie orizzontale o inclinata in condizioni di cielo sereno (previa definizione di alcuni parametri che caratterizzano lo stato medio dell'atmosfera).

Questo algoritmo è stato migliorato integrandolo con il calcolo dell'orizzonte reale per il punto di interesse a partire da un DTM (*Digital Terrain Model*). Si considera che, come nella realtà, la volta celeste possa essere in parte oscurata dall'orizzonte che circonda il punto su cui si calcola la radiazione. Rispetto all'algoritmo originale sono state apportate le seguenti modifiche e integrazioni. La radiazione diretta viene bloccata quando l'altezza apparente del sole è inferiore all'orizzonte reale nella direzione dove si trova il sole. In maniera analoga viene anche oscurata la radiazione diffusa

circumsolare (zona del cielo intorno al sole dove la radiazione diffusa è maggiormente concentrata). Inoltre la radiazione diffusa isotropica è ridotta in base alla frazione di volta celeste oscurata dall'orizzonte reale, mentre viene considerato che la parte di volta celeste sotto l'orizzonte reale possa riflettere la radiazione verso la superficie bersaglio in base all'albedo stabilito.

Il calcolo della radiazione teorica avviene quindi secondo i seguenti passaggi: determinazione dell'orizzonte reale; determinazione dell'alba, del tramonto e della lunghezza del giorno tenendo conto dell'orizzonte reale; calcolo della radiazione su piano orizzontale; eventualmente se richiesto calcolo della radiazione su una superficie inclinata. L' algoritmo di calcolo proposto da Bird and Riordan (1984) è stato pertanto impiegato per il calcolo delle seguenti variabili che sono successivamente state utilizzate nella metodologia di calcolo:

-radiazione extraterrestre con effetto del DTM su superficie orizzontale e/o comunque inclinata (H_{exdtm})

-radiazione extraterrestre senza effetto del DTM su superficie orizzontale (H_{ex})

-radiazione diffusa con effetto del DTM e albedo del suolo pari a zero su superficie orizzontale e/o comunque inclinata (H_{dfDTM0})

-radiazione diffusa senza effetto del DTM e albedo del suolo pari a zero su superficie orizzontale (H_{df0})

Le sopra citate variabili sono espresse in termini di integrale giornaliero medio mensile.

Viene in questa sede definito come indice di soleggiamento reale della radiazione diretta (R_b) il rapporto esistente tra il valore dell'integrale giornaliero medio mensile della radiazione extraterrestre con incluso l'effetto ombreggiamento del DTM su superficie comunque inclinata (H_{exdtm}) e il valore solare extraterrestre in assenza di DTM su superficie orizzontale (H_{ex}):

$$R_b = H_{\text{exdtm}}/H_{\text{ex}} \quad (5)$$

In questo modo si determina l'effetto della presenza del DTM e dell'eventuale inclinazione della superficie sulla distribuzione della radiazione diretta, essendo la radiazione extraterrestre costituita esclusivamente da questa tipologia di radiazione. Per il caso di superficie orizzontale e nelle aree dove il DTM non determina effetto ombreggiamento il coefficiente R_b sarà pari ad 1, mentre valori inferiori saranno presenti altrove.

Viene inoltre definito come indice di distribuzione reale della radiazione diffusa (R_{bf}) il rapporto esistente tra il valore dell'integrale giornaliero medio mensile della radiazione diffusa su superficie orizzontale con albedo zero (H_{dfDTM0}) e il valore solare della radiazione diffusa in assenza di ostruzioni sempre su superficie orizzontale con albedo zero (H_{df0}). In questo modo si determina l'effetto della presenza del DTM e dell'eventuale inclinazione della superficie sulla distribuzione della componente diffusa della radiazione:

$$R_{bf} = H_{dfDTM0} / H_{df0} \quad (6)$$

Tornando alla equazione 4, le singole componenti sono state calcolate per ciascun punto del dominio spaziale come segue:

$$H_{dri} = H_{dro} \cdot R_b \quad (7)$$

$$H_{dfi} = H_{dfo} \cdot R_{bf} \cdot ((1 + \cos(\beta)) / 2) \quad (8)$$

$$H_{ri} = H_{goDTM} \cdot \rho \cdot ((1 - \cos(\beta)) / 2) \quad (9)$$

dove:

β = angolo di inclinazione della superficie

H_{goDTM} = radiazione globale su superficie orizzontale con effetto DTM, ovvero la somma di $H_{dri} + H_{dfi}$ calcolate per il caso di $\beta = 0$

ρ = albedo

L'albedo (Fig. 4.19) è stato determinato a partire dalla cartografia tematica Corine Land Cover del 2006, sulla quale ad ogni classe di copertura del suolo è stato attribuito il relativo valore di albedo trovato in letteratura.

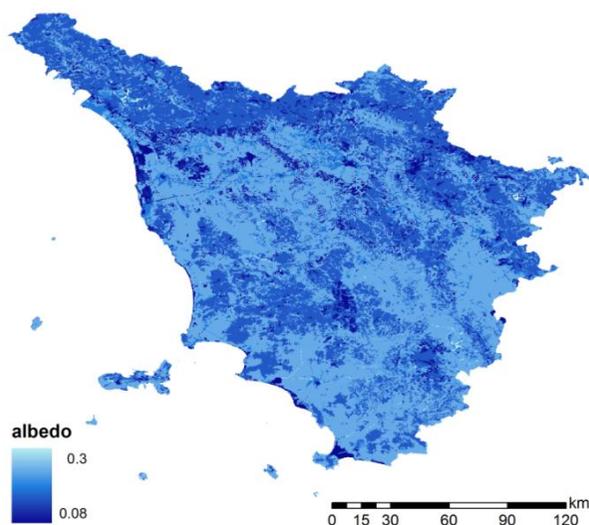


Figura 4.19 - Carta dell'albedo derivata dalla cartografia Corine Land Cover 2006

4.2.3 Cartografia relativa al fotovoltaico

4.2.3.1 Cartografia relativa alla radiazione globale

Impiegando la metodologia sopra descritta sono state create carte di radiazione globale su superficie orizzontale e inclinata verso sud di 15°, 25 e 33° con l'inclusione dell'effetto ombreggiamento dovuto all'orografia. Le mappe sono espresse in termini di radiazione giornaliera media mensile per i vari mesi dell'anno e in termini di radiazione giornaliera media annua per quanto riguarda il dato annuo ($\text{kWh m}^{-2}\text{giorno}^{-1}$).

Di seguito si riportano alcune delle mappe prodotte alla risoluzione spaziale di 300 m. . L'inclinazione della superficie a 33° verso sud è quella che alla latitudine della Toscana massimizza il valore di radiazione incidente a livello annuo; tale inclinazione può determinare una parziale sottostima dei valori di radiazione nelle vallate appenniniche, ove l'inclinazione ottimale può risultare inferiore. Al fine di sopperire a tale inconveniente e di considerare talune eventuali costrizioni nella scelta dell'inclinazione dei pannelli, sono state elaborate anche le mappe per inclinazioni di 15° e 25°.

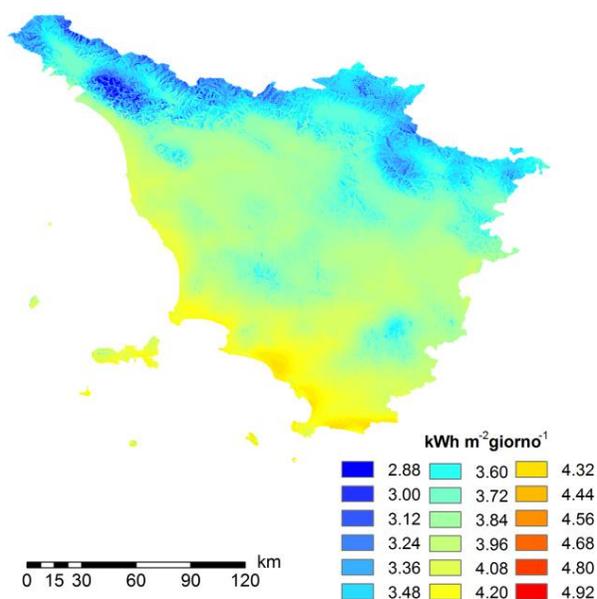


Figura 4.20 - Radiazione globale giornaliera media, su superficie orizzontale nell'anno

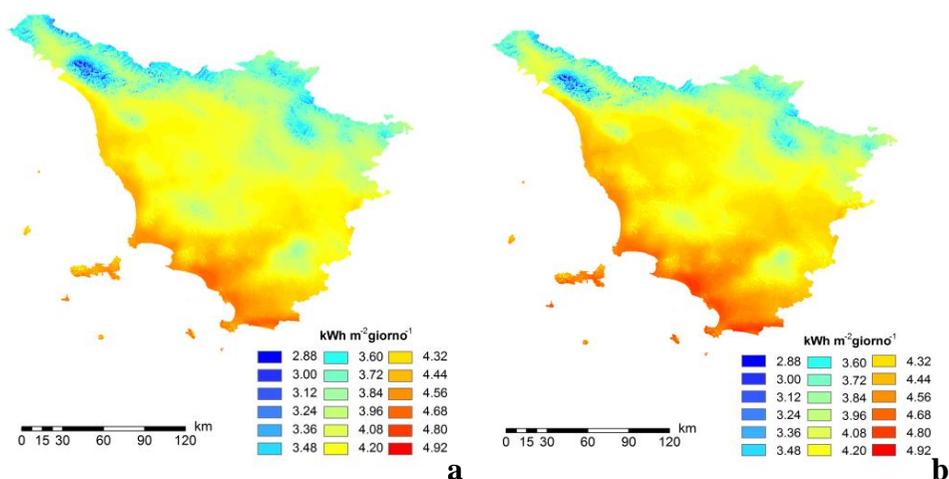


Figura 4.21 - Radiazione globale giornaliera media, su superficie inclinata di 15° (a) e 25° (b) verso sud, nell'anno

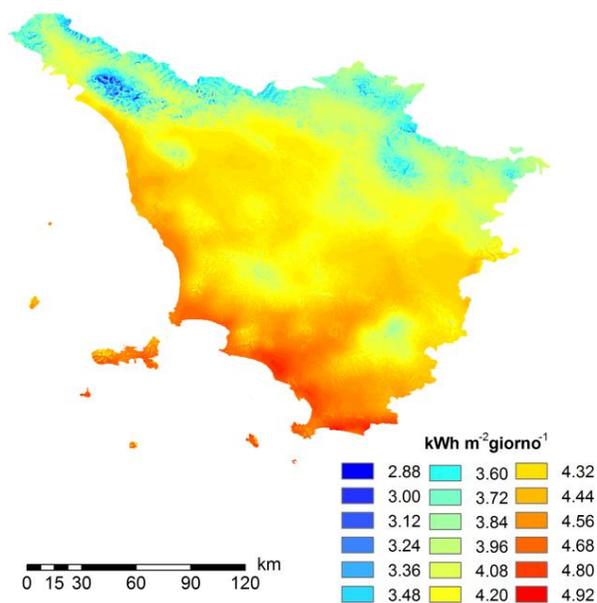


Figura 4.22 - Radiazione globale giornaliera media, su superficie inclinata di 33° verso sud, nell'anno

In allegato 6 vengono riportate tutte le mappe di radiazione globale su base mensile per superficie orizzontale, inclinata di 15° e 25° e di 33° verso sud e su base annua. Le mappe sono comunque espresse in kWh m⁻² giorno⁻¹.

4.2.3.2 Cartografia relativa alla producibilità elettrica

Di seguito si riportano le carte relative alla producibilità elettrica (allegato 6) ipotizzando un modulo da 1 kWhp (potenza di picco in kWh) e una efficienza del sistema pari al 75% (Suri et al. 2007; Hult et al. 2010; Djurdjevic 2011). Le mappe sono espresse in kWh anno⁻¹ prodotti per ciascun kWh di potenza di picco installato.

In allegato 6 si riportano le mappe di producibilità elettrica annuali a maggior dettaglio.

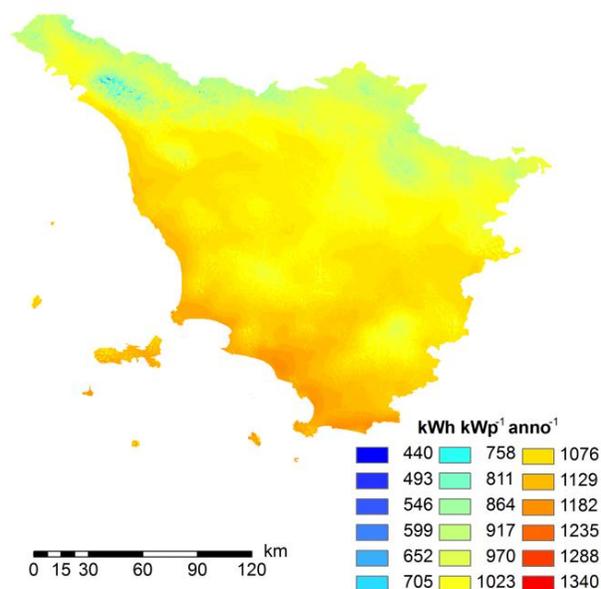


Figura 4.23 - Producibilità elettrica per un modulo da 1 kWh di potenza di picco con efficienza pari al 75% posto su superficie orizzontale

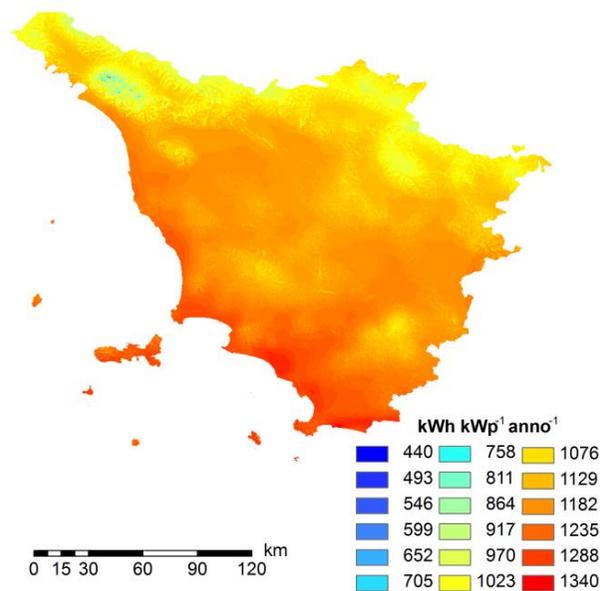


Figura 4.24 - Producibilità elettrica per un modulo da 1 kWh di potenza di picco con efficienza pari al 75% posto su superficie inclinata di 25° verso sud

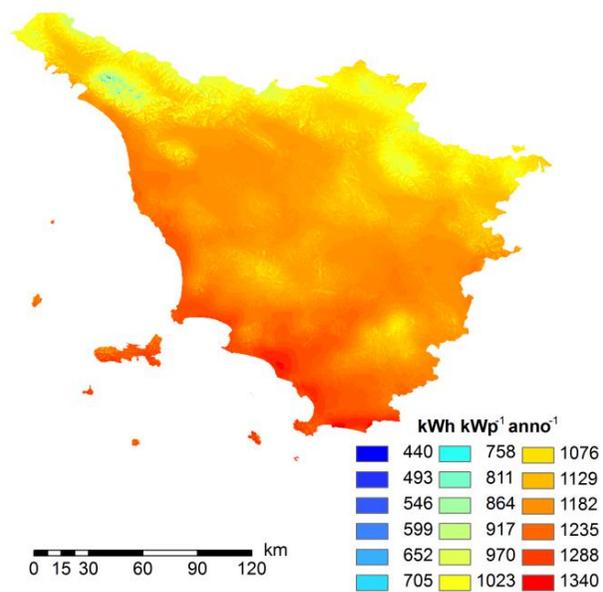


Figura 4.25 - Producibilità elettrica per un modulo da 1 kWh di potenza di picco con efficienza pari al 75% posto su superficie inclinata di 33° verso sud

4.2.3.3 Cartografia relativa al rendimento economico dell'investimento in fotovoltaico

Partendo dall'indagine dei prezzi di mercato, è stato valutato un costo indicativo di un impianto fotovoltaico di primaria qualità (pannelli di fascia medio-alta), con potenza 3 kW_{hp} (pari ad una superficie di circa 24 m²), ossia sufficiente a coprire il fabbisogno di una civile abitazione, su un tetto facilmente accessibile, in buone condizioni (quindi senza opere murarie aggiuntive) e installato in modo parzialmente integrato, ossia appoggiato sulla copertura in senso complanare in euro 20.000,00 con iva al 10% inclusa.

La vita utile dell'impianto è calcolata in almeno 20 anni e, a partire dal decimo anno, è buona norma prevedere interventi di manutenzione straordinaria per la sostituzione di alcuni componenti elettrici, soprattutto dell'inverter. Stando a quanto descritto dal manuale sulla tariffa agevolata "conto energia" di Terna, i costi di esercizio e manutenzione annui sono abitualmente stimati in circa 1-1,5 % del costo dell'impianto. Nel calcolo del rendimento è stato considerato un costo medio annuo pari al 1% della spesa iniziale.

È stato valutato il costo annuo, nella percentuale dello 0.6% del costo iniziale dell'impianto, derivante dalla stipula di contratti assicurativi, utili a garantire l'impianto a fronte di eventi "straordinari" come il furto o il danneggiamento in seguito ad eventi meteorologici estremi.

Allo stato attuale, (finanziaria 2010) la tariffa "conto energia" prevede, per la tipologia di installazione sopra indicata, un incentivo vendita dell'energia prodotta pari a € 0,391 per kWh a cui si deve sommare lo sconto, che il produttore ha diritto ad uno sconto sulla propria bolletta, pari al valore dell'energia prodotta e remunerata in base alla tariffa applicata dal gestore di rete, che indicativamente è pari a € 0,144 per kWh.

È stato calcolato il rendimento economico medio annuale, al netto del costo iniziale, per un impianto da 3 kW_{hp} con superficie inclinata a 33° ed esposizione a sud, nel caso in cui i consumi siano pari all'intera produzione (Fig. 4.26) e nell'ipotesi in cui i consumi siano pari a quelli di una famiglia media (circa 2300 kWh annui) (Fig. 4.27).

In allegato vengono riportate tutte le mappe di rendimento economico medio annuo del sistema fotovoltaico da 3 kW_{hp} calcolate per superficie orizzontale ed inclinata di 15° e 25° verso sud (allegato 6).

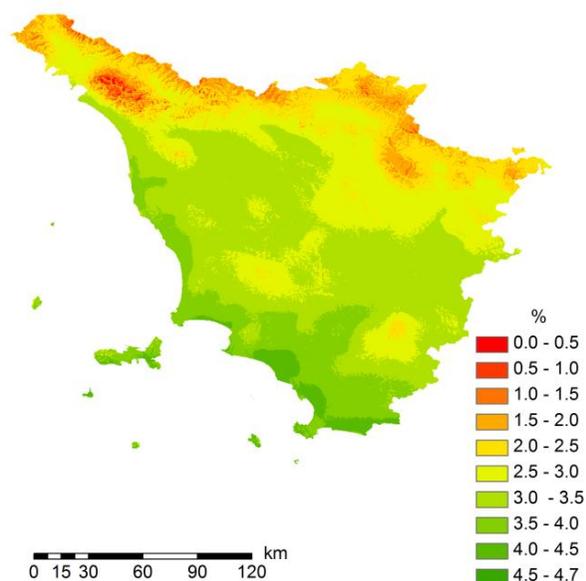


Figura 4.26 - Rendimento economico medio annuo di un sistema fotovoltaico da 3 kWhp su piano inclinato di 33° verso sud: ipotesi di completo riutilizzo dell'energia elettrica prodotta

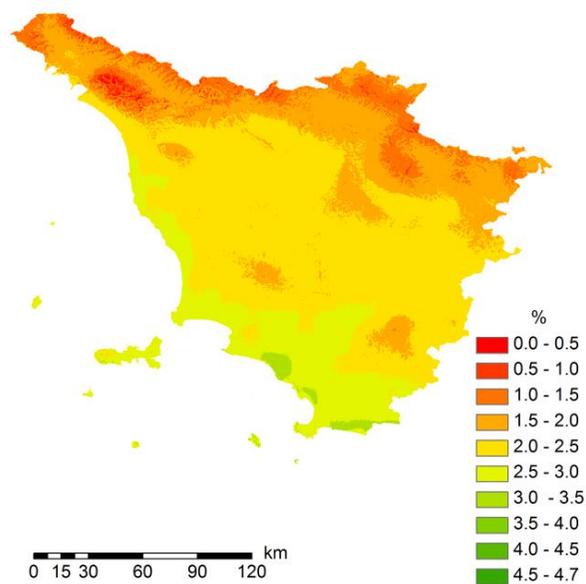


Figura 4.27 - Rendimento economico medio annuo di un sistema fotovoltaico da 3 kWhp su piano inclinato di 33° verso sud: ipotesi di utilizzo dell'energia elettrica prodotta per 2300 kWh

4.3 Energia Eolica

4.3.1 Classificazione anemologica della Toscana attraverso l'utilizzo della modellistica WRF-CALMET

Nell'ambito del progetto Wind-Gis, finanziato dalla Regione Toscana, è stata effettuata la classificazione anemologica del territorio regionale ai fini della quantificazione delle producibilità di energia elettrica da macroeolico (turbine da 2 MW). In questo ambito la quota di riferimento, per lo studio dei campi di vento, era di 75 m dal livello del suolo (altezza media del mozzo delle turbine impiegate). Per una descrizione più dettagliata del progetto si rimanda al report finale consultabile all'indirizzo <http://159.213.57.103/lamma-webgis/windgis.phtml>.

Il progetto Moderno si propone di effettuare una analoga valutazione della producibilità elettrica da minieolico, in particolare sono state prese in considerazione aerogeneratori con potenza nominale compresa tra i 15 e 25 kW e aventi il mozzo del rotore posto a 18 metri da terra. Coerentemente con quanto indicato nella proposta di progetto, i campi di vento sono stati ottenuti sfruttando la banca dati precedentemente sviluppata nel progetto Wind-Gis. In pratica le stime della velocità del vento a 75 m sono state riscalate a 18 tramite l'algoritmo della legge di potenza (Equazione 10).

4.3.1.1 Specifiche della base dati

La base-dati di partenza, sviluppata nel ambito del progetto Wind-Gis, è costituita dalle stime del campo di vento sulla regione Toscana alla quota di 75 m fornite dal modello prognostico WRF (Skamarock et al., 2005) alla risoluzione di 10 Km, per un totale di 525 punti-griglia. Le stime del modello WRF sono state successivamente riscalate alla risoluzione di 2 Km attraverso l'utilizzo del modello diagnostico CALMET (Scire et al., 1999), per un totale di 12840 punti-griglia. Le elaborazioni prodotte coprono il periodo 01/01/2004-31/12/2007 con passo di un'ora, per un totale di 35064 *record*. In tabella 4.4 sono riassunte le specifiche dell'applicazione modellistica (Mari et al., 2011).

Il dominio spaziale preso in esame nel lavoro è illustrato in figura 4.28.

Stime di vento	Periodo processato	01/01/2004-31/12/2007
	Risoluzione temporale	1 ora
	Dati processati	35064
	Percentuale dati validi	99.50 %
	Altezza dal suolo	75 m
Modello prognostico	Nome	WRF
	Risoluzione spaziale	10 Km
	Totale punti processati	525
Modello diagnostico	Nome	CALMET
	Risoluzione spaziale	2 Km
	Totale punti processati	12840

Tabella 4.4 - Sintesi delle specifiche dell'applicazione modellistica WRF-CALMET
Fonte: Mari et al., 2011.



Figura 4.28 - Dominio spaziale del sistema WRF-CALMET

4.3.1.2 Interpolazione verticale delle stime di vento a 18 m

A partire dalle stime a 75 m, i valori della velocità media del vento sono stati interpolati alla quota di riferimento di 18 m utilizzando la legge di potenza:

$$v_2 = v_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (10)$$

dove :

v_2 : velocità del vento alla quota h_2 (75 m);

v_1 : velocità del vento alla quota h_1 (18 m);

α : esponente di potenza.

L'esponente di potenza α è un parametro che dipende in prima approssimazione dalla rugosità del terreno, come mostrato in tabella 4.5.

In allegato 7 si riportano le immagini relative a questa sezione. Nell'allegato 7 Fig.1 è illustrata la distribuzione spaziale dell'esponente di potenza α utilizzato nell'equazione 10.

Classe di rugosità	Rugosità (m)	Tipo di superficie	α
0	0.0002	Acqua	
0.5	0.0024	Superfici aperte regolari, per es. aeroporti, prati sfalciati, ecc.	0.07
1	0.03	Superfici agricole aperte senza recinzioni o siepi e con edifici sparsi. Presenti solo dolci colline.	
1.5	0.055	Superfici agricole con edifici sparsi e con barriere non più alte di 8 metri ad una distanza di circa 1250 metri.	0.15
2	0.1	Superfici agricole con alcuni edifici e con barriere non più alte di 8 metri ad una distanza di circa 500 metri.	
2.5	0.2	Superfici agricole con alcuni edifici e con barriere non più alte di 8 metri ad una distanza di circa 250 metri.	0.22
3	0.4	Villaggi, piccole città, superfici agricole con molte barriere (siepi ecc.), foreste e terreni molto irregolari.	0.3
3.5	0.8	Città più grandi con edifici alti.	
4	1.6	Città molto grandi con grattacieli	0.4

Tabella 4.5 - Lunghezza di rugosità ed esponente di potenza in funzione delle caratteristiche locali del sito. Fonti: Mortensen et al., 1993; Masters, 2004; ARENE, 2007, Danish Wind Industry Association

4.3.1.3 Elaborazione delle mappe di vento

Applicando la legge di potenza ai punti del grigliato spaziale del modello CALMET è stata in ultimo elaborata la mappa della velocità media del vento a 18 m, come mostrato in Figura 4.29.

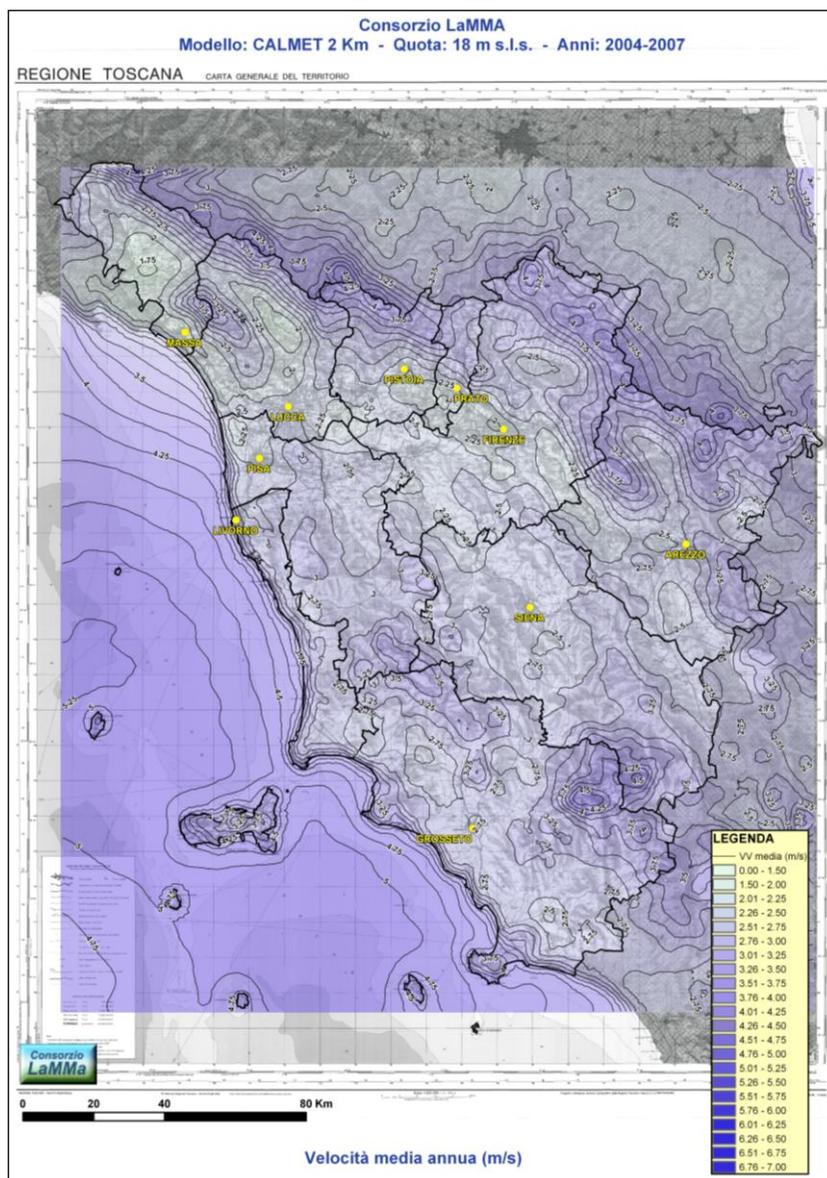


Figura 4.29 - Mappa della velocità media del vento a 18 m elaborata interpolando i dati a 75 m stimati dal modello WRF-CALMET

4.3.1.4 Verifica della stima della velocità del vento

Nell'ambito del progetto Wind-Gis, ampio spazio era stato dedicato alla verifica della metodologia utilizzata per la stima dei campi di vento.

Nel presente studio le stime di vento, prodotte con l'applicazione della legge di potenza, sono state messe a confronto con i corrispondenti dati di vento misurati per il periodo di simulazione, ovvero il quadriennio 2004-2007.

Sono state scelte tre stazioni (Tab. 4.6), rappresentative di una località interna in zona semiurbana (Firenze Peretola), di una località interna prettamente urbana (Firenze Ximeniano) e di una località di costa (Livorno). La verifica è stata condotta sulla velocità del vento stimata su base oraria a 10 m s.l.m., in quanto non erano disponibili misure ad altezze superiori nel periodo considerato.

NOME	Staz.	PERIODO	LAT.	LONG.
FIRENZE PERETOLA	FI-PER	04/06/2003 - 31/12/2007	11.202	43.819
FIRENZE XIMENIANO	FI-XIM	16/07/2004 - 03/12/2007	11.256	43.778
LIVORNO	LI	25/11/2003 - 31/12/2007	10.305	43.547

Tabella 4.6 – Caratteristiche delle stazioni prese in esame

In prima battuta, per i tre siti selezionati sono state confrontate la serie storiche dei dati di velocità del vento misurati (in seguito indicate come ST) con le serie storiche delle stime ottenute tramite l'equazione 10 (di seguito indicate come EQ) attraverso l'elaborazione di alcuni indicatori statistici, quali coefficiente di correlazione (indicato con r), errore medio (ME) e Root Mean Square Error (RMSE).

Il coefficiente di correlazione può variare tra -1 e 1; per valori prossimi ad 1 si ha un ottimo accordo tra i valori stimati e misurati, per valori vicini a 0 le stime sono in totale disaccordo con le misure, per valori prossimi a -1 stime e misure sono correlate negativamente. L'errore medio (ME) fornisce indicazioni relative a sovrastime o sottostime del modello. Valori di ME positivi indicano una sovrastima del modello rispetto ai parametri previsti, mentre valori negativi indicano una sottostima. Valori prossimi a zero indicano che non vi è, mediamente, né sovrastima né sottostima, ma questo potrebbe essere il risultato del reciproco annullamento di errori in eccesso o in difetto (anche grandi in valore assoluto). In questo senso è utile ricorrere al calcolo del RMSE, che invece esprime l'ampiezza dell'errore.

Di seguito (Tab. 4.7) vengono riportati i dati statistici, relativi ai siti presi in esame, che sono stati elaborati per confrontare le stime orarie dei modelli. Si nota una sovrastima dei dati stimati (EQ) rispetto ai dati misurati (ST) per Firenze Peretola e Livorno, sia guardando il valor medio della velocità che gli indici ME (positivo) e RMSE; per quanto riguarda la stazione di Firenze Ximeniano si evidenzia una sottostima che molto probabilmente è legata all'utilizzo, nell'equazione 10, di un coefficiente di rugosità particolarmente alto (Tab. 4.5) essendo la stazione posta in ambiente urbano. In realtà comunque la stazione è posta al di sopra dell'altezza media degli edifici e questo potrebbe spiegare lo scostamento fra stime e misure. Il coefficiente di correlazione evidenzia l'accordo tra gli andamenti temporali delle serie storiche e non è influenzato da sovrastime o sottostime sistematiche, inoltre, tenendo conto che si tratta di valori orari, questo indicatore può essere considerato discreto.

INDICATORE	FI-PER	FI-XIM	LIV
n° dati	23341	27523	32926
% dati utili	66.6	78.5	94.0
V media EQ	2.53	1.49	3.99
V media ST	2.23	2.17	3.27
r ST-EQ	0.47	0.47	0.44
RMSE ST-EQ	1.72	1.25	2.57
ME ST-EQ	0.31	-0.68	0.71

Tabella 4.7 - Valori degli indici statistici per ciascun sito considerato

Infine, le serie storiche su base oraria sono state elaborate in modo da raffrontare stime e misure di velocità del vento in termini di classi di frequenza, che risulta la verifica più significativa ai fini della stima della producibilità eolica.

Di seguito, per ciascun sito sono riportati i grafici relativi alla distribuzione di frequenza per i dati misurati e per le stime ottenute con la legge di potenza, per il quadriennio 2004 -2007.

Osservando gli istogrammi relativi a Firenze Peretola si nota una sovrastima rispetto ai dati misurati delle classi comprese tra 3.5 e 5.5 m/s e una sottostima per le classi inferiori; i grafici relativi al sito di Livorno mostrano una generale sovrastima rispetto alle misure per le crassi di velocità del vento superiori a 4.5 m/s. I grafici di Firenze Ximeniano confermano una generale sottostima dei dati calcolati con l'equazione 10 come visto sopra.

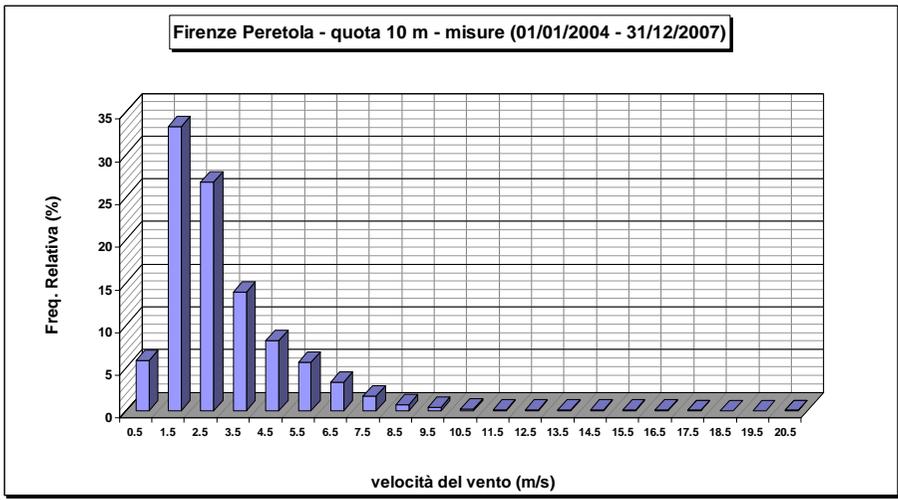


Figura 4.30 - Distribuzione di frequenza, su base oraria, delle misure di velocità del vento nel sito di Firenze Peretola

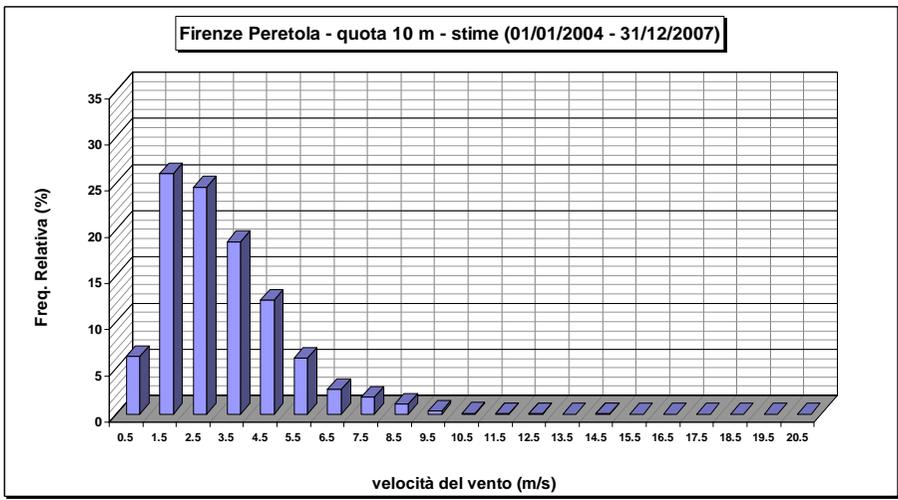


Figura 4.31 - Distribuzione di frequenza, su base oraria, delle stime ottenute tramite la legge di potenza (Equazione 10) nel sito di Firenze Peretola

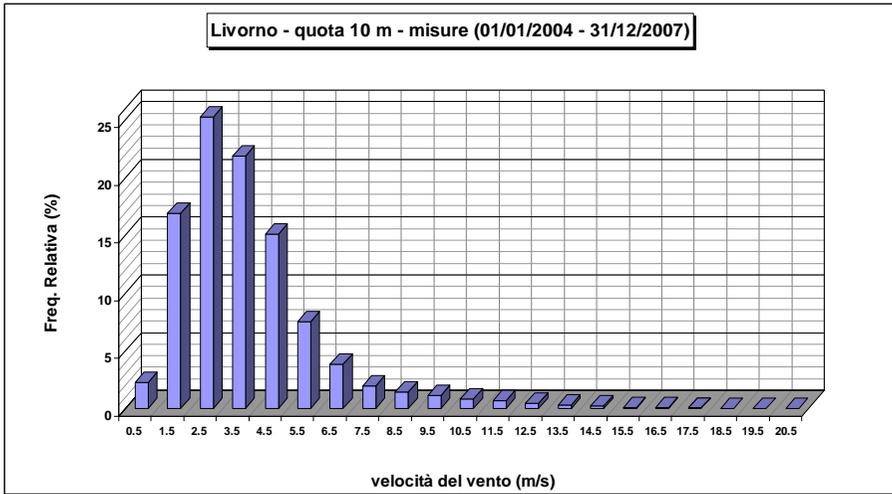


Figura 4.32 - Distribuzione di frequenza, su base oraria, delle misure di velocità del vento nel sito Livorno

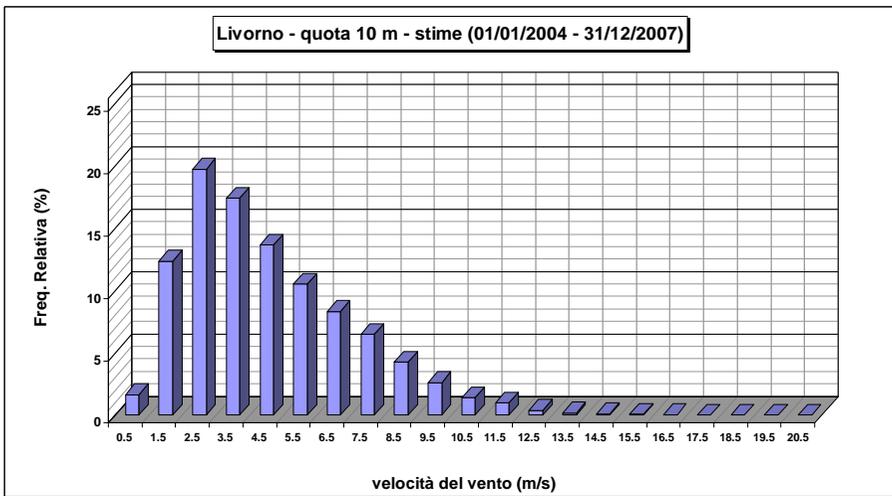


Figura 4.33 - Distribuzione di frequenza, su base oraria, delle stime ottenute tramite la legge di potenza (Equazione 10) nel sito Livorno

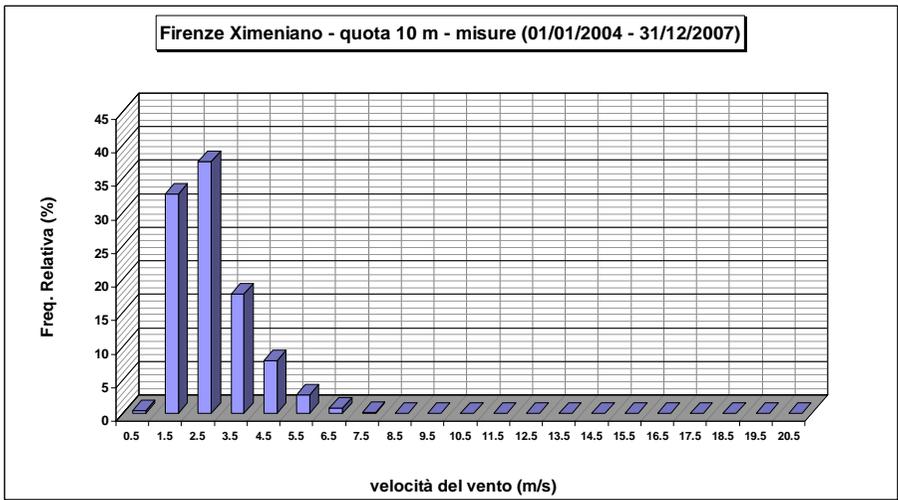


Figura 4.34 - Distribuzione di frequenza, su base oraria, delle misure di velocità del vento nel sito Livorno

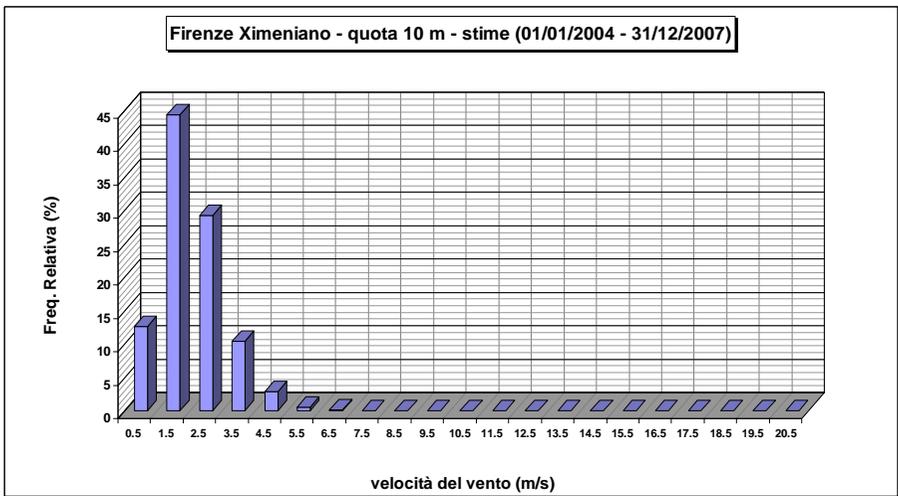


Figura 4.35 - Distribuzione di frequenza, su base oraria, delle stime ottenute tramite la legge di potenza (Equazione 10) nel sito Livorno

4.3.2 Producibilità energetica da minieolico della Toscana

4.3.2.1 Scelta della turbina ottimale

Sulla base delle stime di vento alla quota di 18 m dal suolo, è stato preliminarmente effettuato un confronto tra alcuni modelli di aerogeneratore di tipo minieolico, e più precisamente nell'intervallo di potenza 15-25 kW su tre località della Toscana.

A titolo d'esempio è riportato (Tab. 4.8) l'esito del confronto tra 4 modelli effettuato a 18 m di quota in un punto-griglia nel comune di Firenzuola, posto alla quota di 800 m s.l.m., per il periodo 01/01/2004-31/12/2007. Gli aerogeneratori sono ordinati per fattore di capacità (Cf), ovvero per la percentuale del tempo alla quale la turbina produce energia alla potenza nominale (Pnom). Vengono inoltre riportati la velocità di avvio (Vavv), la velocità nominale (Vnom), il fattore di disponibilità (Af), ovvero la percentuale del tempo alla quale la turbina produce energia, le ore equivalenti annue a potenza nominale (He) e la producibilità energetica annua (AEP).

Turbina	Pnom (kW)	Vavv (m/s)	Vnom (m/s)	Af (%)	Cf (%)	He (h/anno)	AEP (MWh/anno)
Travere T.A. 10.5-17000	17	2.7	10.5	58.1	11.1	980	16.66
Eoltec E11-25	25	2.6	11	59.8	9.70	851	21.27
Jonica Imp. JIMP25	25	3.5	11	45.6	8.50	745	18.63
Blu Mini Power BMP20	20	3.5	12	45.6	6.17	541	10.81

Tabella 4.8 - Confronto producibilità energetica nel sito di Firenzuola (quota 18 m)

Al fine di poter creare mappe di producibilità energetica sul territorio regionale della Toscana, si è scelto il modello di turbina della Travere T.A. 10.5-17000, le cui caratteristiche sono riportate in tabella 4.9. Tale scelta è stata effettuata in funzione della massimizzazione del Cf. Ovviamente nella realtà la scelta della turbina ottimale dovrebbe essere effettuata per ciascuna località in funzione delle sue peculiarità eoliche.

Costruttore	Travere Industries
Modello	T.A. 10.5-17000
Numero di pale	2
Velocità del vento in accensione	2.7 m/s
Velocità del vento di fermo	25 m/s
Velocità del vento nominale	15 m/s
Altezza del mozzo	18 m
Diametro del rotore	10.5 m
Area spazzata	86.58 m ²
Velocità nominale del rotore	150 (giri/min)
Potenza nominale	17 kW

Tabella 4.9 - Specifiche tecniche della turbina prescelta (Travere T.A. 10.5-17000).

Fonte: www.travere-industries.com

4.3.2.2 Elaborazione delle mappe di producibilità energetica

Utilizzando la turbina di riferimento (Tab. 4.9), sono state elaborate le mappe di producibilità energetica a 18 m sul territorio regionale. In particolare, in figura 4.36 è mostrata la distribuzione spaziale della producibilità energetica annua (AEP). Gli andamenti del fattore di disponibilità (Af) e quello del fattore di capacità (Cf), sono riportate nell'allegato 7.

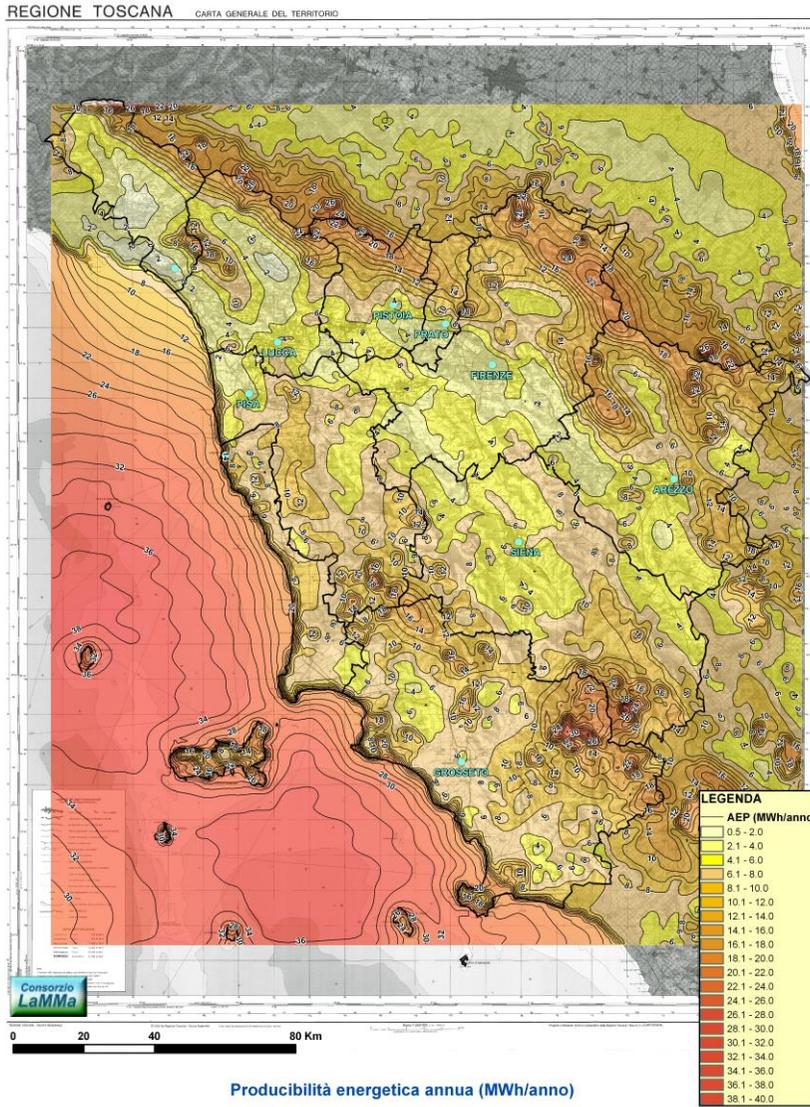


Figura 4.36 - Mappa della producibilità media annua stimata per l'aerogeneratore prescelto (Travere T.A. 10.5-17000)

5 Bibliografia

Agence regionale de l'environnement et des nouvelles energies (ARENE), 2007. "Eolico in ambiente urbano: stato dell'arte", Ed. EnvironmentPark Osservatorio Energia, Dossier n. 15.

Atkinson C.M., Petreanu S., Clark N.N., Atkinson R.J., McDaniel T.I., Nandkumar S., Famouri P., 1999. "Numerical Simulation of a Two-Stroke Linear Engine-Alternator Combination", SAE technical paper series n. 1999-01-0921, reprinted from "Hybrid Vehicle Engines and Fuel Technology" (SP-1422), International Congress and Exposition, Detroit, March 1-4, USA.

Bird R. and Riordan C., 1986. "Simple Solar Spectral Model for Direct and Diffuse Irradiance on Horizontal and Tilted Planes at the Earth's Surface for Cloudless Atmospheres." *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol 25(1), pp. 87-97.

Comegna E., 2010. "Finanziati gli impianti per l'energia da biomasse". In *L'Informatore Agrario* n. 8 del 26/902/2010, pp. 9.

Djurdjevic D. Z., 2001. "Perspectives and assessments of solar PV power engineering in the Republic of Serbia". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 2431–2446

Decreto del Presidente della Repubblica (D.P.R.) del 26 agosto 1993, n. 412. "Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia. Pubblicato nella Gazzetta Ufficiale del 14 ottobre 1993, n. 242, Supplemento Ordinario.

Funaioli E., Maggiore A., Meneghetti U., 1977. "Lezioni di meccanica applicata alle macchine", Ed. Patron, Bologna.

Hoshino T., Yoshihara S., Akazawa T., Murao K., 2008. "Prototype of free piston Stirling converter for household use". *Journal of Power and Energy Systems*, v. 2 n.5, 2008, pp. 1232-1240.

Huld T., Gottschalg R., Beyer H. G., Topic M., 2010. "Mapping the performance of PV modules, effects of module type and data averaging". *Solar Energy*. 84, pp. 324-338.

Li Q., Xiao J., Huang Z., 2008. "Simulation of a Two-Stroke Free-Piston Engine for Electrical Power Generation", *Energy & Fuels* n. 22, pp. 3443–3449.

Liu B, Jordan R., 1960. “The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse, and total solar radiation”, *Solar Energy* n. 4, pp. 1–16.

Mari R., Bottai L., Busillo C., Calastrini F., Gozzini B., Gualtieri G., 2011. “A GIS-based interactive web decision support system for planning wind farms in Tuscany (Italy)”. *Renewable Energy* n. 36, pp. 754–763.

Mortensen N.G., Landberg L., Troen I., Petersen E.L., 1993. “Wind atlas analysis and application program (WAsP)”. *Risø-I-666 (EN)*, Risø National Laboratory, Roskilde, Danimarca.

Masters G.M., 2004. “Renewable and Efficient Electric Power Systems”. John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, USA.

Norma UNI 8477/1 recante istruzioni per il “Calcolo degli apporti per applicazioni in edilizia. Valutazione dell'energia raggiante ricevuta”.

Scire J.S., Robe F.R., Fermau M.E., Yamartino R.J., 1999. “A User’s Guide for the CALMET Meteorological Model (version 5.0)”. Earth Tech Inc., Concord, MA, USA.

Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Wang W., Powers J.G., 2005. “A Description of the Advanced Research WRF Version 2”. NCAR Technical Note, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.

Suri M., Huld T., Dunlop E. D., Ossenbrink H., 2007. “Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries”. *Solar Energy*. 81, 1295–1305.

Vaccari F. P., Taddei S., Brugnoli G., 2009. “STAR – Solare Termico ad Alto Rendimento”. Report Finale del Progetto STAR finanziato dalla Regione Toscana.

Yarr G.A., Corey J.A., Brevetto USA 5389844 – 1995. “Linear electrodynamic machine”

6 Sitografia

<http://www.agraria.org>
<http://agronotizie.imaginenetwork.com>
<http://www.bertima.it>
<http://www.bluminipower.it>
<http://www.caebinternational.it>
<http://www.windpower.org>
<http://www.eima.it>
<http://www.enama.it>
<http://www.eoltec.com>
<http://www.facma.it>
<http://www.gandinimeccanica.it>
<http://www.jimp.it>
<http://159.213.57.103/lamma-webgis/windgis.phtml>
<http://landsaf.meteo.pt>
<http://www.peruzzo.it>
<http://www.rabaud.com>
http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/spectral/model/spectral_model_index.html
<http://www.tierreonline.com>
<http://www.travere-industries.com>