



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica

Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione

Anno accademico 2005-2006

## **ANALISI TECNICO-ECONOMICA DELLA TRASFORMAZIONE DEI RESIDUI AGRICOLI IN BIO-OLIO**

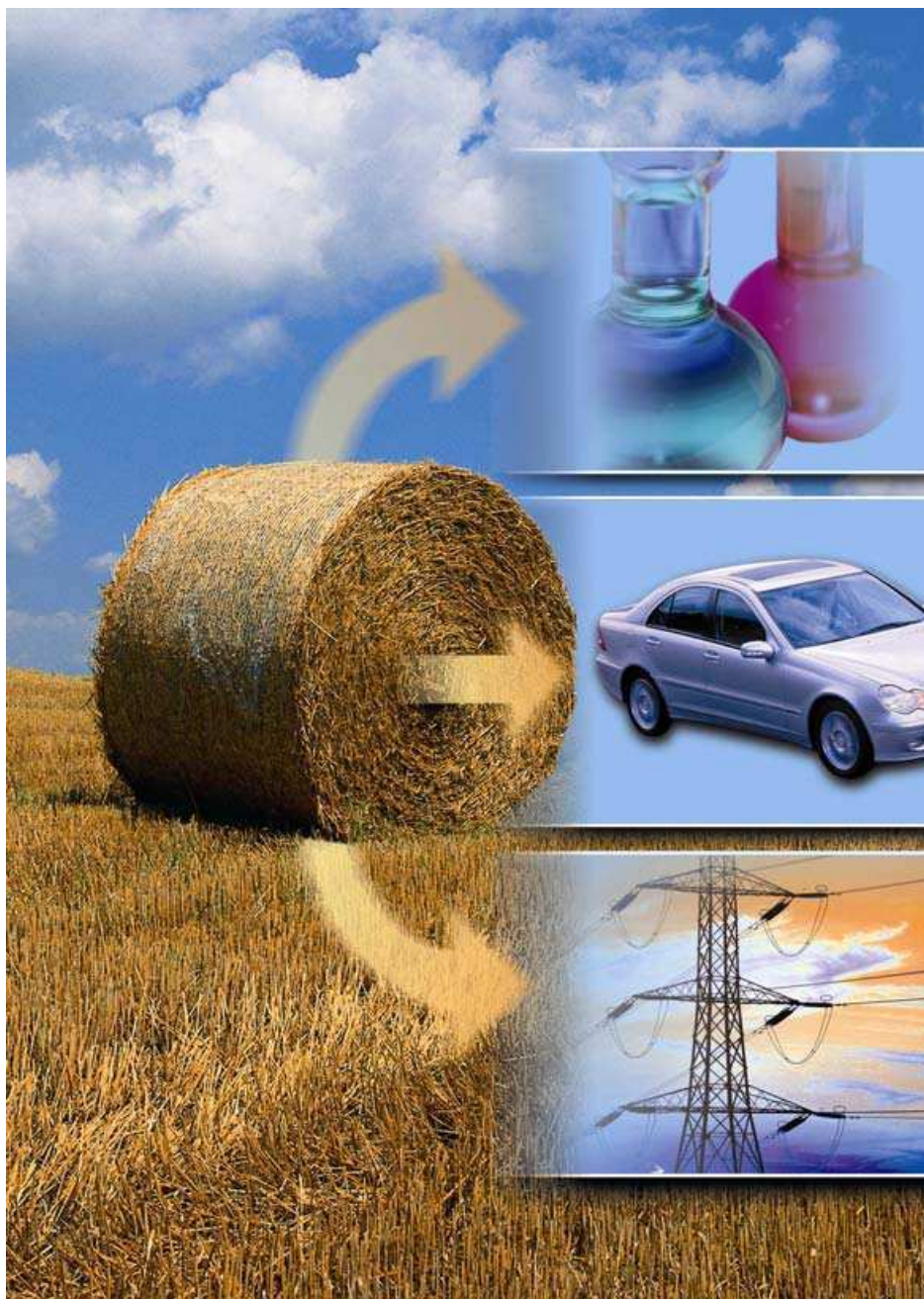
### **Relatori**

Prof. Ing. *Paolo Pelacchi*

Ing. *Franco Mazzoldi*

### **Candidato**

*Fabrizio Bassini*



**Figura 1: trasformazione della paglia**

“ The use of vegetables oils for engine fuels may seem insignificant today. But such oil may become in the course of time as important as the petroleum and coal tar products of the present time.”

**Rudolph Diesel , 1912**

*Dedicato a tutti quelli che hanno sempre creduto in me.*

# INDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>INDICE</b>   | <b>3</b>  |
| <b>INDICE FIGURE</b>  | <b>5</b>  |
| <b>INDICE TABELLE</b>   | <b>8</b>  |
| <b>INDICE TABELLE</b>   | <b>8</b>  |
| <b>PREMESSA</b>   | <b>9</b>  |
| <b>PREMESSA</b>   | <b>9</b>  |
| <b>1 SCENARIO ENERGETICO E AMBIENTALE MONDIALE</b>                  | <b>10</b> |
| ○ <b>1.1 SCENARIO ENERGETICO MONDIALE</b>                           | <b>10</b> |
| ○ <b>1.2 SCENARIO AMBIENTALE MONDIALE</b>                           | <b>15</b> |
| ○ <b>1.3 SCENARIO ITALIANO</b>                                      | <b>19</b> |
| <b>2 FONTE RINNOVABILE: BIOMASSA</b>                                | <b>21</b> |
| ○ <b>2.1 VANTAGGI E SVANTAGGI DELL'USO DELLA BIOMASSA</b>           | <b>25</b> |
| ○ <b>2.2 CONVERSIONI ENERGETICHE BIOMASSA</b>                       | <b>27</b> |
| 2.2.1 PROCESSI BIOCHIMICI   | 28        |
| 2.2.2 PROCESSI MECCANICO-CHIMICI-FISICI                             | 30        |
| 2.2.3 PROCESSI TERMOCHIMICI   | 31        |
| 2.2.3.1 <b>COMBUSTIONE DIRETTA e CO-FIRING</b>                      | <b>31</b> |
| 2.2.3.2 <b>GASSIFICAZIONE</b>                                       | <b>32</b> |
| 2.2.3.3 <b>PIROLISI</b>   | <b>33</b> |
| <b>3 DISPONIBILITÀ BIOMASSA IN ITALIA</b>                           | <b>48</b> |
| ○ <b>3.1 DISPONIBILITÀ BIOMASSA IN TOSCANA</b>                      | <b>48</b> |
| 3.2 <b>DISPONIBILITÀ BIOMASSA NELLA VAL DI CECINA</b>               | <b>50</b> |
| <b>4 TECNOLOGIA UTILIZZATA PER LA TRASFORMAZIONE DELLA BIOMASSA</b> | <b>52</b> |
| <b>5 ANALISI DEL COSTO DI PIROLISI</b>                              | <b>55</b> |
| ○ <b>5.1 COSTO DI TRASPORTO BIOMASSA</b>                            | <b>57</b> |
| ○ <b>5.2 COSTO INVESTIMENTO</b>                                     | <b>59</b> |
| ○ <b>5.3 COSTO AMMORTAMENTO</b>                                     | <b>61</b> |
| ○ <b>5.4 ALTRI COSTI</b>  | <b>62</b> |
| ○ <b>5.5 COSTO MANUTENZIONE</b>                                     | <b>62</b> |
| ○ <b>5.6 COSTO ENERGIA ELETTRICA RICHIESTA</b>                      | <b>63</b> |
| ○ <b>5.7 COSTO DEL LAVORO</b>                                       | <b>65</b> |
| ○ <b>5.8 TRASPORTO BIO-OLIO</b>                                     | <b>66</b> |
| ○ <b>5.8 SCELTA NUMERO PIROLIZZATORI</b>                            | <b>68</b> |
| <b>6 PREZZO DI VENDITA DEL BIO-OLIO</b>                             | <b>71</b> |
| ○ <b>6.1 COSTO ACQUISTO DELLA BIOMASSA</b>                          | <b>71</b> |

|  |            |
|--|------------|
| ○ 6.2 PREZZO DI VENDITA DEL BIO-OLIO NEI PRIMI 8 ANNI _____            | 72         |
| ○ 6.3 PREZZO DI VENDITA DEL BIO-OLIO DOPO 8 ANNI _____                 | 73         |
| <b>7 ANALISI DEL COSTO DI PIROLISI</b> _____                           | <b>74</b>  |
| <b>8 DESCRIZIONE DEL FENOMENO FISICO</b> _____                         | <b>78</b>  |
| ○ 8.1 MODELLAZIONE DE SISTEMA _____                                    | 79         |
| ○ 8.2 LAVORO E ANALISI SUL SISTEMA _____                               | 83         |
| ○ 8.3 SIMULAZIONE _____  | 86         |
| <b>9 PREZZO DI VENDITA DEL BIO-OLIO CON AUTOMAZIONE</b> _____          | <b>96</b>  |
| ○ 9.1 ANALISI ECONOMICA DELL' IMPIANTO TERMOELETTTRICO _____           | 97         |
| ○ 9.1.1 ANALISI ECONOMICA PRIMI 8 ANNI _____                           | 100        |
| ○ 9.1.2 ANALISI ECONOMICA TRA 8 E 12 ANNI _____                        | 102        |
| ○ 9.1.3 ANALISI ECONOMICA DOPO 12 ANNI _____                           | 104        |
| <b>10 ANALISI DEI RISULTATI</b> _____                                  | <b>106</b> |
| <b>APPENDICE</b> _____   | <b>110</b> |
| ○ A) I NUMERI DELL' ENERGIA _____                                      | 110        |
| ○ B) CERTIFICATI VERDI _____   | 111        |
| ○ C) SIMULAZIONE _____   | 112        |
| C1) LINPROG MATLAB _____   | 112        |
| C2) FUNZIONI E SOTTOSISTEMI UTILIZZATI NEL PROGETTO<br>ANALOGICO _____ | 113        |
| C3) FUNZIONI E SOTTOSISTEMI UTILIZZATI NEL PROGETTO DIGITALE<br>_____  | 124        |
| <b>BIBLIOGRAFIA</b> _____  | <b>127</b> |
| ○ SITI WEB _____   | 129        |

## INDICE FIGURE

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: trasformazione della paglia .....   | 2  |
| Figura 2: quote del PIL mondiale(1997)      Figura 3: quote del PIL mondiale(2010).....   | 10 |
| Figura 4: previsione del PIL mondiale nel 2020 .....  | 11 |
| Figura 5: crescita della popolazione mondiale e del consumo d'energia .....   | 11 |
| Figura 6: previsione della richiesta d'energia (espressa in Mtoe) che avverrà nel mondo .....   | 12 |
| Figura 7: andamento delle diverse fonti nel periodo 2000- 2050 [34] [EJ=10 <sup>18</sup> J] .....   | 14 |
| Figura 8: concentrazione dell'anidride carbonica rilevate nelle stazioni di Mauna Loa e Siple.....  | 15 |
| Figura 9: emissioni di CO <sub>2</sub> per combustibile .....   | 17 |
| Figura 10: impegni di riduzione delle emissioni dai vari paesi dell' UE [29] ....   | 18 |
| Figura 11: L'energia in Italia per fonti .....  | 19 |
| Figura 12,: riassunto delle varie dipendenze energetiche dei vari paesi dell'EU .....   | 20 |
| Figura 13: andamento della dipendenza energetica dell'Italia nel tempo .....  | 20 |
| Figura 14: fotosintesi.....   | 21 |
| Figura 15: composizione della biomassa.....   | 21 |
| Figura 16: schema sintetico dei vari tipi di biomassa .....   | 22 |
| Figura 17: foto di alcuni tipi di biomassa .....  | 22 |
| Figura 18: produzione annua di alcune colture energetiche.....  | 23 |
| Figura 19: potere calorifico inferiore e composizione di alcuni combustibili organici .....   | 23 |
| Figura 20: confronto di costo di alcuni combustibili.....   | 24 |
| Figura 21: conversioni energetiche biomassa.....  | 27 |
| Figura 22: andamento della produzione di energia elettrica da biogas con cogenerazione (1995-2003)[31].....   | 29 |
| Figura 23: andamento della produzione di energia elettrica da biogas solo EE (1995-2003) [31].....  | 29 |
| Figura 24: confronto tra produzione di etanolo e biodiesel nel mondo [28] ....  | 30 |
| Figura 25: composizione del syngas [31] .....   | 32 |
| Figura 26: contenuto dei vari composti della pirolisi al variare della temperatura [26] .....   | 34 |
| Figura 27: il Bio-olio .....  | 35 |
| Figura 28: Usi e prodotti della pirolisi.....   | 35 |
| Figura 29: confronto tra biomassa e olio da esso prodotto.....  | 37 |
| Figura 30: composizione del bio-olio.....   | 38 |
| Figura 31: Inorganic Compositions of the Chars and Bio-Oils Made from Various Biomass Feeds at NREL with Char Removal by Cyclones or Filtration [13]                  | 39 |
| Figura 32: Aging of Bio-Oils at 35°C to 37°C (cP = mPas) [13] .....   | 40 |
| Figura 33 Effect of Measurement Temperature on Apparent aging of poplar Hot-Gas Filtered Bio-Oil (Diebold and Czernik 1997) [13] .....                                | 41 |
| Figura 34: Viscosity and Molecular Weight after Aging of a Bio-Oil Made from Oak (data from Czernik et al. 1994) (Molecular weight by GPC with UV detector)[13] ..... | 41 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 35 : typical spray cone with pyrolysis liquid .....  | 43 |
| Figura 36: schema sintetico del processo di pirolizzazione .....  | 45 |
| Figura 37: tipologie di reattori e luogo di sviluppo .....  | 46 |
| Figura 38: tecnologie più attrattive [14].....  | 47 |
| Figura 39: Biomasse attualmente disponibili in Italia [32] .....  | 48 |
| Figura 40: disponibilità biomassa [35] .....  | 49 |
| Figura 41: potenziale energetico diviso per zona .....  | 49 |
| Figura 42: cartina della Val di Cecina .....  | 51 |
| Figura 43: stima dei costi di produzione. Rappresenta una stima di quale potrebbe essere il prezzo dei vari combustibili prodotti dalle varie tecnologie verso il 2010.[16] ..... | 52 |
| Figura 44: costo al Km del trasporto.....   | 57 |
| Figura 45: costo trasporto biomassa.....  | 58 |
| Figura 46: Costo investimento di alcuni impianti esistenti.....   | 59 |
| Figura 47: Costo totale investimento .....  | 60 |
| Figura 48: costo ammortamento .....   | 61 |
| Figura 49: altri costi .....  | 62 |
| Figura 50: costo manutenzione .....   | 63 |
| Figura 51: costo elettricità .....  | 64 |
| Figura 52: costo del lavoro.....  | 66 |
| Figura 53: costo di trasporto bio-olio .....  | 67 |
| Figura 54: costo totale e scelta numero reattori.....   | 68 |
| Figura 55: costo totale al Mcal e scelta numero pirolizzatori .....   | 69 |
| Figura 56: rappresentazione dei reattori pirolitici .....   | 70 |
| Figura 57: analisi del costo pirolizzatore da 5;27MWth.....   | 75 |
| Figura 58: analisi del costo pirolizzatore da 1,05MWth .....  | 75 |
| Figura 59: formazione prezzo bio-olio (impianto da 5,27 MWth).....  | 76 |
| Figura 60: formazione prezzo bio-olio (impianto da 1,05 MWth).....  | 76 |
| Figura 61: reattore mobile della ROI [4]      Figura 62: reattore mobile della ABRI [24].....   | 77 |
| Figura 63: Correlazione tra le masse di char, gas, liquido e la biomassa di ingresso [26] .....   | 81 |
| Figura 64: andamento di x1,x2,x3 in funzione della portata di biomassa .....  | 84 |
| Figura 65: schema di base della simulazione .....   | 86 |
| Figura 66: massa del char .....   | 87 |
| Figura 67: massa del gas .....  | 87 |
| Figura 68: temperatura.....   | 87 |
| Figura 69: progetto di controllo.....   | 88 |
| Figura 70: progetto di controllo digitalizzato .....  | 89 |
| Figura 71: andamento della temperatura a 600°C in presenza di disturbi .....  | 90 |
| Figura 72: andamento di k1 a 600°C in presenza di disturbi .....  | 90 |
| Figura 73: andamento della temperatura a 540°C in presenza di disturbi .....  | 91 |
| Figura 74: andamento della temperatura a 540°C in assenza di disturbi.....  | 91 |
| Figura 75: andamento di k1 a 540°C in assenza di disturbi.....  | 92 |
| Figura 76: andamento della temperatura per uno sbalzo termico negativo ....   | 93 |
| Figura 77: andamento di k1 per uno sbalzo termico negativo .....  | 93 |
| Figura 78: andamento della temperatura per uno sbalzo termico positivo.....   | 94 |
| Figura 79: andamento di k1 per uno sbalzo termico positivo.....   | 94 |
| Figura 80: andamento di k1 in funzione della temperatura e delle masse .....  | 95 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabella 9: costo del bio-olio nei due periodi .....  | 96  |
| Figura 81: punto di pareggio primi 8 anni.....   | 101 |
| Tabella 12: valutazione del conto economico di un impianto termoelettrico (8-12anni) ..... | 102 |
| Figura 82: punto di pareggio tra 8-12 anni .....   | 103 |
| Figura 83: punto di pareggio dopo 8 anni.....  | 105 |
| Tabella 15: analisi pirolizzatore da 5,27 MWth .....                                       | 106 |
| Tabella 16: sviluppo futuro atteso .....   | 108 |
| Tabella 17: valutazione futura del C.E. di un impianto termoelettrico.....                 | 109 |

## *INDICE TABELLE*

|  |     |
|--|-----|
| Tabella 1: destinazione degli ettari totali .....  | 51  |
| Tabella 2: destinazione degli ettari seminativi.....   | 51  |
| Tabella 3: dati di progetto del pirolizzatore.....   | 56  |
| Tabella 4: dati costo del lavoro .....   | 65  |
| Tabella 5: valutazione economica di primo periodo.....   | 72  |
| Tabella 6: valutazione economica di secondo periodo .....                                      | 73  |
| Tabella 7: dati di progetto del pirolizzatore da 5,27 e 1,05 MWth .....                        | 74  |
| Tabella 8: analisi del costo di pirolisi (pirolizzatore da 5,27 e 1,05 MWth).....              | 74  |
| Tabella 9: costo del bio-olio nei due periodi .....  | 96  |
| Tabella 10: dati termoelettrico .....  | 97  |
| Tabella 11: valutazione conto economico termoelettrico primi 8 anni.....                       | 100 |
| Tabella 12: valutazione del conto economico di un impianto termoelettrico (8-<br>12anni) ..... | 102 |
| Tabella 13: valutazione conto economico termoelettrico dopo 12 anni .....                      | 104 |
| Tabella 14: Dati finali .....  | 106 |
| Tabella 15: analisi pirolizzatore da 5,27 MWth .....   | 106 |
| Tabella 16: sviluppo futuro atteso .....   | 108 |
| Tabella 17: valutazione futura del C.E. di un impianto termoelettrico.....                     | 109 |