

POLITECNICO DI MILANO

FACOLTÀ DI INGEGNERIA DEI PROCESSI INDUSTRIALI
Laurea Specialistica in Ingegneria Chimica



IMPATTI AMBIENTALI NELLA VALORIZZAZIONE DI
RESIDUI LIGNO-CELLULOSICI

CASO D'UNA BIORAFFINERIA INTEGRATA

Svolta in collaborazione con la *Escola Politecnica - Universidade de São Paulo* e il
dipartimento di biotecnologie della *Minnesota University*

Relatore: Prof. Paolo Centola – *Politecnico di Milano*

Correlatore: Prof.ssa Patricia Matai – *Universidade de São Paulo – Escola
Politecnica*

Tesi di laurea di:

Alberto Nigro

Matricola n°725562

Anno accademico 2009-2010

INDICE

1...Introduzione	8
2...Lo sviluppo sostenibile	10
3...Risorse rinnovabili e non rinnovabili.....	12
3.1 Fonti non rinnovabili.....	18
3.1.1....Fonti non rinnovabili di origine fossile	19
3.1.2....Fonti non rinnovabili di origine minerale	21
3.2 Fonti rinnovabili.....	22
3.2.1....Impatto socio-ambientale delle risorse rinnovabili	23
4...I combustibili.	27
5...I Biocombustibili	30
5.1 Biocombustibili di prima generazione	34
5.2 Seconda generazione.....	39
5.3 Terza generazione	41
5.4 Il Bioetanolo.....	44
5.5 Il Biodiesel	48
6...Le Biomasse.....	52
7...Processi di valorizzazione di biomassa.....	55
7.1 Combustione del bagasso al fine di produrre energia.....	56
7.1.1....schema di impianto	57
7.2 La via biochimica: Idrolisi enzimatica.....	61
7.2.1....Il Pre-trattamento	62
7.2.2....L'idrolisi enzimatica	64
7.2.3....schema di impianto	68
7.3 La Via Termochimica: Biomass to liquids (BTL)	71
7.3.1....La Sintesi di Fisher Tropsch	71
7.3.2....Applicazione industriale	73
8...L'impatto ambientale	83
8.1 Aspetti pratici e legislativi.	84
8.2 Aspetti tecnici e scientifici.....	87
8.3 Life cycle assessment(LCA)	88
9...Metodologia dello studio	95
9.1.1....Categoria di impatto ambientale	96

9.1.2....Indicatore di impatto	97
10..Caso specifico	98
10.1 Il contesto dei biocombustibili in Brasile	98
10.2 Contesto oggetto di studio	106
10.3 Dati raccolti.....	107
10.3.1..Raccolta dati sull'attuale processo di valorizzazione del bagasso della canna da zucchero.	107
10.3.2..Raccolta dati per formulare la proposta alternativa di valorizzazione del bagasso della canna da zucchero.	114
11..Bilancio emissioni CO2	121
11.1 Metodologia di calcolo	123
11.1.1..Scenario 1 – attuale processo di valorizzazione del bagasso	125
11.1.2..Scenario 2 – processo alternativo proposto	127
11.1.3..Emissioni di CO2 relative alla compensazione dell'energia che si cesserebbe di produrre nel processo innovativo.	127
11.1.4..Emissioni di CO ₂ relative alla sostituzione della benzina con l'etanolo prodotto a partire dal bagasso di canna da zucchero	130
12..Risultati e discussione.....	132
12.1 Quantitativi di energia uscenti dai processi considerati.....	132
12.1.1..Energia in eccesso generabile dal processo attuale	132
12.1.2..Energia in eccesso generabile dal processo di seconda generazione	132
12.2 Calcolo delle emissioni di CO ₂ derivanti dai due processi considerati	133
12.2.1..Emissioni di CO ₂ relative all'attuale processo di valorizzazione del bagasso	133
12.2.2..Emissioni di CO ₂ relative all'attuale processo di valorizzazione del bagasso	133
12.3 Calcolo delle emissioni generate per compensare la quantità di energia elettrica che cesserebbe d'essere prodotta in seguito all'implementazione del processo.....	135
12.4 Calcolo delle emissioni generate da una quantità di benzina energeticamente equivalente all'etanolo prodotto dal processo di seconda generazione.	137
12.5 Discussione dei risultati ottenuti.....	138
12.5.1..verifica della consistenza dei dati utilizzati.	138

12.5.2..Confronto fra la situazione attuale – Scenario 1.1 - ed i processi alternativi proposti – Scenari 2.1 e 2.2.	139
12.5.3..Confronto fra il processo di prima generazione in condizioni di massimo rendimento– Scenario 1.2 -- ed i processi alternativi proposti – Scenari 2.1 e 2.2.	142
13..Conclusione.....	146
14..Appendice	148
14.1 Appendice 1a – foglio di calcolo con dati e conseguenze relative allo scenario 1.1 in relazione agli scenari 2.1 e 2.2	148
14.2 Appendice 1b – foglio di calcolo riportante i risultati ottenuti in termini di emissioni di CO ₂ conseguenti allo scenario 1.1 in relazione agli scenari 2.1 e 2.2	149
14.3 Appendice 2a – foglio di calcolo con dati e conseguenze conseguenti allo scenario 1.2 in relazione agli scenari 2.1 e 2.2	151
14.4 Appendice 2b –risultati ottenuti in termini di emissioni di CO ₂ conseguenti allo scenario 1.1 in relazione agli scenari 2.1 e 2.2	152
15..Bibliografia	153

INDICE DELLE FIGURE E DELLE TABELLE

Figura 1: pubblicato nel Rapporto ENEA 2008.....	12
Figura 2: quantità di energia fornita da ciascun tipo di fonte considerato, i colori rappresentano i diversi tipi di previsione effettuati.....	14
Figura 3bis: quantità di energia elettrica necessaria in futuro a seconda della previsione utilizzata.....	14
Figura 4 Localizzazione delle principali centrali di energia rinnovabile in Europa.	16
Figura 5: Fabbisogno totale di energia nel mondo 2006: Produzione locale + importazioni - esportazioni - bunker marini internazionali ± quantità immagazzinate.....	18
Figura 6: emissioni di anidride carbonica calcolate usando i dati a disposizione della IEA ed elaborati con il metodo Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, IPCC/OECD/IEA Paris, 1997.....	19
Figura 7:evoluzione della spesa pubblica in R&S nelle Rinnovabili in percentuale della spesa pubblica in R&S energetica.....	23
Figura 8: localizzazione geografica della centrale idroelettrica di Belo Monte	25
Figura 9: composizione della spesa pubblica in R&S (Ricerca e Sviluppo) nelle energie rinnovabili	32
Figura 10: lista dei processi possibili o esistenti per la produzione di biocombustibili, (Hamenlinck and Faaij, 2006).....	33
Figura 11: crescita della produzione statunitense di etanolo.....	36
Figura 12:andamento dei prezzi di petrolio e mais negli Stati Uniti	37
Figura 13: impianto produttivo Algenol	43
Figura 14: struttura chimica dell'etanolo	44
Figura 15 : altre caratteristiche dell'etanolo.	45
Figura 16 Source: Renewable Fuels Association, 2009.....	48
Figura 19 proprietà chimico fisiche di biodiesel e gasolio.....	49
Figura 18: processo produttivo del biodiesel.....	51
Figura 19 Tabella rappresentante le caratteristiche principali delle biomasse commerciali ..	54
Figura 21: schema di processo 1.....	57
Figura 21: configurazione 2, schema di processo.....	59
Figura 23: Configurazione 3, schema di processo.....	59
Figura 23: Configurazione 4, schema di processo.....	61
Figura 24: i diversi tipi di pretrattamento con le relative caratteristiche di processo.	63

Figura 25: visione della <i>Saccharomyces Cerevisiae</i> al microscopio	66
Figura 27:schema di funzionamento della fermentazione alcolica.....	66
Figura 27: costo della produzione di etanolo in funzione del processo di idrolisi utilizzato..	68
Figura 28: schema di impianto in funzione dei differenti tipi di biomassa nell'idrolisi enzimatica.	69
Figura 29: differenti schemi di processo dell'idrolisi enzimatica del bagasso al fine di produrre etanolo; (A)convenzionale, (B) idrolisi e fermentazione simultanee , (C) bioprocesso consolidato.	70
Figura 30: sfruttamento del gas caldo nel processo di essiccazione.....	77
Figura 31: schema di processo dell'impianto di gassificazione di biomassa differenziato per differenti materie prime	80
Figura 32: scema di processo del processo BTL	81
Figura 33: flussogramma della generazione di biosyngas a partire da biomassa lignocellulosica.	82
Figura 34:flussogramma del processo di conversione del syngas in combustibili sintetici. ..	82
Figura 35fasi del ciclo di vita di un prodotto.....	89
Figura 36: schema delle fasi principali che costituiscono un LCA	91
Figura 37: catena produttiva zucchero-alcool in Brasile.	99
Figura 38: evoluzione della produzione di canna da zucchero in funzione del tempo e degli eventi significativi.....	101
Figura 39: emissioni di gas serra relative ai principali tipi di etanolo presenti sul mercato mondiale. Fonte [24].....	104
Figura 40: distribuzione delle bioraffinerie produttrici di etanolo e.....	105
Figura 41: sistema del prodotto alcool etilico idratato combustibile.....	109
Figura 42 Portata massiva di sostanza gassosa emessa per ogni tonnellata di alcool.....	111
Figura 44: schema di processo di una bioraffineria tipica.....	115
Figura 45: schema di processo di una bioraffineria integrata, L'impianto è stato suddiviso in sistemi per cui sono stati sviluppati appositi modelli numerici in grado di simularne il funzionamento.....	115
Figura 45: tabella che illustra i valori di GWP per i principali gas serra.....	122
Figura 46: emissioni di CO2 relative alla produzione di energia attraverso alcune fonti energetiche.	129

Figura 48: grafico riportante le emissioni di CO2 relative a ciascuna alternativa di processo – Scenario 1.1.....	141
Figura 49: grafico riportante le emissioni di CO2 relative a ciascuna alternativa di processo – Scenario 1.2.....	144
Tabella 1: caratteristiche fisico-chimiche dell'etanolo.....	44
Tabella 2: paragone fra idrolisi acida ed idrolisi enzimatica	65
Tabella 3: proprietà fisico chimiche dei combustibili.....	76
Tabella 4: energia elettrica generata per tonnellata di canna processata nei due scenari presi in considerazione	113
Tabella 5: composizione elementare di bagasso di canna da zucchero e paglia residua di granturco	117
Tabella 6: percentuale massiva degli elementi costituenti il bagasso della canna da zucchero, fonte [17].....	119
Tabella 7: composizione chimica in percentuale massiva del bagasso di canna da zucchero paragonata alle due grandi categorie di legname.	119
Tabella 8: risultati della simulazione svolta presso la Minnesota University.....	120
Tabella 9 CO2 equivalente per litro di etanolo/benzina e rapporto fra le due potenze.	120
Tabella 10: energia elettrica generata dalla combustione diretta del bagasso in caldaia.....	132
Tabella 11: emissioni di CO2 relative alla produzione di energia attraverso alcune fonti energetiche	136
Tabella 12: emissioni di anidride carbonica relative al processo attuale e al processo alternativo	138
Tabella 13: paragone emissioni di anidride carbonica a parità di energia generata-Scenario 1.1.....	140
Tabella 14:paragone emissioni di anidride carbonica a parità di energia prodotta - Scenario 2.1.....	143
Tabella 15: percentuale di emissioni di anidride carbonica risparmiata (negativa) o generata (positiva).	144

1 Introduzione

La questione dei consumi energetici mondiali sempre più elevati ha come esito l'impovertimento delle risorse energetiche di origine fossile presenti sul pianeta (carbone, petrolio e gas naturale), fin'ora predominanti nel mix energetico globale, e un impatto ambientale negativo dal punto di vista delle emissioni climalteranti.

Da tempo una proposta di soluzione è stata individuata nell'utilizzo di fonti rinnovabili, fra le tante ipotesi spicca la valorizzazione delle biomasse attraverso la loro trasformazione in materiali alternativi ai classici prodotti provenienti dalla raffinazione del petrolio.

Nell'ambito di tale trasformazione, la produzione di "bioetanolo" si è lautamente diffusa nei paesi in cui le condizioni geo-climatiche sono permesse la coltivazione della canna da zucchero o del mais.

Sono peraltro in via di sviluppo tentativi ed esperimenti atti ad ottenere i combustibili alternativi a partire da materiali ligno-cellulosici, derivanti prevalentemente da residui dell'industria agricola e di quella del legno.

Non vi sono, allo stato attuale, impianti industriali dedicati a tale produzione.

Il Brasile presenta una matrice energetica composta per più del 70% da energie rinnovabili. L'importanza attuale della questione energetica globale connessa con i cambiamenti climatici in corso, sostenuti da politiche mondiali a bassa emissione di anidride carbonica, ha portato alla decisione di focalizzare l'attenzione della presente tesi sulla valutazione dell'impatto ambientale (VIA) di un impianto per la produzione di energia elettrica in un paese di sviluppo. Il Brasile infatti, presenta un notevole tasso di crescita economica, e come avviene nella maggior parte dei paesi in via di sviluppo, tale incremento del PIL non viene accompagnato da politiche ambientali adeguate.

Viene eseguito uno studio su alcuni degli aspetti specifici implicati nei processi di valorizzazione delle biomasse ed in seguito viene sviluppato un metodo di valutazione degli impatti ambientali generati in tale produzione.

La tesi si articola, inizialmente, in una ampia descrizione del problema energetico globale e della descrizione dei processi produttivi delle differenti tipologie di biocombustibili (prima e seconda generazione).

Successivamente vengono descritti i sistemi di valutazione dei generici impatti ambientali e quindi si passa alla definizione di un caso specifico relativo al contesto produttivo esistente in Brasile.

È stata effettuata una ricerca di dati presso la “bioraffineria” di São Manuel, situata nell’entroterra dello stato di São Paulo. I dati sono stati rielaborati attraverso la preziosa collaborazione del Prof. Shri Ramaswamy e del dipartimento di biotecnologie della *Minnesota University*. Grazie agli studi in materia di idrolisi di materia lignocellulosica effettuati dall’università statunitense, si è simulato il funzionamento di una bioraffineria integrata di ultima generazione per la produzione di etanolo ed energia.

Una volta noti i quantitativi di energia elettrica generabile attraverso il processo attuale di valorizzazione del bagasso di canna da zucchero e le quantità di etanolo ed energia ottenibili dal processo di seconda generazione, sono stati studiati differenti scenario al fine di quantificare gli impatti ambientali associati al cambiamento di processo.

Con l’obiettivo di rendere possibile la valutazione di impatto ambientale si è scelto come indicatore ambientale il quantitativo di emissioni emesse a parità di energia elettrica e meccanica generate.

Si sono considerati gli impatti ambientali relativi a due differenti scenari possibili per quanto riguarda l’efficienza energetica del sistema di prima generazione (quella attuale e la massima ottenibile).

A questi sono stati correlati due scenari alternativi studiati per compensare l’energia elettrica che cesserebbe d’essere prodotta a favore della produzione di bioetanolo nel caso si passasse alla via innovativa. In particolare, secondo l’ipotesi conservativa si sono studiate le emissioni di CO₂ relative alla produzione di tale energia elettrica attraverso combustibili fossili (carbone e gas naturale).

L’universalità del metodo permette di ripetere altrove lo studio per riconoscere o meno la sostenibilità dal punto di vista ambientale dei risultati scientifici riguardanti rendimento e costi di investimento degli impianti adetti alla produzione di bio-carburanti.

Il modello numerico, sviluppato con Excel, permette di calcolare le percentuali di anidride carbonica emesse, o evitate, in funzione del rendimento dei processi attuali o futuri di valorizzazione di biomassa e dell’alternativa di processo

proposte per compensare l'energia elettrica che cesserebbe d'essere generata a favore della produzione di biocarburanti.

2 Lo sviluppo sostenibile

Nel corso della storia la valutazione della qualità della vita di una società è sempre dipesa dai servizi resi disponibili alla popolazione, dai prodotti presenti sul mercato e dal punto di vista strettamente economico, dal prodotto interno lordo, il PIL, di uno stato.

La seconda metà del ventesimo secolo è stata caratterizzata da una crescita esponenziale sia dei consumi che dei relativi impatti ambientali. Grazie all'evoluzione dei metodi di informazione, le conseguenze dell'inquinamento prodotto dall'uomo e la successiva crisi finanziaria non sono passate inosservate. Sono state recepite dalla gran parte della popolazione mondiale e hanno reso le persone cosce delle falle del sistema socioeconomico attuale, dando luogo alla necessità di una nuova concezione di sviluppo.

È proprio questa consapevolezza che ha comportato la nascita di una nuova attitudine, tanto importante, quanto complessa e polivalente, verso il concetto di sviluppo sostenibile.

Per **sviluppo sostenibile** si intende “uno sviluppo che risponda alle necessità del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare le proprie esigenze” (Brundtland, World Commission on Environment and Development, 1987), “un miglioramento della qualità della vita, senza eccedere la capacità di carico degli ecosistemi alla base” (World Conservation Union, UN Environment Programme and World Wide Fund for Nature, 1991); “uno sviluppo che offra servizi ambientali, sociali ed economici di base a tutti i membri di una comunità, senza minacciare l'operabilità del sistema naturale, edificato e sociale da cui dipende la fornitura di tali servizi” (International Council for Local Environmental Initiatives, 1994).

Con lo scorrere del tempo e l'avanzare del progresso tecnologico, il concetto di impatto ambientale si è rivelato estremamente complicato e molteplice. Una

totale comprensione del termine implica la sua applicazione in ogni campo della scienza e perfino dell'arte. Nell'ultimo decennio, oltre a svilupparsi numerosi corsi di studio in campo ambientale che spaziano dall'ingegneria alla sociologia, è proprio cambiata la concezione del prodotto industriale.

A partire dalla rivoluzione industriale fino ad alcuni decine di anni fa, il processo produttivo era concepito esclusivamente con l'obiettivo di dar origine ad un alto valore aggiunto rispetto alla materia prima di partenza; si prestava attenzione all'evoluzione del prodotto, dalla creazione all'entrata nel mercato dei consumatori. A partire dai primi disagi ambientali è cominciato un processo di presa di coscienza da parte dei produttori e dei consumatori tale che al giorno d'oggi la situazione sia mutata notevolmente. Sono principalmente due le grandi questioni che vanno tenute in considerazione. La prima è l'influenza delle politiche statali e la relativa nascita di nuove leggi con il fine di tutelare l'ambiente. La seconda è invece frutto dell'evoluzione dei mezzi di informazione, internet in particolar modo; è la richiesta da parte della popolazione di prodotti la cui produzione non comporti conseguenze negative per uomini ed ecosistemi, non produca, dunque, un impatto ambientale¹; è la volontà delle persone, sorta solo nel'ultimo decennio, di utilizzare le proprie risorse finanziarie in progetti a carattere sostenibile.

La conseguenza diretta è stata che soprattutto le grandi compagnie, ma non solo, hanno cominciato a dedicare maggiori sforzi alla tutela dell'ambiente; sono stati istituiti numerosi gruppi di ricerca con l'obiettivo di minimizzare l'impatto ambientale dei processi produttivi, e sono stati realizzati numerosi progetti in grado di compensare l'impatto ambientale prodotto (bonifica di zone degradate o mantenimento e tutela di aree boschive al fine di compensare le emissioni di CO₂).

Per quanto riguarda la metodologia di base adottata al giorno d'oggi nella valutazione di impatto ambientale di un processo industriale, è ormai un fatto reale che il prodotto finito venga studiato, "dalla culla alla tomba". Al fine di eseguire una corretta analisi è d'obbligo tener conto di tutte le fasi del processo produttivo, dall'estrazione della materia prima, allo smaltimento di ciascun sub prodotto, fino all'eventuale riutilizzo o riciclaggio del prodotto "a fine vita utile".

¹ la definizione di impatto ambientale è argomentata nel capitolo 7 del seguente testo.

Per questo si è sviluppata l'idea di ciclo di vita di un prodotto e la relativa valutazione: LCA (Life Cycle Assessment).

3 Risorse rinnovabili e non rinnovabili

Per fonti rinnovabili si intendono quelle risorse praticamente inesauribili in tempi brevi, quelle forme di energia generate da fonti che per loro caratteristica intrinseca, se sfruttate nel modo adeguato, sono in grado di rigenerarsi su una scala di tempo paragonabile a quella con cui vengono consumate. Il loro utilizzo, dunque, non pregiudica le risorse naturali per le generazioni future.

Per fonti fossili si intendono invece le cosiddette risorse accumulate; esse sono caratterizzate da tempi di rigenerazione molto lunghi rispetto al tempo di utilizzo e il loro tasso di consumo è consistentemente superiore alla velocità con cui possono rinnovarsi. Il loro esaurimento è considerato quantificabile su una scala dei tempi definibile "umana".

La mentalità progressista caratteristica della seconda metà del ventesimo secolo ha visto nelle risorse fossili la principale fonte energetica su cui far affidamento. La relativa semplicità di utilizzo di petrolio, gas naturale e metano, dovuta principalmente al loro costo ed alla relativa facilità di estrazione, hanno ridotto ai minimi termini la ricerca nelle fonti rinnovabili.

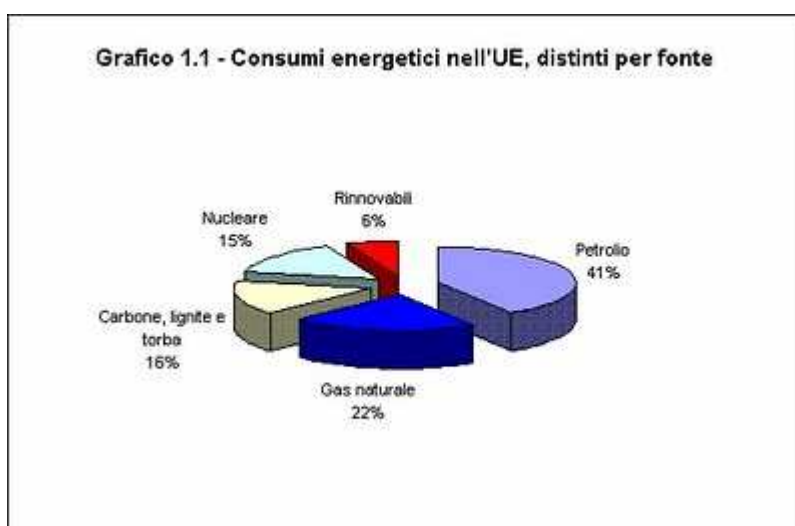


Figura 1: pubblicato nel Rapporto ENEA 2008

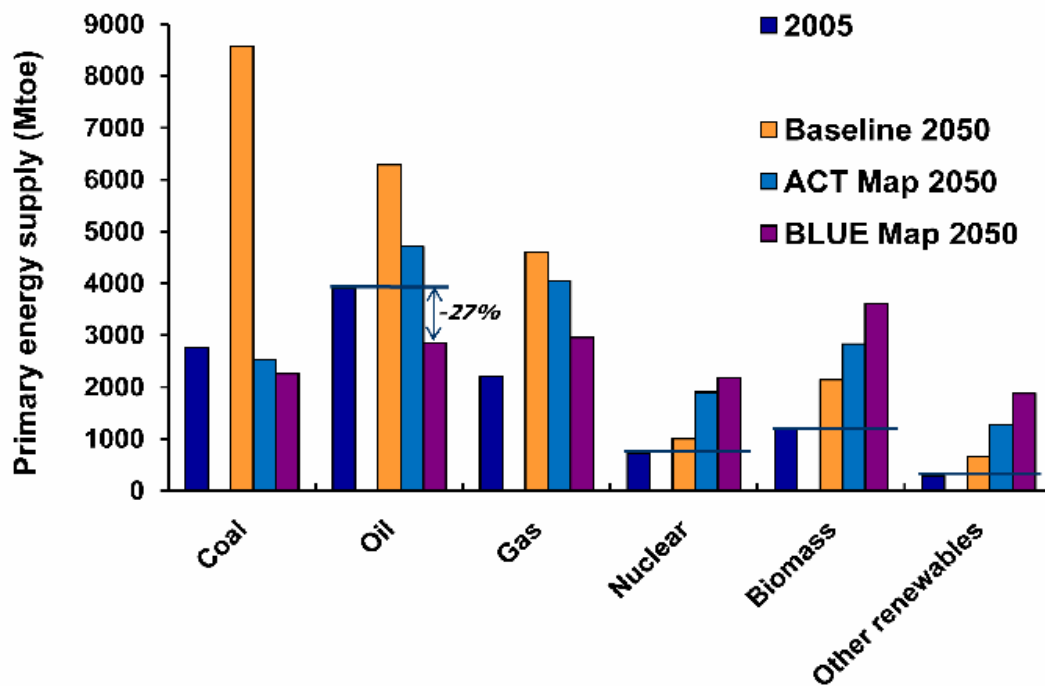
Solo nelle ultimi 20 anni, conseguentemente alla presa di coscienza dei paesi industrializzati riguardo all'eventuale esaurimento delle fonti fossili ed

all'instabilità politica dei paesi fornitori, si è cominciato a cercare valide alternative di modo consistente. La International Energy Agency ha pubblicato l'*Energy Technology Perspective 2008*, all'interno del quale vengono studiate ed analizzate tre previsioni dello scenario energetico mondiale nel 2050: Basic, ACT e BLUE.

Basic rappresenta l'evoluzione prevista dal World Energy Outlook 2007(WEO 2007), che ipotizza un tasso di crescita della domanda di energia pari a 1,8% annuo.

ACT è l'analisi di uno scenario in cui si prevede una quantità totale di emissioni di CO₂ previste per il 2050 pari a quelle del 2005; BLUE è invece lo scenario ben più ottimista che prevede per il 2050 una riduzione delle emissioni pari al 50%. All'interno di tale elaborato sono presentate alcune stime su come si ripartirà la produzione di energia nei prossimi anni.

I grafici a seguire mettono in evidenza il ruolo fondamentale delle fonti rinnovabili nella riduzione delle emissioni di CO₂ nei prossimi cinquant'anni.



Transport sector accounts for 78% of oil savings

Figura 2: quantità di energia fornita da ciascun tipo di fonte considerato, i colori rappresentano i diversi tipi di previsione effettuati.

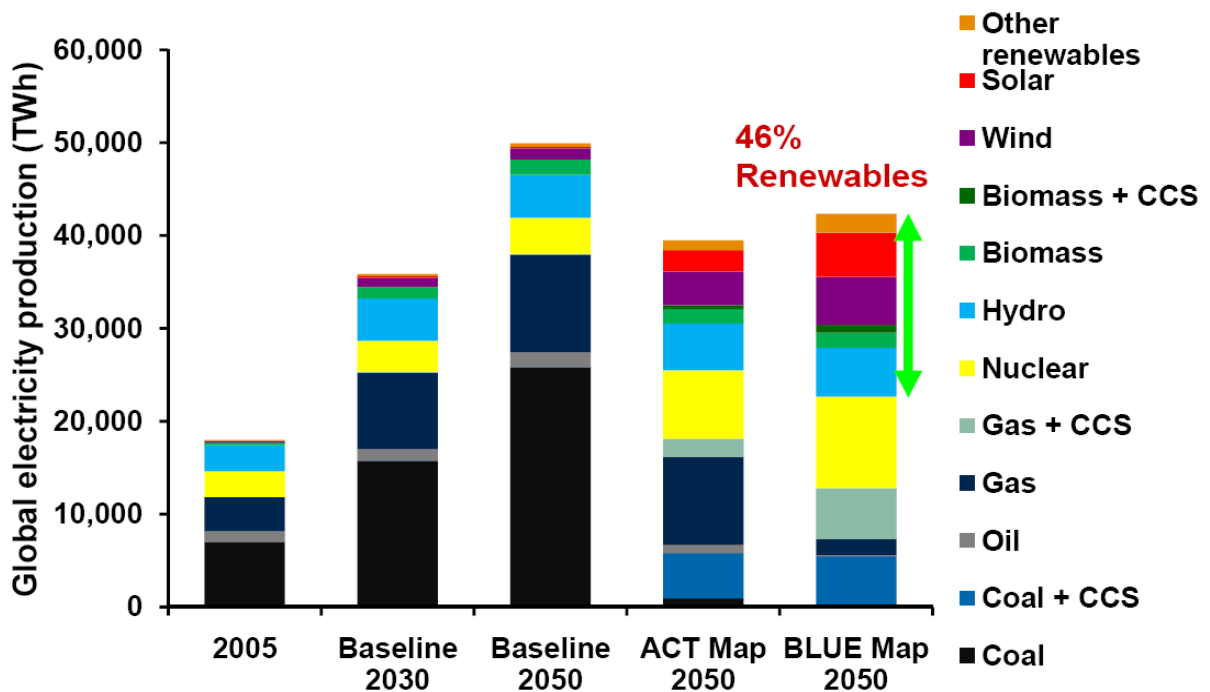


Figura 3bis: quantità di energia elettrica necessaria in futuro a seconda della previsione utilizzata. I colori rappresentano il tipo di energia utilizzata.

Il relativo “ritardo” della ricerca nel vasto e complesso campo delle energie rinnovabili ha fatto sì che fino ad ora si tratti principalmente di forme di energia che richiedono un notevole impegno tecnologico, e di conseguenza economico, per far sì che il processo di conversione in energia elettrica abbia un rendimento sufficientemente elevato.

Tale concetto risulta veritiero sia per le fonti rinnovabili il cui sfruttamento è già consolidato, quali l’energia solare, l’energia eolica e l’energia geotermica, sia per quelle il cui utilizzo è ancora in fase di studio, quali l’energia immagazzinata negli oceani e quella ricavata dalle biomasse.

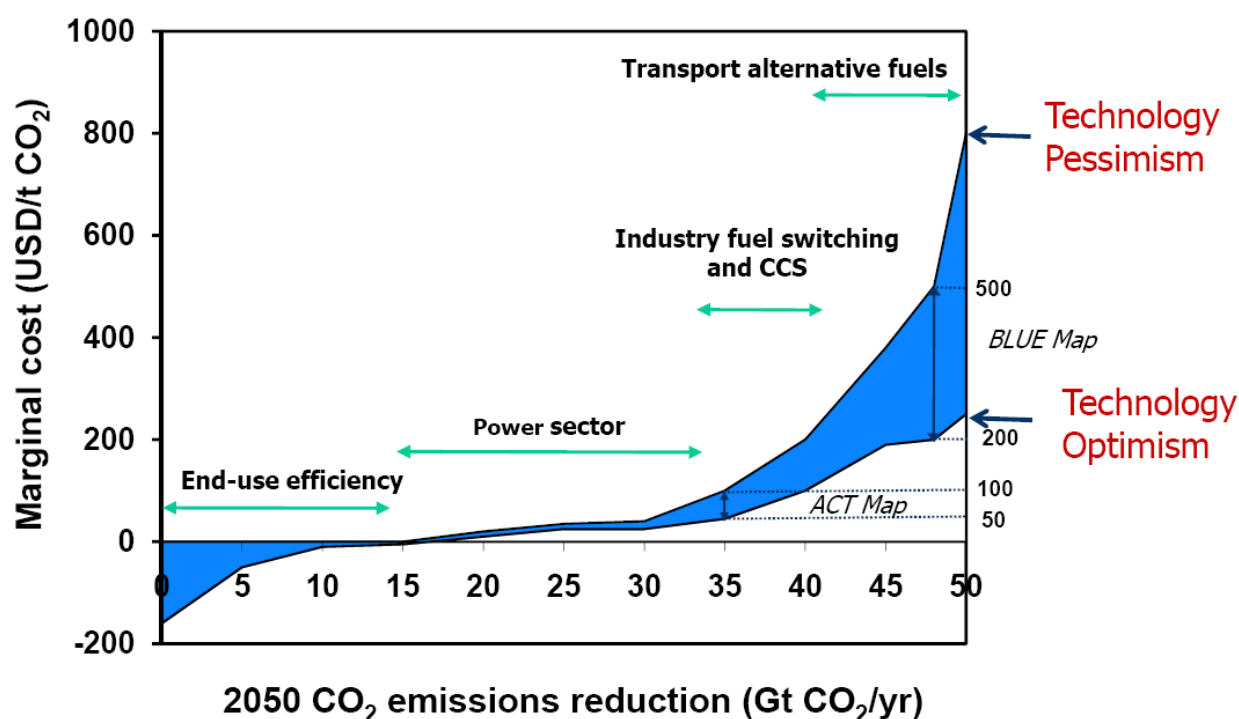


Figura 3: grafico dell'andamento dei costi relativi alla riduzione della produzione di CO₂

Si noti come nel grafico messo a disposizione sempre dalla IEA, la fascia relativa ai biocombustibili per il trasporto rappresenta la parte più consistente dal punto di vista economico.

La grande potenzialità delle centrali termoelettriche ed il loro ottimo rapporto investimento-rendimento, fanno sì che l’unico aspetto critico dell’utilizzo di energia da fonti fossili sia concentrato nel trasporto; sia dal punto di vista dei costi che delle perdite di carico, fornire l’energia generata a luoghi isolati come ad esempio luoghi reconditi nel deserto del Sarah o ai Poli può risultare

estremamente complicato e costoso. È proprio in tali condizioni che le fonti di energia rinnovabili quali la fotovoltaica o l'eolica risultano la miglior soluzione non solo dal punto di vista ambientale ma anche dal punto di vista economico. È il concetto delle risorse energetiche cosiddette delocalizzate.

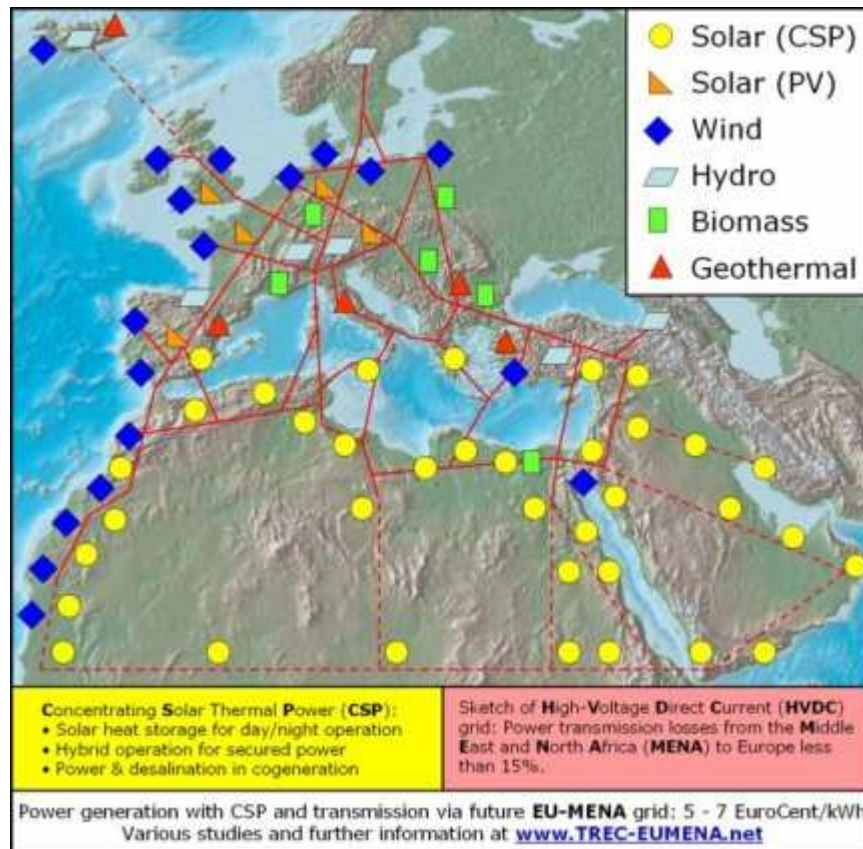


Figura 4 Localizzazione delle principali centrali di energia rinnovabile in Europa.

Oltre alla delocalizzazione dell'energia, un aspetto che può portare vantaggi all'utilizzo di forme di energia rinnovabili è la geografia del territorio; vi sono zone che per ragioni geografiche forniscono materie prime a basso costo. Un ottimo esempio può essere considerato, in Italia, quello dell'Alto Adige; in questa zona infatti son già attive 63 centrali termoelettriche a biomassa di tipo legnoso che forniscono attualmente 350 MWh (occorre bruciare circa 93 t di cippato per produrre tale quantitativo di energia [30]). Dato l'elevato tasso di rimboschimento naturale annuo è possibile generare tale energia senza alcuna conseguenza a livello ambientale. Michl Laimer, l'assessore all'ambiente e all'energia della provincia autonoma di Bolzano, ha affermato che, per il 2020, saranno incrementate notevolmente le potenzialità produttive di energia pulita; ciò sarà possibile grazie a nuove coltivazioni boschive con fine ultimo proprio

quello di fornire il materiale lignocellulosico necessario alla generazione di energia.

Gli scarti industriali o agricoli e l'incredibile quantità di rifiuti urbani prodotti al giorno d'oggi rappresentano un problema rilevante in Stati che come l'Italia hanno difficoltà nell'istituire nuove aree di discarica. Qualsiasi processo in grado di valorizzare tali scarti per produrre energia risulta conveniente a livello ambientale. In Italia, seppur si faticò a raggiungere un rendimento economico paragonabile a quello del petrolio. La presenza di sussidi statali ha incentivato la creazione di impianti di incenerimento rifiuti ed è servita come stimolo e spinta per la ricerca in nuove tecniche di valorizzazione. Da ricordare inoltre che in termini di legge i "rifiuti" non sono in nessun caso considerabili "fonti rinnovabili".

Inoltre, in previsione dell'eventuale esaurimento del petrolio le grandi compagnie petrolifere stanno sviluppando nuove tecnologie che permettano di sfruttare risorse fino ad oggi irraggiungibili. Un esempio è la Petrobras Brasiliana che sta sviluppando un nuovo processo di estrazione del petrolio presente a largo delle coste brasiliane, nella zona di Santos. Oltre ai 90 metri di profondità del mare, si dovrà scavare per 900 metri attraverso una crosta di sale che risulta molto problematica dal punto di vista della corrosione ed uno strato di rocce carbonatate; la situazione rappresenta una sfida senza precedenti non per la profondità dei pozzi ma per la criticità della geologia del territorio. Si prevede che per il 2016 saranno attivi ben 26 pozzi.

Al di là delle ricerche per ampliare le risorse di fonti fossili accessibili, il più grande passo che si sta cercando di compiere è quello di diversificare le fonti energetiche dando spazio alle rinnovabili. Esse rappresentano una sfida dal punto di vista tecnologico, ma allo stesso tempo sono l'unica soluzione alle problematiche ambientali mondiali.

3.1 Fonti non rinnovabili

Le fonti non rinnovabili includono i combustibili fossili solidi, liquidi e gassosi che si sono formati in lunghi lassi di tempo per lenta trasformazione di materiali organici in strati più o meno profondi della crosta terrestre. Inoltre sono inclusi in tali fonti i combustibili fissili, fonte primaria per la produzione di energia nucleare.

Ai fossili appartengono carbon fossile, petrolio e gas naturale; ai fissili, l'uranio e il torio.

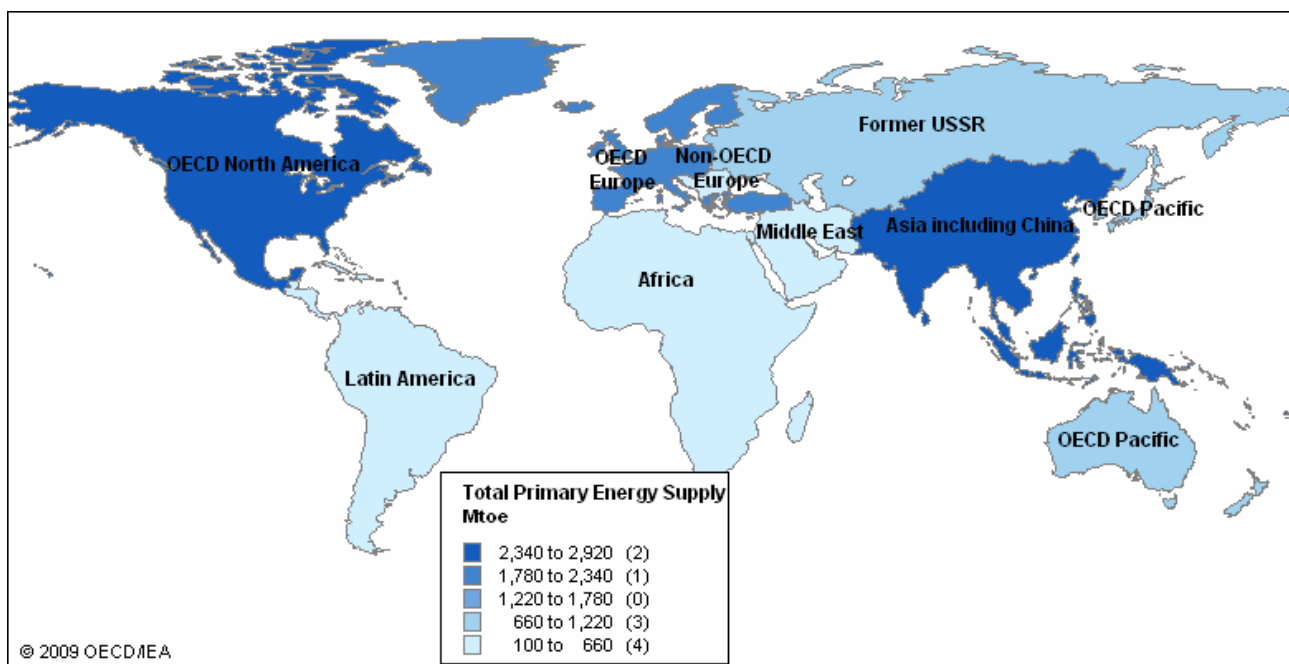


Figura 5: Fabbisogno totale di energia nel mondo 2006: Produzione locale + importazioni - esportazioni - bunker marini internazionali ± quantità immagazzinate

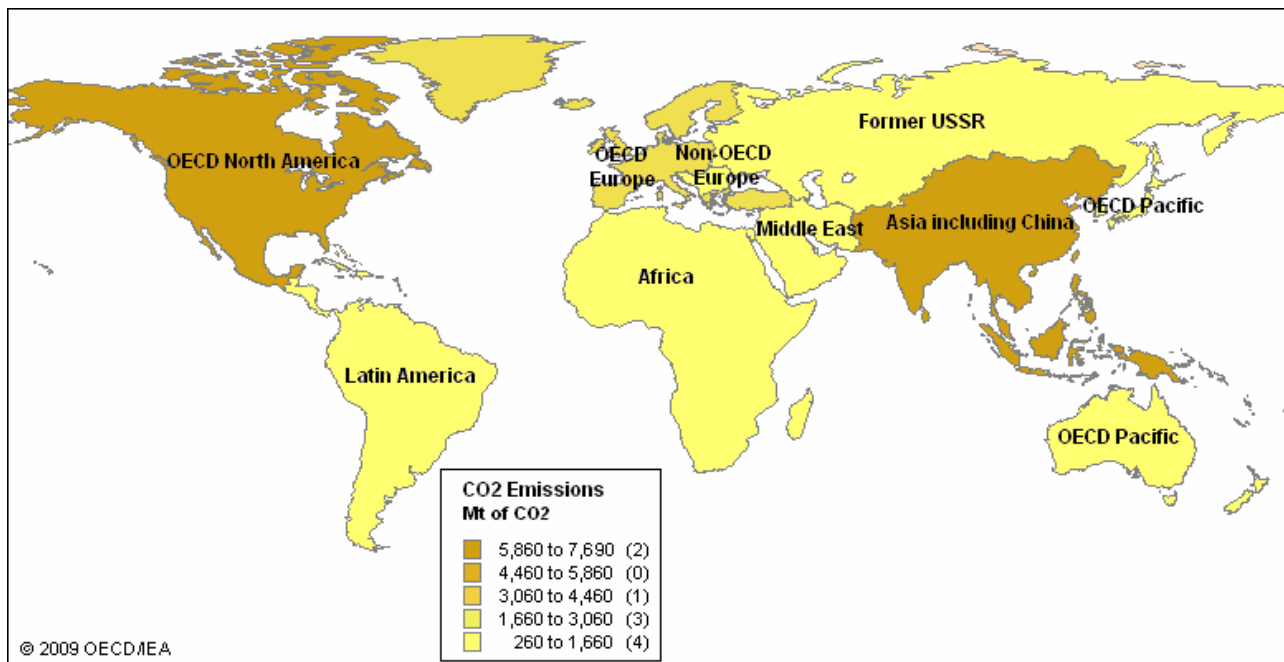
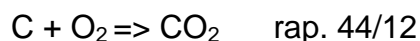


Figura 6: emissioni di anidride carbonica calcolate usando i dati a disposizione della IEA ed elaborati con il metodo Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, IPCC/OECD/IEA Paris, 1997.

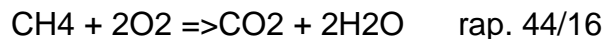
In seguito si riportano le reazioni di combustione ed il rapporto dei pesi molecolari fra prodotti e reagenti:

Si noti come la quantità di energia consumata sia strettamente legata alla quantità di emissioni di CO₂ equivalenti. Fonte: International Energy Agency.

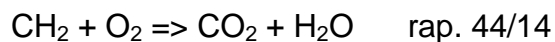
Equazione 1: reazione di combustione del carbone



Equazione 2: reazione di combustione del metano



Equazione 3: reazione di combustione di idrocarburi pesanti:



3.1.1 *Fonti non rinnovabili di origine fossile*

Petrolio e gas naturale non sono equamente ripartiti sulla superficie terrestre; il carbone invece è più abbondante e diffuso più uniformemente, tanto da poter continuare a soddisfare il bisogno energetico si stima ancora per qualche secolo.

Il problema del carbone è strettamente legato alla questione ambientale; emette delle quantità di anidride carbonica generate dalla sua combustione che, a parità di peso, sono superiori a quelle prodotte dal petrolio o dal gas naturale e non è considerato generalmente una fonte “pulita”. La combustione del carbone infatti presenta un ulteriore problema, ritenuto anche più dannoso di dell’emissione di CO₂, che è la percentuale di zolfo in esso contenuta, più o meno elevata in funzione del tipo di carbone preso in considerazione, con la conseguenza di presentare forti emissioni di SO_x (SO₂ e SO₃) che quando presenti in atmosfera in misura elevata, possono dar luogo alle cosiddette piogge acide² particolarmente dannose per l’ambiente.

A seconda dei giacimenti, esistono tuttavia differenze significative nelle caratteristiche fisico chimiche dei combustibili fossili: ad esempio il petrolio estratto in Messico ha una frazione molto pesante mentre quello estratto in Arabia Saudita risulta essere molto più leggero, in funzione dell’utilizzo che se ne voglia fare può risultare più appropriato l’uno o l’altro (nel caso della produzione di combustibili il petrolio saudita risulta avere rese molto più elevate). Per quanto riguarda il gas naturale, la composizione e dunque i prodotti della combustione sono differenti; quello estratto ad esempio dal giacimento che si trova a Groninga, nei Paesi Bassi, contiene meno dell’1% di biossido di carbonio mentre quello del giacimento di Krahnberg, in Germania, ne contiene il 53% e quello di Catania, in Italia, il 49%.

Anche il contenuto energetico è differente per ciascun tipo di combustibile fossile: 1 kg di petrolio produce per combustione 10.000 kilocalorie (kcal), mentre la stessa quantità di carbone fornisce 7000 kcal e con 0,7kg di gas naturale (a secco) si ottengono circa 8000 kcal.

² L’SO₂ è molto irritante per gli occhi, la gola e le vie respiratorie: inoltre amplifica i suoi effetti tossici in presenza di nebbia, in quanto è facilmente solubile nelle piccole gocce d’acqua. Le gocce più piccole possono arrivare fino in profondità nell’apparato polmonare causando bronco-costrizione, irritazione bronchiale e bronchite acuta. Inoltre in atmosfera, attraverso reazioni con l’Ossigeno e le molecole d’acqua, causa le cosiddette “piogge acide”, precipitazioni piovose con una componente acida significativa, responsabili di danni a coperture boschive ed a monumenti con effetti tossici sui vegetali e di acidificazione dei corpi idrici, in particolare a debole ricambio, con conseguente compromissione della vita acquatica. Fonte: Arpa Piemonte.

La misura standard con cui si confrontano le risorse energetiche, di qualsiasi tipo di fonte si tratti, è la “tep”, la tonnellata equivalente di petrolio. Una tonnellata di petrolio equivale a 1,5 ton di carbone o a 1219 m³ di gas naturale. Una “tep” equivale alla produzione di circa 3500/4000 kWh di energia elettrica, in funzione del rendimento del processo considerato.

Attualmente, l'utilizzo dei combustibili fossili nel mondo è così ripartito: il 44% del totale è rappresentato da petrolio, il 31% dal carbone e il 25% da gas naturale.

3.1.2 *Fonti non rinnovabili di origine minerale*

L'uranio si trova in numerose rocce, ma in quantità limitate. Il suo trattamento al fine di ottenere combustibile atto a sostenere i processi di fissione nucleare è estremamente costoso e potenzialmente pericoloso per l'ambiente e per l'uomo. Per questo motivo, dopo un breve entusiasmo dilagato intorno agli anni Settanta, seguito dalla catastrofe di Chernobyl, l'energia nucleare non è più considerata come l'alternativa energetica del prossimo millennio alle risorse tradizionali, nonostante negli ultimi anni sia tornata nuovamente in auge, almeno come uno delle fonti possibili, da non demonizzare.. L'uranio è inoltre la risorsa meno presente sul pianeta; se fosse l'unica forma di energia disponibile, utilizzando i processi tradizionali delle centrali nucleari, si esaurirebbe in soli 25 anni.

Ciò che maggiormente preoccupa gli studiosi dei nostri tempi non è solo l'inquinamento ma anche il possibile esaurimento delle risorse non rinnovabili accessibili attraverso le tecnologie convenzionali. La causa è relativa all'esponenziale aumento dei consumi senza la sufficiente consapevolezza delle conseguenze a cui si va incontro. Fino alla decade passata solo l'8% della popolazione aveva un tenore di vita elevato, caratterizzato da grandi dispendi di energia. Tale numero sta crescendo in maniera esponenziale. Stati come la Cina e l'India, ma anche lo stesso Brasile, seppur in maniera più graduale, sono protagonisti di uno sviluppo frenetico ed apparentemente inarrestabile, che è destinato ad incidere fortemente sulle politiche energetiche mondiali e provocare gravi danni ambientali.

Secondo i dati forniti dalla IEA nel *World Energy Outlook 2007* la domanda complessiva di energia nel mondo crescerà del 55 % entro il 2030, e il 45 % della crescita sarà dovuta solo a Cina ed India.

3.2 Fonti rinnovabili

Le fonti di energia rinnovabili (disponibili in quantità non limitate) sono state fra le prime a essere sfruttate dall'uomo. Sono tali, ad esempio, la legna, o più in generale le biomasse; l'energia idraulica, già oggi utilizzata nelle centrali idroelettriche; l'energia eolica, fornita dal vento; l'energia degli oceani, che si ricava attraverso il recupero del calore immagazzinato nelle masse d'acqua; l'energia solare, trasformabile in calore o in energia elettrica.

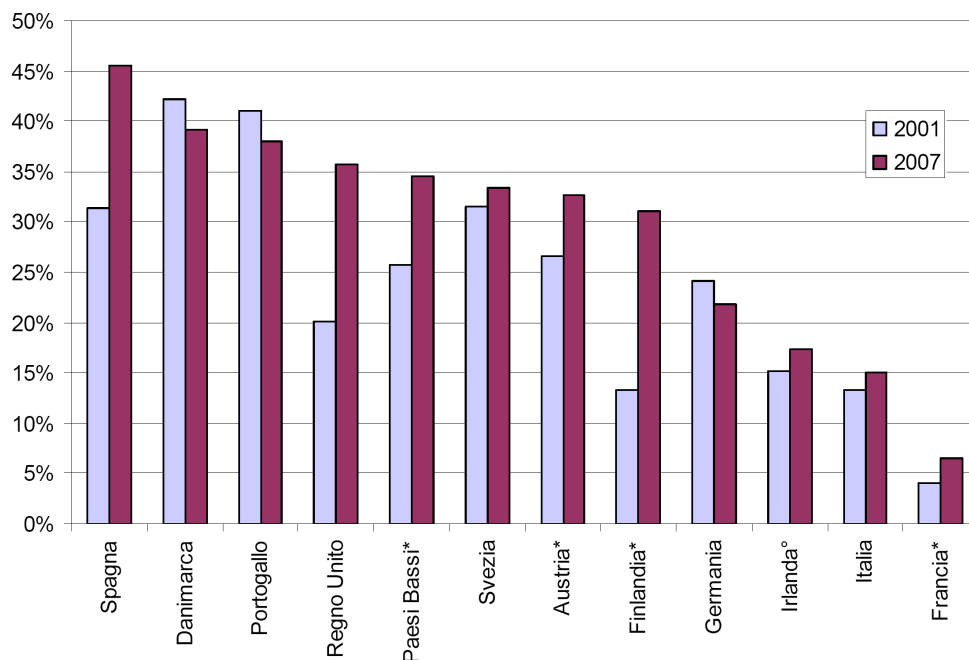
Per lungo tempo le biomasse sono state i principali combustibili a disposizione per l'essere umano. Per millenni la legna da ardere e le biomasse hanno rappresentato, i combustibili principali per gli esseri umani. Negli ultimi 150 anni n è stato consumato circa un quantitativo pari a 30 Gtep (un Gtep corrisponde a un miliardo di tonnellate di petrolio equivalente). L'energia idrica ha rappresentato la seconda più ampia scorta di energia rinnovabile, con una produzione equivalente ad un consumo di circa 13 Gtep nello stesso periodo di tempo. La biomassa fornisce ancora circa il 12% dell'energia utilizzata nel mondo e più del 35% di quella impiegata nei paesi in via di sviluppo.

Le fonti di energia considerate rinnovabili, offrono il grande vantaggio rispetto ai combustibili fossili di produrre emissioni gassose dannose all'uomo e all'ambiente nulle o decisamente inferiori. Ossidi di zolfo, particelle in sospensione, benzene e composti organici volatili, oltre ai gas che contribuiscono all'effetto serra (tra cui biossido di carbonio, metano e ossido di azoto), sono sub-prodotti nocivi tipici dell'utilizzo dei combustibili fossili; nel caso di sfruttamento di forme di energia rinnovabili tali emissioni sono praticamente nulle o compensate all'interno del ciclo di vita della fonte stessa(come nel caso dei biocombustibili).

Nel corso della conferenza mondiale sul clima del 1997, tenutasi a Kyoto, in Giappone, è stato firmato un accordo storico per la riduzione delle emissioni dei gas serra, che può significare un decisivo aumento dello sfruttamento delle fonti rinnovabili. Attualmente coprono ancora una percentuale ancora troppo piccola del fabbisogno totale di energia primaria, pari al 20% circa.

Nel grafico presente in seguito, fornito dal rapporto ENEA 2008, è chiara l'evoluzione degli investimenti pubblici in materia di energie rinnovabili in percentuale della spesa pubblica riguardante tutte le forme di energia.

Figura 6.6 - Evoluzione della spesa pubblica in R&S nelle Rinnovabili in percentuale della spesa pubblica in R&S energetica



*2001-2006; °2002-2007

Fonte: Elaborazioni ENEA su dati AIE

Figura 7: evoluzione della spesa pubblica in R&S nelle Rinnovabili in percentuale della spesa pubblica in R&S energetica

Si noti come inaspettatamente risulta essere la Spagna il paese che attualmente sembra credere di più nella reale possibilità di dare un certo peso alla generazione di energia a partire da fonti rinnovabili. Sono invece rispettivamente in penultima e ultima posizione l'Italia e la Francia, dimostrando la scarsa attenzione prestata a questo argomento nel nostro paese e lo scarso interesse della Francia, primo produttore europeo di energia elettrica dal Nucleare.

3.2.1 *Impatto socio-ambientale delle risorse rinnovabili*

Quando si pensa ad una nuova forma di energia non si può assolutamente trascurare dall'impatto ambientale che essa possa comportare. Per impatto ambientale non si intende solo l'immissione di sostanze nocive all'atmosfera o all'ambiente, quindi conseguenze di tipo materiale, si intendono anche tutti i

possibili impatti sociali che possono scaturire da una decisione che spesso viene presa semplicemente su basi numeriche.

Purtroppo non è possibile quantificare a livello numerico la rilevanza dell'impatto sociale, che rimane una valutazione molto variabile a seconda dei punti di vista e spesso di tipo assolutamente soggettivo. Per questa ragione saranno sempre più necessari, man mano che si svilupperanno queste tematiche, studi dinamici che prendano in considerazione la totalità degli aspetti relativi ai progetti in esame.

Nonostante gli sforzi che possono essere impiegati, è comunque molto difficile riuscire a soddisfare la domanda energetica mondiale, in costante crecimiento, senza produrre impatti che possano essere di tipo ambientale e/o sociale.

“Le misure dell’Occidente per contrastare i cambiamenti climatici rischiano di essere devastanti per le popolazioni che ancora seguono uno stile di vita tribale”. Così afferma Survival International, l’unica associazione riconosciuta a livello interinternazionale, che protegge i diritti dei popoli tribali.

La bocciatura di Survival International non si riferisce alla diminuzione delle emissioni di gas serra che rimane un punto fermo nell’attuale lotta contro l’elevato impatto ambientale dello sviluppo dei consumi energetici. Tutti gli altri aspetti e tutte le altre strade finora percorse per mitigare l’impatto delle attività umane sul clima escono dall’analisi di Survival International semplicemente stroncate: i biocarburanti, le centrali idroelettriche e il tentativo di preservare le foreste attraverso il mercato delle emissioni starebbero rovinando la vita alle tribù dal Brasile al Borneo. Il rapporto pubblicato si intitola “*The most inconvenient truth of all. Climate change and indigenous people*”: e riporta tutta una serie di considerazioni che, se pure chiaramente estremizzate, non possono assolutamente essere trascurate. A tale proposito è stato recentemente particolarmente evidente l’eco della “*Una scomoda verità*”, opera cinematografica di Al Gore che ha risvegliato l’attenzione degli Stati Uniti sui cambiamenti climatici.

I biocarburanti spesso vengono presentati come sostituti “ecologici” del petrolio. Ma secondo il rapporto di Survival International i biocarburanti verrebbero ricavati per la maggior parte da vegetali coltivati nei territori ancestrali di popoli indigeni dai quali essi sarebbero costretti ad andarsene.

Dal punto di vista professionale bisogna ammettere che tale affermazione risulta piuttosto catastrofica; in Brasile le terre adibite alla coltivazione di canna da zucchero per la produzione di etanolo rappresentano comunque una piccola parte delle terre coltivabili.

Il rapporto, per altro, non prende in considerazioni altri spiacevoli impatti relativi ai biocarburanti, a cominciare dal fatto che possano avere un ruolo importante nel rincaro del prezzo del cibo. Si limita a constatare che se l'espansione dei biocarburanti continuerà come previsto, milioni di indigeni possono perdere la loro terra e i loro mezzi di sostentamento.

Un'altra forma di energia messa sotto inchiesta dal rapporto è quella idroelettrica. Si tratta di generare elettricità attraverso una turbina azionata dall'acqua. Niente uso di combustibili fossili, niente gas serra. Ma per piegare l'acqua alla produzione di energia idroelettrica ci vogliono dighe e laghi artificiali. Di nuovo, le conseguenze sono centinaia di tribù scacciate dalle loro terre d'origine o attività lavorative minacciate dalle mutazioni dell'ecosistema.

Proprio in Brasile, in seguito a numerose proteste frutto di valutazioni ambientali dai risultati devastanti, è stato ridimensionato il progetto che prevedeva la costruzione della



Figura 8: localizzazione geografica della centrale idroelettrica di Belo Monte

seconda centrale idroelettrica più grande (in termini di capacità) al mondo: la centrale di Belo Monte.

Grazie alla nuova soluzione pensata dai progettisti si è riusciti a minimizzare l'area allagata. Sono state costruite due dighe in successione invece di una evitando così l'allagamento e l'inevitabile dislocamento di due intere città, con una perdita di potenza generata pari solo al 10 % rispetto al progetto originario (si è perso però nell'immagazzinamento di energia dato che la riserva di acqua accumulata sarà notevolmente inferiore).

Un altro aspetto normalizzato dalla conferenza di Kyoto che possa definirsi un'arma a doppio taglio è il "carbon offset", il mercato delle emissioni di gas effetto serra.

Per quanto possa essere un buon mezzo per ridurre l'impatto ambientale, rappresenta un ulteriore problema per le popolazioni indigene. Un'azienda, per rimediare alle sue emissioni di anidride carbonica, paga per preservare integralmente una foresta che assorbe anidride carbonica. Ma agli indigeni non viene più concesso di toccare neanche con un dito la foresta da cui prima traevano in modo sostenibile il loro sostentamento. Inoltre nella maggior parte dei casi le foreste che vengono vendute non sono nient'altro che foreste già esistenti e che quindi non cambiano lo status quo delle cose.

Al di là della correttezza o meno delle affermazioni del rapporto di Survival International, si nota quanto al giorno d'oggi sia importante effettuare una corretta valutazione ambientale; risulta essere una condizione *sine qua non*, risulterebbe inadeguato avanzare nella ricerca così come nell'applicazione di eventuali progetti su scala industriale.

La ricerca di sostenibilità sarà protagonista nei prossimi decenni, e per quanto sia difficile, risulterà comunque necessario ricercare e mettere a punto una nuova generazione di fonti rinnovabili il cui impatto ambientale e sociale sia il minimo possibile. Si dovrà comunque avere la coscienza che anche il mantenimento dello "status quo" spesso ha un impatto negativo sulle condizioni di vita di larghi strati della popolazione mondiale.

4 I combustibili.

Per combustibile, secondo la definizione lessicale, si intende una sostanza che in presenza di un comburente, sia in grado di dar luogo a reazioni di combustione con una forte generazione di calore. Un articolo pubblicato dalla Nasa nel 2005: "Fuel", definisce in maniera maggiormente pratica il termine combustibile come "una sostanza in grado di generare energia". Tali definizioni ampliano decisamente i materiali considerabili come combustibili.

In funzione delle caratteristiche con cui si presentano in condizioni standard (298°k, 1atm), i combustibili possono essere solidi liquidi o gassosi. Si possono inoltre distinguere tre categorie che dipendono dalla natura del combustibile che può essere naturale, artificiale o sintetica.

I combustibili naturali sono quelli già presenti sul pianeta, per cui sono sufficienti dei trattamenti di tipo fisico ai fini dell'utilizzo diretto come combustibili: fra questi le varie frazioni del petrolio, il legno, l'antracite, il carbon fossile l'uranio, etc..

Vengono definiti combustibili artificiali i legni e i carboni trattati fisicamente o chimicamente, in modo tale da trasformare la loro costituzione, oppure trattati meccanicamente in modo da modificare la loro forma. A questa categoria appartengono il carbone di legna, il carbon coke e infine gli agglomerati di carbone che vengono ottenuti dal trattamento meccanico dei carboni fossili.

Per combustibili sintetici invece si intendono quei combustibili che sono prodotti con processi gas-to-liquid, coal-to-liquid o biomass-to-liquid, grazie ad esempio alle tecnologie Fischer-Tropsch, a partire dal gas naturale (GTL), dal carbone (CTL) o dalle biomasse. (BTL).

Già sperimentato e largamente usato dalla Germania nella seconda guerra mondiale, questo tipo di processo è, oggi, usato in Sudafrica per produrre la maggior parte del gasolio del paese. Grazie alle tecniche di cattura della CO₂, questi combustibili risultano, inoltre, compatibili con le più recenti preoccupazioni ambientali e, soprattutto, possono sfruttare l'attuale rete di distribuzione e i modelli automobilistici ora in uso.

Il più sviluppato è al momento il GTL mentre il BTL è il più promettente per quanto riguarda la riduzione delle emissioni di gas-serra, e per questo sarà quello

più approfondito nel corso del seguente studio, mentre il CTL rimane il processo più adatto a paesi dotati di grandi giacimenti di carbone, come il Sudafrica, la Cina e gli USA. Gli esperti prevedono che un uso massiccio di queste tecnologie potrebbe portare Cina e Stati Uniti a coprire fino al 2% della domanda mondiale di gasolio entro il 2020.

Le grandi case automobilistiche, Daimler-Chrysler in testa, stanno investendo nello sviluppo di questi carburanti, così come le grandi compagnie come la Shell o la Petrobras.

Per completezza si ricorda che sono “potenzialmente generatori di energia” e quindi “combustibili, anche i materiali fissili che si definiscono più propriamente combustibili nucleari, quelle sostanze cioè che possono produrre calore mediante reazioni nucleari. Questi prodotti non verranno trattati nel seguito, stante anche l’attuale controversa opinione degli studiosi a carattere mondiale circa il ruolo che l’energia da materiali fissili potrà avere nel futuro della produzione mondiale di energia.

I combustibili sono usati come fonte di riscaldamento, per produrre vapore (usato a sua volta come fonte di riscaldamento o come fonte di energia) e soprattutto per alimentare i motori a combustione interna: in quest’ultimo caso prendono il nome di carburanti.

L’efficienza di un combustibile è comunemente espressa mediante una grandezza, detta potere calorifico, che misura la quantità di energia termica (o calore) rilasciata da una determinata massa di combustibile che brucia in condizioni standard. Talvolta si distingue fra potere calorifico superiore, che rappresenta tutta l’energia termica sviluppata nella combustione, e potere calorifico inferiore, che è la differenza fra il calore totale liberato e quello perduto nel processo di evaporazione dell’acqua prodotta durante la reazione. Agli effetti pratici si considera solo il potere calorifico inferiore.

Per convenzione, l’unità di misura del potere calorifico è il joule per chilogrammo (J/kg) per i combustibili solidi e liquidi, e il joule per metro cubo (J/m³) per quelli gassosi. Fra i combustibili solidi e liquidi, i materiali dotati del maggiore potere calorifico sono l’antracite, che sviluppa 35 milioni di J/kg e la

benzina, con 48 milioni di J/kg, mentre fra i combustibili gassosi spicca l'acetilene, con 55 milioni di J/m³.

Nel caso della classificazione dei carburanti, le caratteristiche che ne contraddistinguono le qualità sono maggiormente legate al funzionamento del motore che alimentano. In particolare nel caso di benzina, etanolo e gas uno dei parametri più importanti per la misura della qualità è il numero di ottano e nel caso del gasolio in numero di cetano.

Il numero di ottano è un indice della resistenza alla detonazione a seguito di compressione (o "caratteristica antidetonante") di un combustibile. La scala dei valori varia da 0 a oltre 100³. La benzina normalmente in commercio per auto ha numero di ottano di circa 95 (metodo Research) e 85 (metodo Motor). Più in particolare, la benzina per auto "normale", ormai non più in uso nella gran parte dei paesi più avanzati, presenta un numero di ottano pari a circa 84-86, mentre la benzina cosiddetta "super" ha un numero di ottano di circa 95 sebbene attualmente diverse compagnie petrolifere propongono anche carburanti con numero di ottano 98-101. Più è elevato il numero di ottano, più è alto il potere antidetonante del carburante. Ciò significa che c'è meno rischio di inneschi per la semplice compressione provocata dal pistone e quindi che, per accendersi, non necessiti della scintilla delle candele.

Per quanto riguarda i motori diesel invece, il numero di cetano è un indicatore del comportamento in fase di accensione dei combustibili (gasolio e biodiesel), ed è un indice proprio della capacità del carburante di "accendersi" quando sottoposto a semplice compressione, in assenza di innesco specifico come quello prodotto dalle candele nei motori a benzina od a gas.

Il suo valore viene calcolato sperimentalmente rilevando il ritardo tra la fase di iniezione e quella di accensione⁴. L'indice esprime quindi la "prontezza" del combustibile all'accensione, dove maggiore è il numero di cetano, maggiore sarà tale prontezza.

³ Per convenzione si attribuisce al n-eptano un numero di ottano pari a 0[1] e all'isooctano (C₈H₁₈, 2,4,4-trimetilpentano) un numero di ottano pari a 100

⁴ La scala di valori è relativa, al cetano (C₁₆H₃₄) si assegna un valore pari a 100,[1] ed al metilnaftene un valore pari a 0.

Le caratteristiche antidetonanti (numero di ottano) e quelle di accendibilità (numero di cetano) di un combustibile sono inversamente proporzionali. Per questo motivo il gasolio non può essere usato nei propulsori ad accensione comandata mentre la benzina sì.

Il gasolio ha normalmente valori del numero di cetano intorno a 50-52: per inciso si fa notare che un aumento del numero di cetano a 58 consentirebbe di diminuire il particolato del 20% ed i CO e HC nei gas di scarico dei motori diesel del 25%, ma su questo punto si tornerà in seguito.

5 I Biocombustibili

Si tratta di materiali ottenuti da produzioni agricole specifiche, da residui vegetali e da rifiuti organici di vario tipo, che evidenziano caratteristiche chimiche, fisiche, biologiche che attualmente risultano di elevato interesse dato che:

- sono ossigenati e la presenza di ossigeno nella loro composizione permette una forte riduzione degli inquinanti gassosi (in particolare monossido di carbonio) nelle emissioni in atmosfera in particolare dei motori endotermici che li utilizzano;
- la quantità di CO₂ conseguente alla combustione è compensata da quella assorbita dalla pianta durante la crescita;
- hanno un contenuto di zolfo decisamente basso (equivalente a una riduzione consistente di anidride solforosa nelle emissioni);
- sono biodegradabili (perché composti organici presenti in natura);
- hanno un contenuto energetico elevato, paragonabile a quello degli idrocarburi fossili;
- sono ottenuti dalle biomasse e, quindi, da una fonte rinnovabile con bilancio energetico decisamente favorevole.

La grande enfasi sui biocombustibili di prima generazione (tipicamente bioetanolo da colture zuccherino-amidacee e biodiesel da piante oleaginose) si è presto esaurita nella seconda metà del 2007 con un crollo degli investimenti a livello mondiale determinato in parte dal forte rialzo dei prezzi agricoli e in parte

dai problemi legati all'uso dei terreni agricoli e alla competizione con la produzione alimentare. Autorevoli organizzazioni internazionali (FAO) hanno espresso forti perplessità circa la sostenibilità di tali produzioni di biofuels anche sul piano della effettiva riduzione delle emissioni. L'attenzione si è quindi rapidamente spostata sui biocombustibili di seconda generazione: bioetanolo da processi di idrolisi enzimatica e fermentazione di materiali ligneo-cellulosici (residui agro-industriali e forestali, coltivazioni dedicate non-food, rifiuti urbani) o biodiesel da processi Fischer-Tropsch (biomass to liquid, BTL) e colture microalgali per la produzione sia di bioetanolo che di biodiesel (queste ultime indicate come tecnologie di terza generazione). Tali soluzioni non sono in competizione con la produzione agricola alimentare anche se possono comportare occupazione di territorio. I processi di 2° e 3° generazione richiedono fasi di trattamento aggiuntive della materia prima (es. idrolisi dei materiali cellulosici) e costi più elevati. Essi tuttavia associano spesso alla produzione primaria altri prodotti (es.: biopolimeri) e introducono la prospettiva di sviluppo delle bioraffinerie.

Mentre la ricerca affina i processi, diversi impianti dimostrativi sono già in esercizio o in fase di realizzazione con soglie di competitività con i prezzi petroliferi che si collocano tra 60 e 100 \$ per barile e costi di abbattimento nella fascia 10-20 €/tCO₂. La crisi economica e il ribasso dei prezzi petroliferi hanno prodotto un rallentamento delle realizzazioni dimostrative industriali.

L'obiettivo produttivo dell'U.E. nei confronti dei biocarburanti, definiti comunemente "di prima generazione" per distinguerli da altri ("di seconda generazione"), attualmente oggetto di ricerche e di sperimentazioni applicate, è preciso: entro il 2010 dovranno rappresentare il 5,75% del totale dei carburanti utilizzati (secondo la direttiva approvata nel 2007).

Si tratta di volumi considerevoli, poiché a fronte degli attuali consumi di carburanti, in Italia al 2010 si dovranno utilizzare 1,8 milioni di tonnellate di biodiesel e 1,02 milioni di tonnellate di bioetanolo.

Nel 2020 questa aliquota dovrà salire al 18% (calcolate entrambe sul potere calorifico). È realistico presumere che nel settore dei trasporti le fonti rinnovabili di energia saranno sostenute con un vigore molto maggiore rispetto al recente passato.

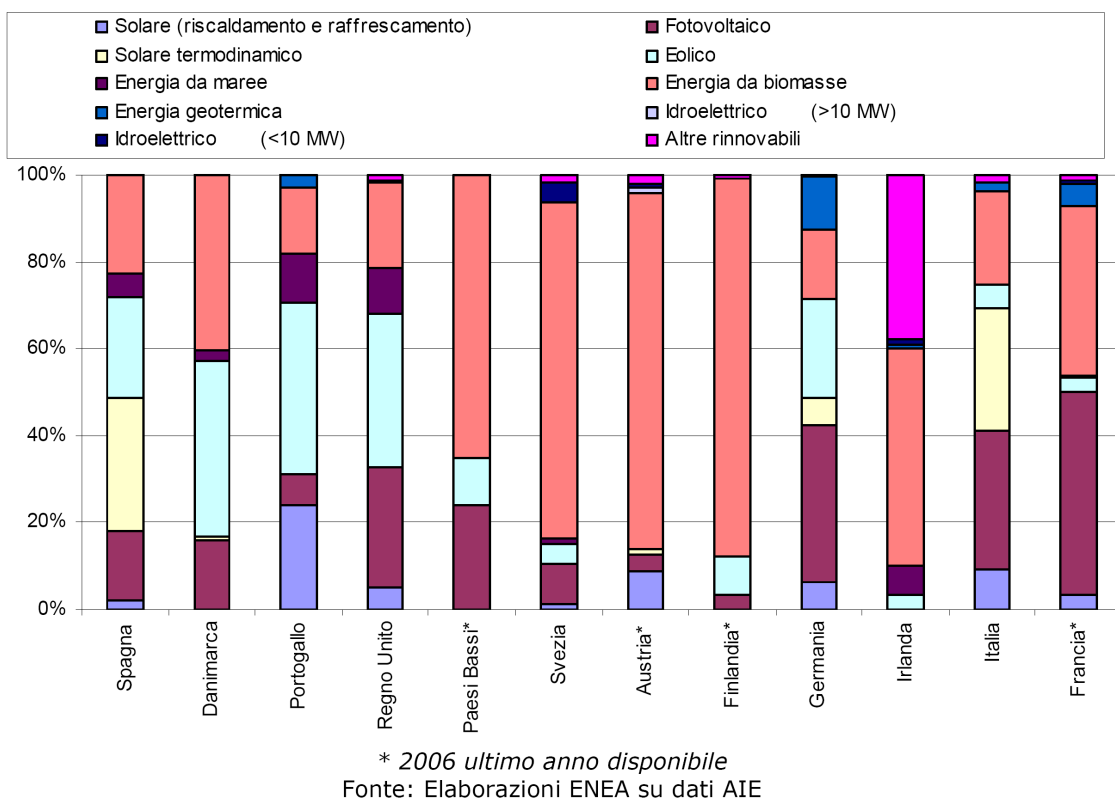


Figura 9: composizione della spesa pubblica in R&S (Ricerca e Sviluppo) nelle energie rinnovabili

Si noti come in funzione della spesa pubblica si possa affermare che la produzione di energia a partire da biomasse rappresenti un obiettivo comune a tutti gli stati dell'Unione Europea. Solo in Portogallo e Germania essa non raggiunge il 20 % del totale (l'Italia sfiora appena questo valore), ma è impressionante come in paesi come Austria Finlandia e Svezia si raggiungano percentuali comprese fra il 70 e il 90 % dell'investimento pubblico.

Si aprono, pertanto, nuovi scenari di opportunità produttive lungo tutte le filiere generative, poiché saranno interessati il comparto agrario, il settore agroindustriale e quello dei servizi; si delineano nuove figure professionali, anche di elevato livello tecnico e scientifico.

In seguito si traccia una mappa dei processi esistenti o possibili riguardo alla produzione di etanolo.

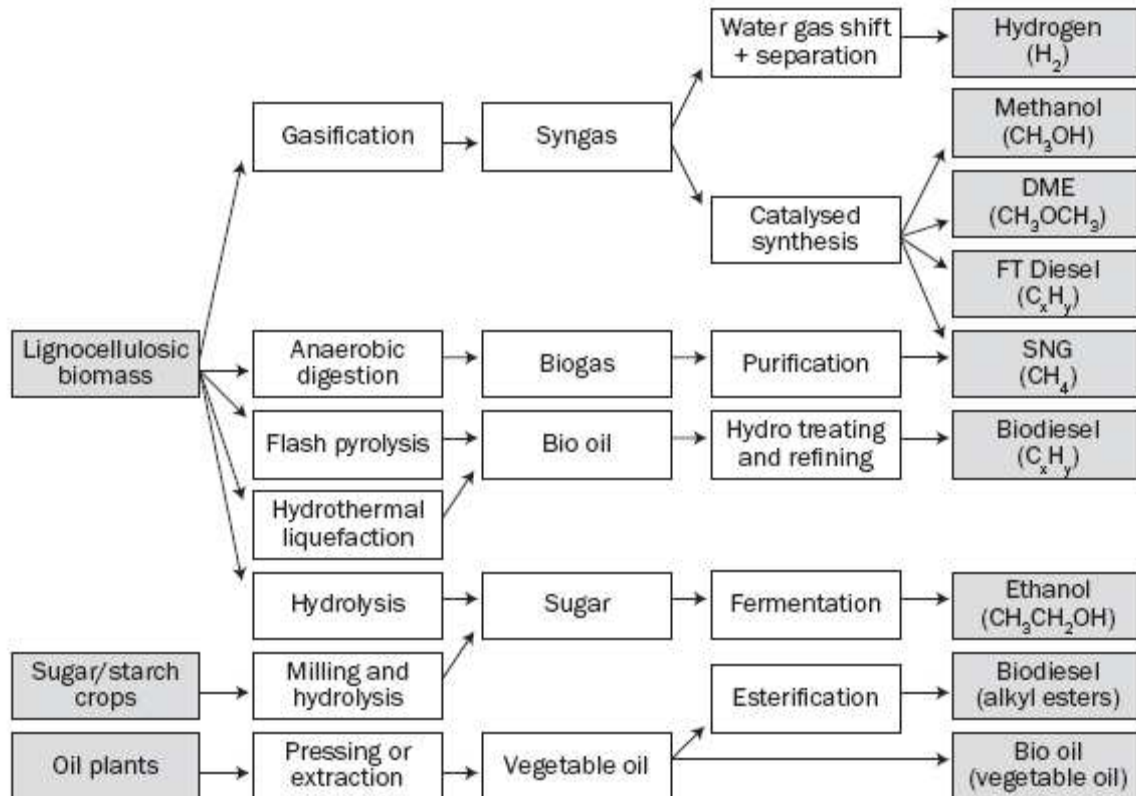


Figura 10: lista dei processi possibili o esistenti per la produzione di biocombustibili, (Hamenlinck and Faaij, 2006).

Questa schema risale al 2006; le possibilità che rappresentano le potenzialità maggiori sono i cosiddetti processi considerati di seconda generazione. Per il futuro si prevede che una combinazione degli stessi possa dar luogo a valide alternative ai combustibili di origine fossile. Un esempio è la combinazione di idrolisi di biomassa per separare la cellulosa e l'emicellulosa dalla lignina; attraverso la fermentazione delle prime due si produce etanolo mentre dalla gassificazione della lignina si produce il biosyngas, materia prima della sintesi di Fischer Troopsh nella produzione di biodiesel.

5.1 Biocombustibili di prima generazione

I combustibili di prima generazione sono prodotti a partire da zuccheri, amidi, olii vegetali e grassi animali attraverso processi ritenuti convenzionali.

I principali biocombustibili di prima generazione sono:

Il bioetanolo (alcol etilico), prodotto dai residui e dalle colture agricole, saccarifere, amidacee e ligno-cellulosiche;

gli oli vegetali, ottenuti dalla coltivazione di girasole, colza, soia e da altre colture oleaginose;

il biodiesel, quale prodotto della transesterificazione dei suddetti oli;

il biogas, combustibile gassoso ottenuto dalla fermentazione metanica dei residui zootecnici e vegetali e dai rifiuti organici.

La produzione di bioalcoli avviene principalmente per fermentazioni di zuccheri, principalmente amidi, i più diffusi nel mondo sono l'alcool idratato prodotto a partire dalla canna da zucchero e quello prodotto dal mais, diffusi rispettivamente in Brasile e Stati Uniti.

In quanto agli oli vegetali, i semi delle piante oleaginose vengono spremuti per ottenere un olio che viene successivamente trattato chimicamente per ottenere biodiesel.

I vantaggi di tali tipi di combustibili, come affermato nel paragrafo precedente, sono molteplici. La presenza di ossigeno fa sì che nella reazione di combustione sia favorita la formazione di anidride carbonica a scapito del ben più inquinante monossido di carbonio. Le emissioni di CO₂ sono inoltre compensate nel processo di fotosintesi della pianta nel corso della sua esistenza. Non meno importante è il fatto che le emissioni di SO_x sono praticamente nulle data la bassissima percentuale di zolfo presente nei vegetali di partenza.

Il quantitativo di gas serra emessi sembrerebbe ridotto alla generazione di NO_x durante la combustione. In realtà il bilancio delle emissioni relative all'utilizzo dei biocombustibili è un argomento molto più complesso. Numerosi studi ed in particolare uno effettuato dalla International Energy Agency⁵, dimostrano come

⁵ From 1st to 2nd generation Biofuel Technologies – An Overview of current industry and RD&D activities – Raphael Sims, Michael Taylor – IEA – November 2008.

solo il bioetanolo prodotto a partire dalla canna da zucchero possa essere considerato una forma di energia sostenibile. Lo studio è stato elaborato considerando la totalità del ciclo di vita della pianta, effettuando il bilancio su tutte le sostanze coinvolte. Sono stati presi in considerazione la coltivazione (dalla quantità d'acqua a quella di fertilizzanti potenzialmente nocivi), il trasporto delle materie prime (con il conseguente consumo di risorse rinnovabili e non con le emissioni ad esso correlate), il processo produttivo (che comporta un impatto ambientale non irrilevante) e le emissioni dovute alla combustione del prodotto finito.

Nonostante tale studio non abbia approfondito tale aspetto, non bisogna trascurare gli impatti socio economici diretti ed indiretti dovuti alla gestione delle terre coltivate. L'estensione di tali aree e l'eventuale conseguente deforestazione rappresentano di per sé una questione ambientale di notevole importanza che ha portato numerose organizzazioni internazionali (la FAO prima fra tutte) a mettere in discussione la reale sostenibilità dei biocombustibili di prima generazione. Al principio si pensava potessero essere una valida alternativa all'utilizzo delle fonti fossili ma l'espansione è stata tanto rapida quanto breve. Ci si è presto resi conto che le materie prime da cui provengono sono principalmente piante di tipo commestibile e si è attribuita ai biocarburanti una parte della responsabilità dell'aumento del prezzo dei prodotti ortofrutticoli degli ultimi anni. In merito si cita un articolo pubblicato dalla Banca Mondiale:

The effect of biofuels on food prices

Demand for maize in biofuel production was one of the largest factors contributing to the increase in food crop prices over recent years. Greater demand for biofuels was prompted by generous subsidization and mandates for biofuels in the U.S. and Europe and import restrictions placed on ethanol produced from sugar. Biofuel production in Brazil, the U.S., and the E.U. (which account for over 90 percent of world production) has risen by 18 percent a year since 2000.

At oil prices above \$50 a barrel, production of biofuels from food crops — even without subsidies — remains profitable. Thus the price of maize has become much more sensitive to the price of oil (and more volatile).

Other grain prices have also become sensitive to oil prices because as land-use shifts toward meeting biofuel demand, wheat and soybean production declines forcing their prices up as well.

The future impact of the oil market on food crop demand and prices is uncertain. New technologies might make ethanol production cheaper, lowering the \$50 threshold. But

technologies for fuel sources such as cellulose, and for alternative energy sources could reduce biofuel-related demand for food crops, and so also food prices.

L'Ue ha deliberato che entro il 2020 il 10% dei carburanti per il trasporto dovrà essere di origine agricola. Con questa direttiva, nel caso in cui tale scadenza venga rispettata attraverso i combustibili di prima generazione, il 38% dell'area coltivata sarà sottratta alla produzione di prodotti agricoli per uso alimentare. Diverse associazioni ambientaliste hanno fatto pressione perché il programma biocarburanti comunitario venga rivisto.

Negli Stati Uniti la situazione non è diversa: l'Energy policy act, approvato nel 2005, è a tutti gli effetti un piano che destinerà alla coltivazione di mais per la produzione di alcol per trazione un'area della dimensioni della Grecia. Nel giro di dieci anni. Ciò determinerà uno spostamento in altre aree della produzione delle coltivazioni per usi alimentari, e di conseguenza un forte impatto ambientale causato dall'eventuale deforestazione o bonifica dei territori.

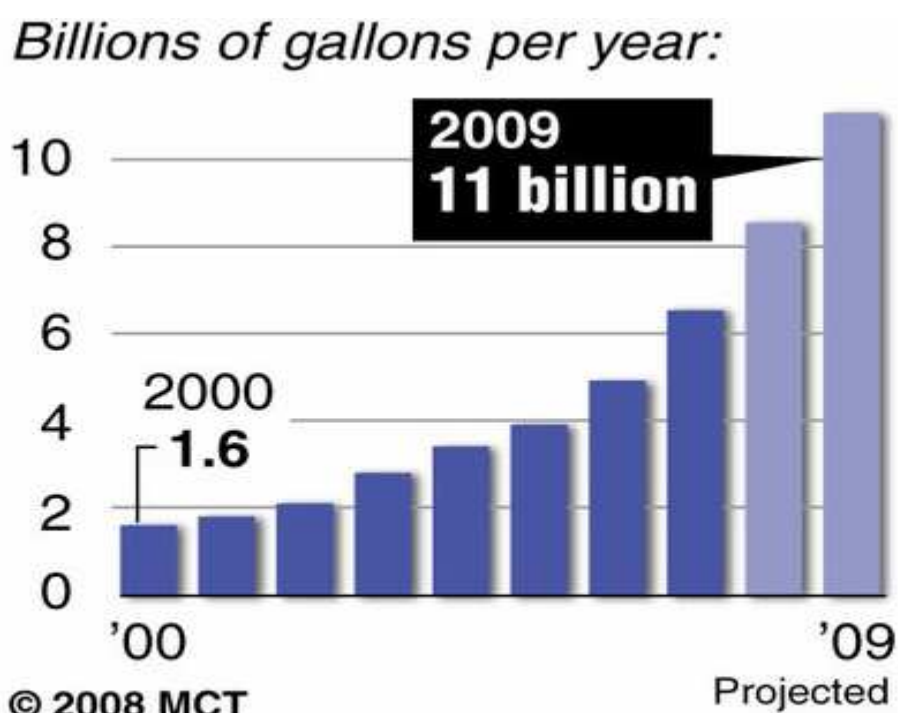


Figura 11: **crescimento della produzione statunitense di etanolo**

In riferimento agli Stati Uniti, si riportano in seguito i grafici dell'andamento della produzione di etanolo e del costo del mais (la principale materia prima adoperata).

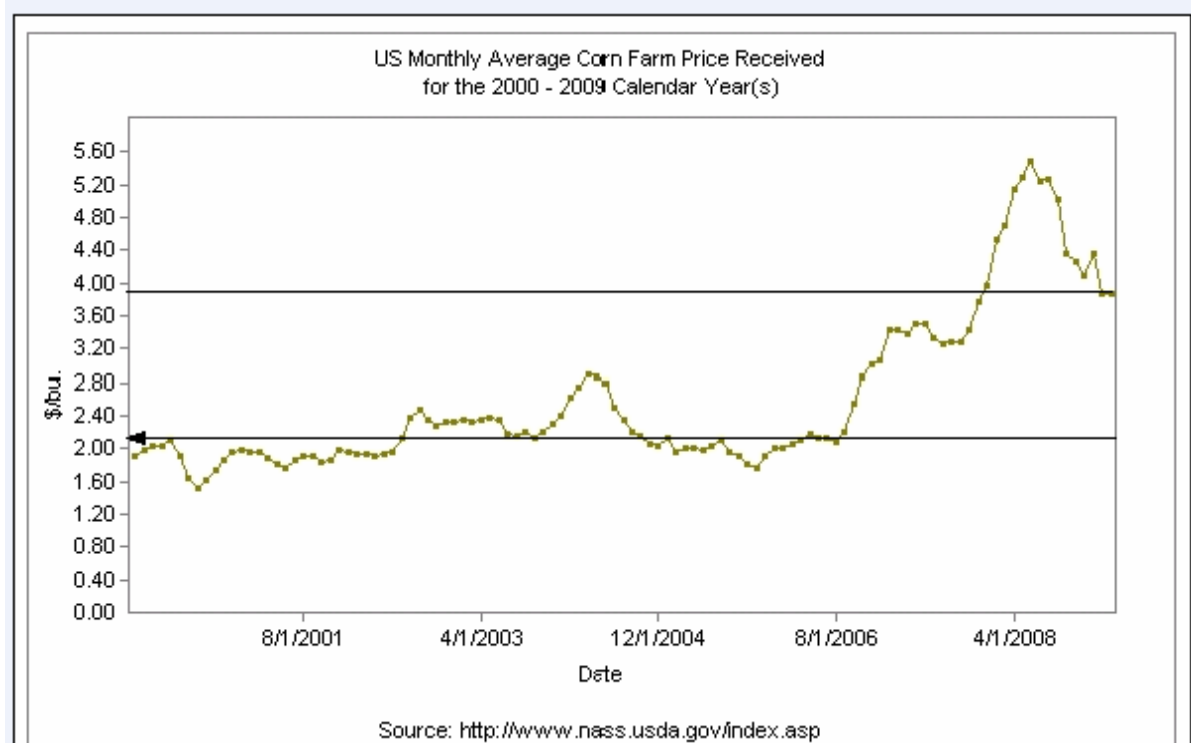
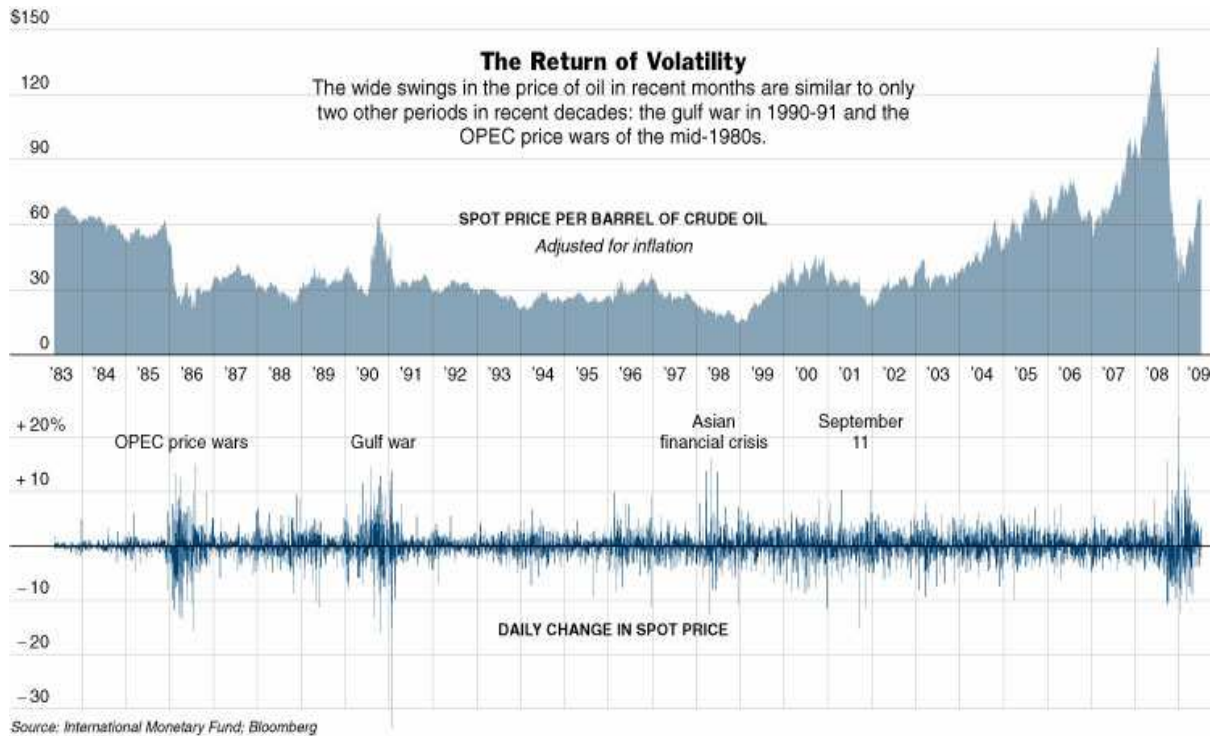


Figura 12:andamento dei prezzi di petrolio e mais negli Stati Uniti

Si noti come il picco massimo del prezzo di petrolio e mais coincidano. È proprio nel momento in cui il mercato petrolifero ha presentato la maggiore instabilità che la produzione di etanolo ha subito il maggior tasso di crescita.

Con il crack petrolifero avvenuto nel 2008, il prezzo del greggio è precipitato ai minimi storici ed è di conseguenza sceso anche il prezzo del mais per mantenere competitiva la produzione di bioetanolo.

In merito alla forte meccanizzazione della coltivazione delle piante adibite alla produzione di biocombustibili, la conversione delle colture spinta dalla forte richiesta del mercato energetico ha comportato un aumento della disoccupazione nelle zone agricole.

A livello ambientale i problemi principali che si sono riscontrati sono dovuti ai fertilizzanti chimici (dato che il prodotto non è destinato ad essere commestibile non assume nessuna importanza il fatto di concimare con fertilizzanti sottoposti ad un controllo inferiore) che usati senza una adeguata consapevolezza causano l'impoverimento del suolo agricolo e l'eutrofizzazione dei bacini idrografici limitrofi ai campi.

A proposito di risorse idriche non si possono ignorare le ingenti quantità d'acqua che sono andate sprecate nei casi in cui, sempre per ragioni economiche, si sono coltivate specie di prodotti non adatte ad essere cresciute in quelle determinati condizioni ambientali. Un esempio di questo tipo è chiaramente rappresentato dal sud della penisola iberica. La Spagna ha infatti promosso una forte campagna di incentivi a favore dei biocombustibili di prima generazione, in particolare biodiesel da semi oleaginose; sono sorte numerose coltivazioni di girasole e colza nelle campagne semidesertiche dell'Andalusia. L'impiego di colture che necessitano una notevole quantità d'acqua ha provocato un incredibile spreco di risorse idriche il cui impatto ambientale non è neanche paragonabile alla diminuzione delle emissioni di gas serra indotta dall'utilizzo dei biocarburanti.

5.2 Seconda generazione

Alcuni biocombustibili sono detti di seconda generazione perché presentano caratteristiche migliori e rendimenti di processo superiori rispetto a quelli di prima generazione. L'aspetto che li contraddistingue da quelli di prima generazione è la materia prima.

Al fine di evitare la competizione con i prodotti destinati al consumo umano o animale, si è infatti passati a studiare soluzioni al problema energetico globale che non comportassero lo sfruttamento delle terre coltivabili se non in minima parte. Seppur con un enorme dispendio di energie e denaro, la ricerca sta sviluppando metodi di valorizzazione di residui e scarti agroindustriali (che rappresentano materie prime a costo zero e che spesso necessitano di smaltimento controllato) e di particolari tipi di piante che non siano né commestibili, né tali da competere con l'industria agroalimentare (che dunque crescano in territori aridi o semi aridi e non necessitino elevate quantità d'acqua durante la crescita).

Fra materiali di partenza più studiati e più diffusi nella produzione di biocombustibili di seconda generazione vi sono le biomasse lignocellulosiche che sono sfruttate principalmente attraverso due processi che saranno approfonditi nei capitoli successivi dello studio:

La via biochimica, ovvero la separazione di lignina e cellulosa attraverso idrolisi enzimatica e la successiva fermentazione a dare etanolo;

La via termo.chimica, che consiste nella gassificazione di biomassa al fine di produrre biosyngas che attraverso la sintesi di Fischer-Tropsch da luogo a biodiesel.

L'altra materia prima su cui la ricerca sta investendo molto sono i semi di piante oleaginose. Dalla spremitura dei semi si ottiene un olio vegetale che attraverso la reazione di trans esterificazione da luogo a biodiesel. Il combustibile ottenuto è classificato come di seconda generazione perché nonostante il processo sia molto simile a quello usato per la soia o i semi di girasole, le piante in questione non sono commestibili e sono in grado di crescere con poca acqua in territori aridi e semi aridi. Il chiaro vantaggio è che non entrano in competizione con le colture

alimentari e non rendono necessaria alcuna deforestazione per ottenere spazi coltivati.

Le piante al momento più studiate sono:

Mamona (ricino):

il seme contiene tra il 40% ed il 60% olio (colture soprattutto in India, Cina e Brasile).

l'olio è un ottimo lubrificante (per aerei)

ha bisogno d'essere piantata manualmente, alta viscosità.

Cardo: esperimenti in corso in Portogallo e in Spagna.

Jatropha: grande attenzione in India, Paesi del Sud Est Asiatico, Egitto, Brasile. Il seme contiene circa il 40% di olio e la pianta perenne diventa rapidamente produttiva anche in terreni semiaridi non adatti alle colture tradizionali.

Per quanto si pensi che tali piante possano dare ottimi rendimenti dal punto di vista energetico, vi sono alcuni aspetti problematici che non è possibile valutare se non in lunghi lassi di tempo, primo fra questi l'invasività della specie.

Si cita un passo della rivista internazionale *Science*, volume 313:

“Biofuel crops may have economic benefits, but studies of concomitant environmental risks of movement into novel habitats are seldom conducted. Although anecdotal claims of “low risk” for some species (4) may be valid, many purportedly beneficial introduced species have had long-term economic and environmental costs owing to their invasiveness(5)”⁶

Affinché una specie vegetale possa essere efficiente per la produzione di biomassa è necessario che abbia caratteristiche eco-fisiologiche tali da renderla un'ottima specie competitiva. Tali caratteristiche sono: elevata riproduzione (sia da seme che vegetativa), rapida crescita, resistenza a microrganismi patogeni ed ampie capacità di adattamento ecologico. Molte di queste caratteristiche sono

6 Fonti: J. J. Ewel et al., *Bioscience* 49, 619 (1999). - National Research Council, *Predicting Invasions of Nonindigenous Plants and Plant Pests* (National Academies Press, Washington, DC, 2002), p. 194.

state, tra l'altro, accresciute grazie a miglioramenti genetici per l'aumento della resa e l'ottimizzazione della produzione.

Per contro le specie invasive diventano un danno per l'ambiente, in particolare quando tendono a competere ed a sostituire la vegetazione spontanea, alterando gli ecosistemi naturali e arrecando danno alla biodiversità, nelle aree seminaturali e nei residui di vegetazione all'interno degli agroecosistemi.

Le tecnologie relative ai biocombustibili di seconda generazione sono tutt'ora in rapido sviluppo, si prevede che nel giro di 7-8 anni cominceranno ad avere un ruolo consistente nel contesto energetico mondiale.

Attualmente il primato è in mano all'impresa tedesca Choren, produttrice del Sundiesel, un biodiesel prodotto a partire dalla gassificazione di biomasse; a partire dal 2005 si è diffusa con risultati sia positivi che negativi la *Jatropha Curcas*, prevalentemente in Africa, India e Brasile.

Il primo impianto europeo di produzione di bioetanolo di seconda generazione prodotto attraverso idrolisi enzimatica sarà invece inaugurato, dall'impresa italiana M&G, si parlava di un inizio dell'attività previsto per maggio 2010 ma si è ancora in attesa dell'inaugurazione

5.3 Terza generazione

Un ulteriore potenziale esempio di technology breakthrough è rappresentato dalla produzione di combustibili di terza generazione a partire da microalghe. Mentre la ricerca si concentra sulla selezione delle specie e l'ingegnerizzazione delle colture, la tecnologia già si presta a sperimentazioni industriali e progetti dimostrativi che in numerosi stati, compresi quelli in via di sviluppo, sono in avanzato stato di realizzazione. I bioreattori più avanzati già attualmente offrono produttività (100-200 t/ettaro) significativamente superiori alle colture tradizionali di biomassa per biocombustibili ed inoltre permettono maggiore flessibilità nella produzione. I lipidi e gli zuccheri contenuti nella biomassa algale possono infatti essere impiegati sia nella produzione di etanolo che di biodiesel,

oltre che in quella di sottoprodotti. In questo modo si rende concreta l'idea di bioraffineria, proprio come le raffinerie che usano il grezzo come materia prima, producendo una vasta gamma di prodotti e sfruttando quasi al 100% la materia prima con la conseguente possibilità di abbassare notevolmente i costi di produzione. Al giorno d'oggi una bioraffineria di questo tipo produce etanolo a un prezzo dell'ordine di 90-100 dollari al barile. Considerando che nei decenni passati, in assenza delle attuali conoscenze genetiche e biologiche, è stato possibile accrescere la produttività di alcune colture agricole tradizionali anche di 10 volte, possiamo ipotizzare sviluppi in grado di abbassare sensibilmente la soglia di competitività economica. Le coltivazioni impegnerebbero tra l'altro aree marginali non destinate alla produzione agricola.

Un esempio pratico è costituito dall'impresa statunitense Algenol la quale afferma di aver sviluppato una nuova tecnologia di produzione di bioetanolo di terza generazione a basso costo. Si prevede l'avviamento dell'impianto per la fine del 2010, il processo produrrebbe etanolo a partire dall'energia solare, alghe, sole, anidride carbonica e acqua salata. La grande novità è rappresentata proprio dal fatto che le alghe vengano coltivate in acqua salata, e che la stessa venga usata anche per il sistema di raffreddamento, sono caratteristiche che abbassano notevolmente i costi di processo.

“Formalmente siamo in grado di catturare 1,5 milioni di tonnellate di emissioni di CO₂ e di convertirlo in 400 milioni di litri di etanolo. Diventando così i più grandi consumatori di CO₂ del pianeta.”



Figura 13: impianto produttivo Algenol

Così afferma il portavoce della compagnia, Paul Woods, che aggiunge inoltre che la proporzione di energia prodotta da fonte rinnovabile ed energia prodotta da fonti fossili consumata sarebbe di 5,5:1; la produzione per ettaro può arrivare fino a 30 m³/per ettaro. Non si può trascurare l'importanza di tale valore dato che nel caso del mais e della canna da zucchero si raggiungono rispettivamente valori pari a circa 400 e 780 galloni/ettaro.

“L’approvazione da parte della Lee County Commission in data 3 febbraio 2010, è la spinta che si stava aspettando per procedere con la realizzazione dell’impianto” afferma lo stesso Paul Woods in un’intervista televisiva, lasciando credere che a breve sarà costruito il primo impianto di produzione di biocombustibili di 3° generazione.

I principali vantaggi di tale tecnologia:

- a) utilizzo di acqua salata e non dolce nel processo produttivo e ridotti spazi necessari;
- b) non compete assolutamente con le colture alimentari
- c) la CO₂ rappresenta una delle proprie materie prime.

5.4 Il Bioetanolo

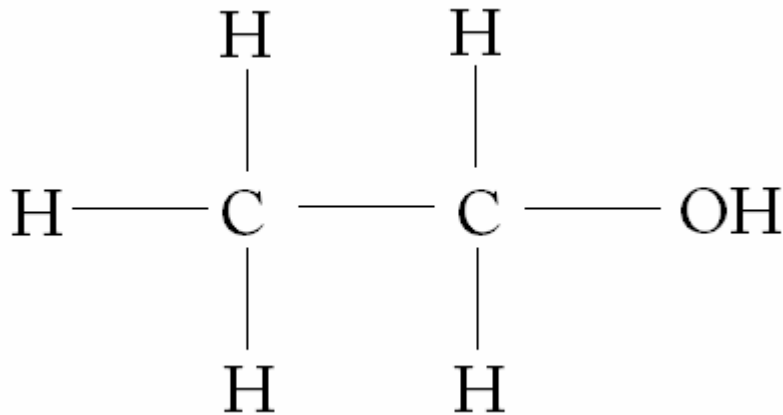


Figura 14: struttura chimica dell'etanolo

Il bioetanolo è l'alcol etilico (o etanolo) prodotto dalla fermentazione degli zuccheri presenti all'interno delle biomasse ligno-cellulosiche ed è caratterizzato da un elevato contenuto energetico (27 MJ/kg).

Tabella 1: caratteristiche fisico-chimiche dell'etanolo

Potere calorifico inferiore:	6405 kcal/kg
Densità:	0,790 kg/l
Calore di evaporazione	225 kcal/kg
T° di fusione	-112°C
T° ebollizione	78,3°C
T° critica	243,1°C
Pressione critica	63,1 atm
Densità critica	0.2755 kg/l
Tensione di vapore	45mmHg
T°infiammabilità	18°C
Tempo di evaporazione	8,3
N° ottano	110
Energia al litro	5060 kcal/l

CAS-No: [64-17-5]

 C_2H_5OH

ETHANOL



Physical properties	important characteristics	
Boil. Point °C: 78 Melt. point °C : -117	Colorless liquid with characteristic odor Vapor mixes readily with air,	
	TLV-TWA	1000 ppm 1880 mg/m ₃
	Absorption route :...inhalation and ingestion Immediate effects : ...irritates...consciousness Effect of prolonged exposure :...liver damage	
Hazards/symptoms	Prevention	Fire extinguishers/ First aid
Fire : extremely flammable Inhalation: cough.... Skin : redness Eyes : ... pain Ingestion: headache,	Keep away from fire Ventilation Gloves Safety glasses	Powder, water.... Fresh air, ... Remove contaminated... Flush with water, ... Rinse mouth,...
Spillage	Storage	Labeling / NFPA
Collect leakage ...	Keep in fireproof place, ...	R : 11 S : 7-16  Flammable 
NOTES		
Alcohol consumption increases narcotic effects. Flash...		

Figura 15 : altre caratteristiche dell'etanolo.

Si presenta come una sostanza incolore, infiammabile con odore e sapore caratteristici; appartiene al gruppo organico degli alcoli, molecole caratterizzate da un gruppo idrossile legato ad un atomo di carbonio. Con un punto di fusione di $-114\text{ }^{\circ}\text{C}$ e di ebollizione pari a $78\text{ }^{\circ}\text{C}$ risulta meno denso dell'acqua. In virtù di alcune caratteristiche, il bioetanolo ha un comportamento simile alla benzina e ne permette la sostituzione nell'alimentazione dei motori a ciclo Otto. Uno dei parametri di maggiore importanza agli effetti di questo utilizzo è il potere antidetonante, espresso dal numero di ottano: è superiore a quello della benzina e consente un risparmio nel ricorso agli antidetonanti. L'utilizzo nei motori a ciclo Diesel in sostituzione del gasolio è un'opportunità che si sta delineando concretamente e che potrà essere realizzata nel medio termine.

L'impatto ambientale dell'impiego del bioetanolo è minore rispetto a quello esercitato dai combustibili fossili, in termini di emissione in atmosfera di composti inquinanti (particolato, monossido di carbonio, anidride solforosa) e di gas serra, soprattutto per il fatto che tale composto presenta la caratteristica d'essere molto ossigenato.

In particolare, secondo letteratura [24], il risparmio nelle emissioni di anidride carbonica, considerando anche la fase produttiva, è del 15-60%, a seconda della materia prima usata. Il bioetanolo, infatti, può essere prodotto a partire da molteplici biomasse vegetali, residuali e/o provenienti dalle colture dedicate. Le materie prime sono suddivise, a seconda del tipo di carboidrato che contengono, in saccarifere (zuccheri semplici), amidacee (amido) e ligno-cellulosiche (cellulosa ed emicellulosa). Sono comunemente denominate alcoligene le colture destinate a fornire prodotti agricoli, il cui impiego si colloca nella filiera del bioetanolo, in virtù del loro elevato contenuto in carboidrati. Le colture saccarifere tradizionalmente utilizzate sono la barbabietola da zucchero in Europa e la canna da zucchero in America Latina. Quelle ritenute più indicate alle condizioni climatiche italiane sono proprio la barbabietola ed il sorgo zuccherino (in virtù della sua plasticità e del modesto fabbisogno idrico) per quanto riguarda le saccarifere, e il mais, per quanto concerne le amidacee.

Anche la filiera produttiva dipende dalla materia prima utilizzata. Il bioetanolo di prima generazione è prodotto dalle materie prime di natura zuccherina (o saccarifera) e amidacea (o amilacea), derivanti sia dalle colture dedicate, sia dai

residui agricoli e dell'industria agroalimentare. Nel caso si ricorra alle biomasse saccarifere, si procede con l'estrazione degli zuccheri dai tessuti vegetali preposti all'accumulo, la fermentazione dell'estratto zuccherino, la distillazione e la disidratazione del bioetanolo. Nell'ipotesi che si impieghino le materie prime amidacee, a monte della fermentazione la fase di estrazione è sostituita dalla macinazione della granella e dall'idrolisi dell'amido.

L'etanolo prodotto con questi due metodi raggiunge basse concentrazioni per ragioni naturali, ma può essere concentrato per distillazione fino ad un massimo di 96%. Per ottenere concentrazioni maggiori è necessario disidratarlo attraverso la sintesi chimica.

L'impiego delle biomasse ligno-cellulosiche è una prospettiva che si ritiene potrà essere concretizzata nei prossimi anni; il bioetanolo con questa origine è considerato un biocarburante di seconda generazione. In tal caso a complicare la filiera è il processo di scissione degli zuccheri (cellulosa e emi-cellulosa) dalla lignina. Tale legame è uno dei più forti presenti in natura e i processi di idrolisi enzimatica e gassificazione sono tutt'ora oggetto di ricerca in ogni angolo del pianeta. Attualmente esistono numerose bioraffinerie che producono etanolo a partire da canna da zucchero in Brasile ed a partire dal mais (coltura più accessibile al clima del Nord-America) negli Stati Uniti.

Ideato come combustibile nel 1927, fu perfezionato dai tedeschi durante la seconda guerra mondiale (Sintesi di Fisher Tropsch) per compensare l'embargo petrolifero imposto dagli alleati, l'utilizzo dell'alcol etilico nei veicoli si estese solo a metà degli anni '70, in seguito al rialzo del prezzo del petrolio. Nel '93 furono introdotti nel mercato americano i veicoli cosiddetti flex-fuel, che possono funzionare sia a benzina che etanolo, rendendo il biocombustibile estremamente competitivo a livello commerciale.

Nell'U.E. allo stato attuale il bioetanolo è utilizzato in miscela al 5% in volume con la benzina, mentre negli Stati Uniti e in Canada la percentuale è estesa al 20%. La tecnologia FFV (Fuel Flexible Vehicles) ha consentito la diffusione in alcuni Paesi europei (Francia, Svezia, Germania) di veicoli a doppio sistema di alimentazione, a benzina e a bioetanolo all'85% in volume con la benzina. In Brasile il bioetanolo azeotropo è utilizzato puro nei veicoli predisposti.

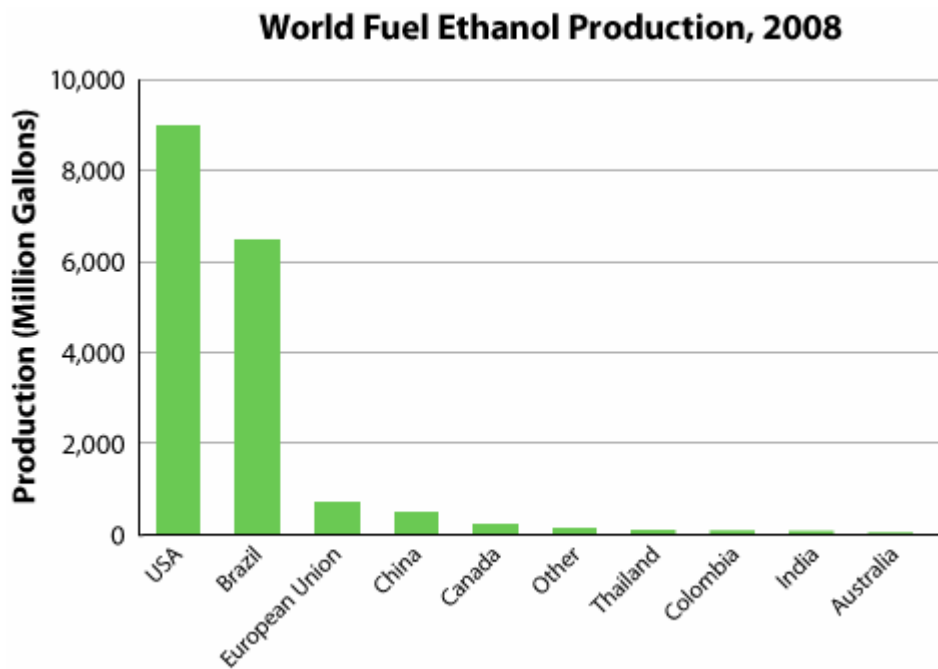


Figura 16 Source: Renewable Fuels Association, 2009

Nel rapporto Sofa 2008 (FAO) si cita che nel 2007 sono stati prodotti 52 miliardi di litri di bioetanolo, pari a tre volte di più della produzione registrata agli inizi del 2000. Con l'avvio della politica innovativa voluta in passato da Bush, gli Stati Uniti si confermano il primo paese produttore al mondo di etanolo con una produzione dell'ordine $34 \cdot 10^9$ litri/anno. Seppur il prezzo del bioetanolo prodotto a partire dal mais è maggiore e meno sostenibile rispetto a quello prodotto a partire dalla canna da zucchero brasiliana, gli Stati Uniti hanno puntato molto sull'aumento del volume produttivo. In pochi anni sono riusciti a superare (nel 2005) e a distanziare il Brasile che rimane al secondo posto con una produzione dell'ordine dei $26 \cdot 10^9$ litri/anno.

5.5 Il Biodiesel

Seppur non sia oggetto di questo studio si è ritenuto opportuno approfondire parzialmente le caratteristiche di un altro biocombustibile estremamente importante e promettente quale il biodiesel. È costituito da una miscela di esteri metilici (o metilesteri), prodotti mediante la conversione chimica degli oli e dei

grassi animali e/o vegetali, ed è caratterizzato da un'elevata densità energetica (37 MJ/kg).

Alcune caratteristiche rendono questo biocarburante affine al gasolio e ne consentono la sostituzione nei motori a ciclo Diesel. Tra queste, una particolare importanza è assunta dalla prontezza all'accensione, espressa dal numero di cetano. È simile e talora superiore a quella del gasolio e, pertanto, garantisce una buona risposta del biocarburante nell'accensione spontanea, tipica di questo tipo di motori. La sostituzione del gasolio con il biodiesel si riflette in importanti benefici ambientali. In primo luogo le emissioni, rilasciate nel corso della combustione, presentano una qualità migliore di quella consentita dall'utilizzo del gasolio, soprattutto in termini di monossido di carbonio, particolato e idrocarburi incombusti. L'utilizzo del biodiesel, inoltre, considerando anche la

Caratteristica	Biodiesel*	Gasolio*
Potere calorifico inferiore (PCI) [MJ/kg]	37	42
Contenuto in ossigeno [% in peso]	11	assente
Numero di iodio	108,7	8,6
Numero di cetano	56	48
Flash point [°C]	160	72
Punto di intorbidamento [°C]	-2	-17
Punto di scorrimento [°C]	-9	-26
Viscosità [cSt]	5,1 (a 20°C)	2,6 (a 20°C)
Stato	liquido	liquido
Aspetto	limpido	limpido

Figura 17 proprietà chimico fisiche di biodiesel e gasolio

fase di produzione, consente un risparmio netto nelle emissioni di anidride carbonica del 40-60%.

Le materie prime impiegate per la produzione del biodiesel possono provenire dalle colture oleaginose dedicate o dalla raccolta differenziata degli oli esausti a servizio delle attività di ristorazione, delle industrie di trasformazione degli alimenti e delle utenze domestiche.

Alle latitudini italiane le colture dedicate generalmente impiegate per la produzione del biodiesel sono la colza, il girasole e, in misura inferiore, la soia.

La coltivazione del cavolo dell'Abissinia (*Brassica Carinata*) è in corso di sperimentazione e risulta promettente per le regioni meridionali, in virtù del suo modesto fabbisogno idrico e dell'elevata capacità di adattamento a terreni sia sciolti, sia argillosi, anche se pendenti, purché drenanti e strutturati.

Nel mondo la coltura oleaginosa a più larga diffusione è la palma da olio; la sua coltivazione, tuttavia, solleva delle problematiche di sostenibilità ambientale e socio-economica. Prima fra tutte le ragioni, vi è la competizione con altre culture poiché le condizioni climatiche di cui necessita, sono simili a numerosi tipi di colture destinate alla produzione di beni alimentari. Altre materie prime, che risultano particolarmente adatte dal punto di vista della sostenibilità sono gli oli vegetali derivanti dalla preparazione e dalla conservazione degli alimenti; possono provenire dagli esercizi pubblici, dalle attività di ristorazione collettiva, dalle industrie agroalimentari e dalle utenze domestiche.

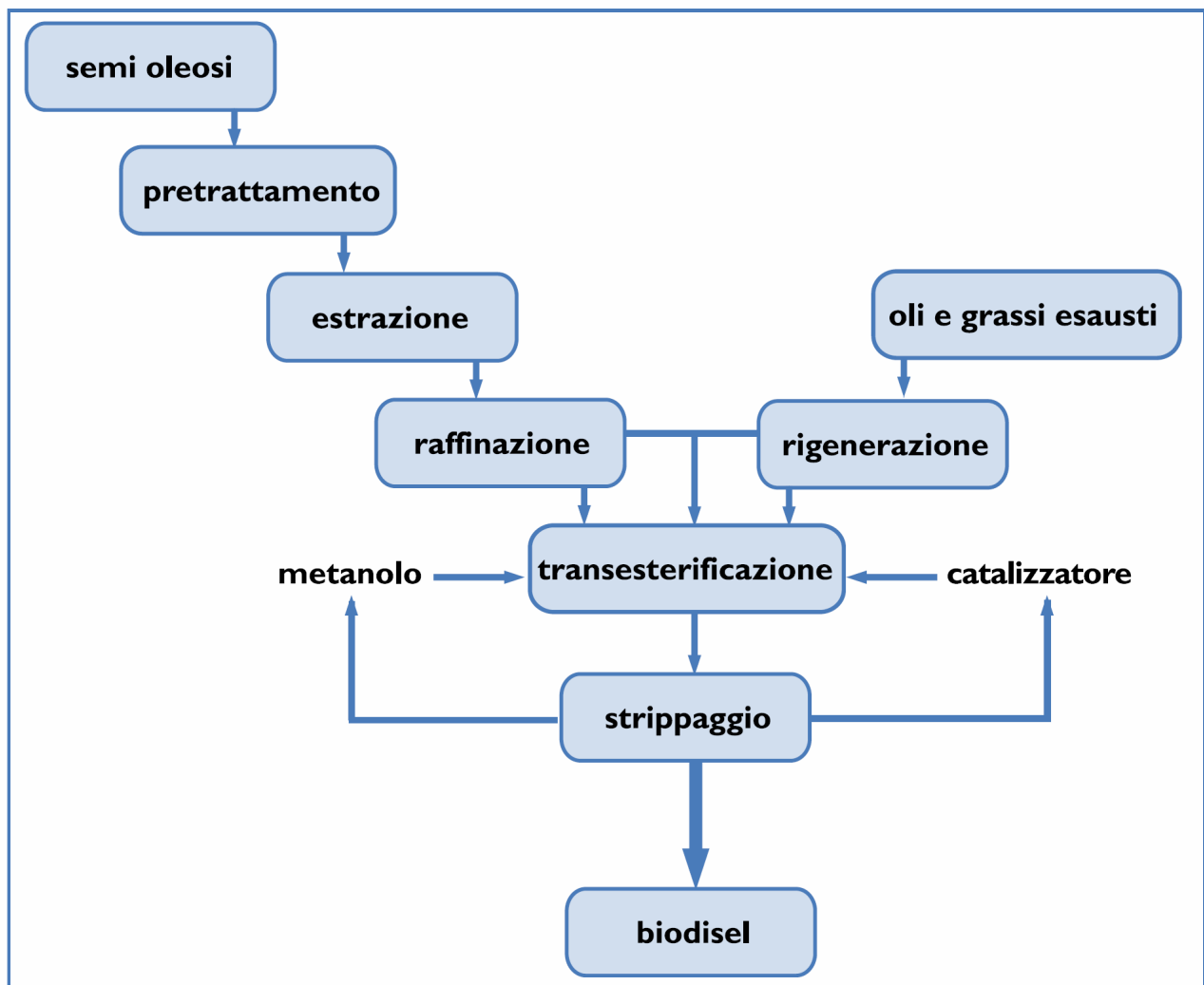


Figura 18: processo produttivo del biodiesel

La filiera a partire dalle colture dedicate è articolata nell'estrazione degli oli dai semi oleosi, nella loro raffinazione e nella conversione chimica (transesterificazione) degli stessi a biodiesel. Nell'ipotesi di utilizzare gli oli e i grassi vegetali e/o animali esausti di origine alimentare, l'estrazione e la raffinazione sono sostituite dalla rigenerazione; successivamente le materie prime di diversa provenienza possono essere miscelate, per alimentare uno stesso impianto di produzione del biodiesel.

Caratteristica	Biodiesel*	Gasolio*
Potere calorifico inferiore (PCI) [MJ/kg]	37	42
Contenuto in ossigeno [% in peso]	11	assente
Numero di iodio	108,7	8,6
Numero di cetano	56	48
Flash point [°C]	160	72
Punto di intorbidamento [°C]	-2	-17
Punto di scorrimento [°C]	-9	-26
Viscosità [cSt]	5,1 (a 20°C)	2,6 (a 20°C)
Stato	liquido	liquido
Aspetto	limpido	limpido

Figura 19 proprietà chimico fisiche di biodiesel e gasolio

Per alcune proprietà il biodiesel presenta un comportamento migliore di quello del gasolio. Essendo caratterizzato da un numero di cetano più elevato, evidenzia una maggiore prontezza all'accensione e il valore di flash-point più alto di quello del gasolio assicura una maggiore sicurezza nella manipolazione.

Per altre caratteristiche il biodiesel evidenzia un comportamento peggiore di quello del gasolio: il numero di iodio più elevato lo rende più deteriorabile e i valori più alti per i punti di intorbidamento e di scorrimento ne acquisiscono le problematiche legate all'utilizzo nel periodo invernale. Il biodiesel, inoltre, presenta una densità energetica più bassa del gasolio, sicché per sostituire un chilogrammo di gasolio sono necessari 1,13 chilogrammi di biodiesel.

6 Le Biomasse

L'action plan della Commissione Europea individua nelle biomasse ligno-cellulosiche i materiali di eccellenza per i combustibili di seconda generazione.

In primo luogo il legname, ma sono biomasse anche scarti agricoli e residui di processo che oggi vengono per lo più destinati alle discariche.

In campo energetico, per biomassa si intende qualunque materiale organico di origine vegetale che possa essere utilizzato come combustibile in caldaie termiche o trasformato in altre sostanze attraverso differenti processi chimici.

All'interno del materiale ligno-cellulosico si trova immagazzinata l'energia solare; il processo di fotosintesi permette di trasferire il carbonio dalla sua forma ossidata, l'anidride carbonica CO₂, presente nell'atmosfera, alla sua forma ridotta (carboidrati), presente nei tessuti delle piante, le quali costituiscono in peso più del 99% della materia vivente sulla nostra terra.

Sono costituite prevalentemente da lignina, emicellulosa e cellulosa; si riportano in seguito le composizioni di alcuni tipi di biomassa:

Composizione chimica approssimata di differenti specie non legnose							
Specie	Composizione chimica			Dimensione media delle fibre			
	Cellulosa greggia (%)	Lignina (%)	Ceneri (%)	Lunghezza(mm)	Larghezza(μm)	Spessore lumen(μm)	Spessore parete cellulare(μm)
Conifere							
Varie	40 - 45	25 - 35	0,2 - 1	2,5 - 7	33 - 35	26 - 28	3,6
Pinus taeda	42 - 46	27 - 30	< 0,5	3,1 - 4,8	43 - 53	27,4 - 38,35	9 - 9,1
Latifoglie							
Varie	40 - 62	15 - 25	0,2 - 1	0,34 - 2,07	10-50	nov-26	02-apr
Eucalyptus grandis	-	-	-	0,62 - 1,13	12	5	3,5
Piante tessili (steli)							
Lino	-	10,1 - 14,5	2,3 - 4,7	4,0 - 8,5	10 - 37	-	-
Canapa							
- taglio	67,7	12,4	5,1	5 - 40	25 - 50	-	12,5 - 25
- legno	-	-	-	0,55	22	20	1,4
Kenaf							
- taglio	53 - 57,4	5,9 - 9,3	5,5 - 8,3	3 - 4	18 - 24	7,3	8,6
- legno	51,2	17,4	2,9 - 4,2	0,5 - 1	22 - 29	0,8	2,9
Juta							
- taglio	-	20 - 24,7	-	2,1 - 2,6	17,6 - 23,8	4 - 11	6,2 - 7
- legno	-	-	-	0,76 - 0,80	29 - 31,4	0,78 - 0,81	2,8 - 3,1
Crotolaria							
- taglio	45 - 60	3,8 - 4,9	-	3,8 - 5,6	24 - 31	7 - 8	6 - 7
- legno	-	-	-	0,5 - 0,7	23 - 32	8 - 12	6 - 7
Piante tessili (foglie)							
Abaca	-	8,8 - 10,5	1,1 - 1,6	3,5 - 6	17 - 21	9,5	5,7
Sisal	72	7,6 - 11	0,6 - 2,3	2,9 - 3,2	19	7,3	5,8 - 6
Bagassa canna zucchero	48 - 58	18 - 22	2 - 5	0,3 - 3,4	9 - 45	16	5
Paglie di cereali							
Riso	43 - 47	13	18	0,5 - 2,5	4 - 15	3	3,5
Grano	43 - 54	18	8	1,1 - 1,5	9 - 13	-	-

Figura 20 Tabella rappresentante le caratteristiche principali delle biomasse commerciali

Le biomasse costituiscono una fonte alternativa rinnovabile destinata a essere sfruttata in misura crescente, tanto da arrivare a garantire, secondo le stime attuali, circa il 35% del fabbisogno energetico mondiale intorno al 2050. Nel “Biomass Action Plan” la Comunicazione adottata dalla Commissione Europea

lo scorso dicembre, sono definite le misure per promuovere ed incrementare l'uso delle biomasse nei settori del riscaldamento, dell'elettricità e dei trasporti. L'obiettivo è quello di raddoppiare l'attuale contributo delle biomasse nel bilancio energetico europeo (dal 4 all'8%), passando dai 69 Mtep del 2003 a 188 Mtep nel 2010 e a 227 Mtep nel 2020⁷.

Attualmente la scelta più diffusa nel processo di valorizzazione delle biomasse sono le centrali termoelettriche. La combustione è alimentata direttamente da materiale di scarto proveniente da procedimenti agricoli o legna ottenuta dal taglio di piantagioni appositamente coltivate. Attraverso il processo di fermentazione delle biomasse zuccherine si può invece produrre bioetanolo che presenta una più ampia gamma di possibilità di utilizzo. Le biomasse zuccherine più diffuse a livello globale sono il mais, la canna da zucchero e la barbabietola. Particolarmente rilevante è l'utilizzo del processo di fermentazione della canna da zucchero per produrre etanolo, praticato soprattutto in Brasile, dove il processo ha raggiunto un notevole perfezionamento. Con questo metodo infatti, oltre al fatto che si ricava un combustibile dal prezzo competitivo rispetto a quello del petrolio, come già accennato in precedenza, si ottiene un risparmio del 60% delle emissioni di gas serra.

Purtroppo anche tale processo, se non ottimizzato almeno con una cogenerazione di energia, presenta numerosi svantaggi che danno ragione di pensare ad una nuova generazione di biocombustibili come sarà ampiamente argomentato nel seguito del presente studio.

7 Processi di valorizzazione di biomassa

Sono stati messi a punto negli anni diversi processi di valorizzazione delle biomasse di vario tipo e provenienza. Nel seguente paragrafo si vogliono illustrare i principali processi di valorizzazione del bagasso di canna da zucchero che è uno dei più importanti a livello mondiale. È rappresentativo di vari tipi di biomassa lignocellulosica, per esempio ha una composizione molto somigliante

⁷ Fonte: Enel Ambiente: <http://www.enel.com/it-IT/sustainability/environment/>

alla paglia residua delle coltivazioni di granturco, e questo estende di fatto la validità del seguente studio. Si vuole infatti mettere in evidenza l'universalità e la conseguente importanza a livello globale dei processi di valorizzazione delle biomasse ligno-cellulosiche.

Il primo processo descritto è il più semplice, nonché attualmente il più diffuso, quello della combustione diretta al fine di produrre energia elettrica; in seguito si descrive il funzionamento teorico dei processi di seconda generazione in cui la ricerca sta concentrando i propri sforzi (allo stato attuale non risulta attivo nessun impianto a livello industriale). Le vie in cui si sta investendo maggiormente sono due: la prima è la via termochimica, Biomass To Liquids, in cui si produce biosyngas a partire da biomassa per poi trasformarlo in biodiesel attraverso la sintesi di Fischer Tropsch; La seconda è invece la via biochimica, che consiste nell'effettuare l'idrolisi enzimatica della biomassa seguita dalla fermentazione degli zuccheri estratti, a dare bioetanolo. Con tali processi si prevede un incremento minimo della produzione da 6000 litri di etanolo/ettaro/anno ad un valore di 9000 litri etanolo/ettaro/anno.

7.1 Combustione del bagasso al fine di produrre energia

L'industria della canna da zucchero rappresenta una delle più importanti attività economiche brasiliane; con essa si produce quasi tutto l'etanolo necessario al trasporto automobilistico ed una quantità di zucchero che non solo è sufficiente al sostentamento del paese ma consente anche un grande esportatore.

L'energia elettrica e termica necessaria al processo viene prodotta all'interno delle bioraffinerie stesse attraverso la combustione del bagasso in impianti di cogenerazione.

Quasi tutti gli impianti di lavorazione della canna da zucchero sono infatti autosufficienti in termini energetici ed alcuni negli ultimi anni hanno cominciato a vendere l'energia elettrica prodotta in eccedenza.

Il processo di combustione relativo alle biomasse lignocellulosiche è molto complesso e la ricerca sta costantemente studiando ai fini di ottimizzarlo e massimizzarne l'efficienza energetica minimizzando il quantitativo di sostanze inquinanti prodotte.

Le reazioni coinvolte sono quelle tipiche della combustione, l'ossidazione del carbone e dell'idrogeno presenti nella materia prima a dare rispettivamente anidride carbonica ed acqua.

Si distinguono due condizioni tipiche di funzionamento del processo: le cosiddette condizioni "ricche", cioè in parziale carenza di comburente (ossigeno), e le condizioni "povere" in cui la carenza di combustibile e il relativo eccesso d'aria comportano una maggiore dispersione dell'energia calorifica prodotta.

Una combustione incompleta dovuta alla carenza di ossigeno può dar forma a numerose sostanze potenzialmente nocive: monossidi di carbonio, composti volatili organici (COV), idrocarburi poliaromatici (IPA), ed altre forme di particolato ritenute gravemente dannose alla salute. Risulta molto complesso trovare le concentrazioni ottimali di funzionamento degli impianti dato che esse dipendono da numerose variabili di processo fra cui temperatura, pressione, ma soprattutto superficie di contatto e tempo di residenza che, dato l'elevato livello di turbolenza proprio del processo di combustione, risultano difficilmente misurabili. In genere si preferisce far avvenire la reazione di combustione in condizioni leggermente povere piuttosto che incorrere nel rischio di produrre emissioni con concentrazioni eccessive di sostanze inquinanti che comportano elevati costi di depurazione.

7.1.1 schema di impianto

Secondo lo stato dell'arte [12] si riportano in seguito gli schemi di processo di quattro diversi tipi di impianto di cogenerazione, utilizzati nelle bioraffinerie brasiliane. Tali impianti sono stati predisposti per fornire tutta l'energia necessaria al processo ed inoltre, i quelli ad efficienza elevata, é generata una potenza eccedente per essere immessa sulla rete e venduta.

Configurazione 1: si tratta del sistema di cogenerazione più diffuso in Brasile: è costituito da un ciclo a vapore con una turbina che sfrutta l'alta pressione del vapore entrante per produrre energia meccanica.

Il processo di produzione dello zucchero condiziona la quantità di vapore messa

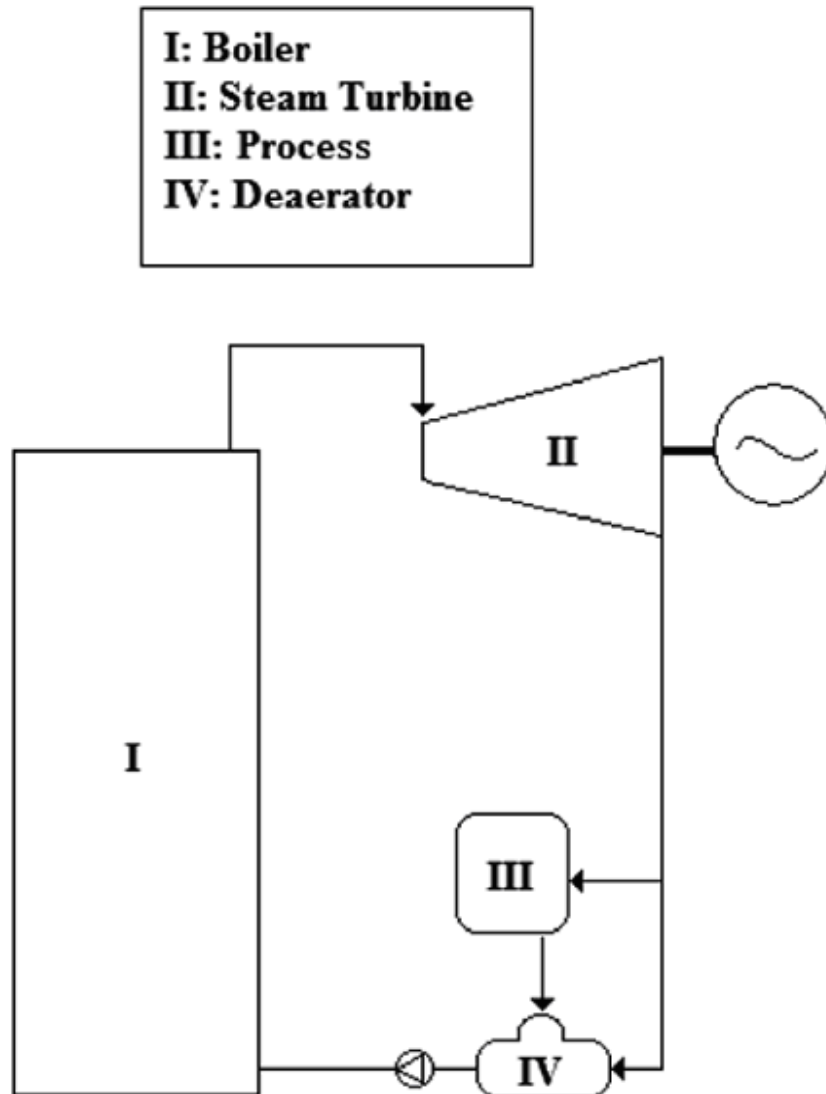


Figura 21: schema di processo 1

a disposizione dalla caldaia, di conseguenza è in grado di funzionare solo nel periodo della spremitura; il ciclo si chiude con il sistema di condensazione del vapore per recuperare il calore e alimentare nuovamente acqua al ciclo.

Configurazione 2: si tratta di un ciclo a vapore con una turbina a condensazione con estrazione controllata. In questo caso il condensatore offre una maggiore flessibilità nel funzionamento, essendo in grado di operare tutto l'anno⁸ e non solo nel periodo di spremitura della canna.

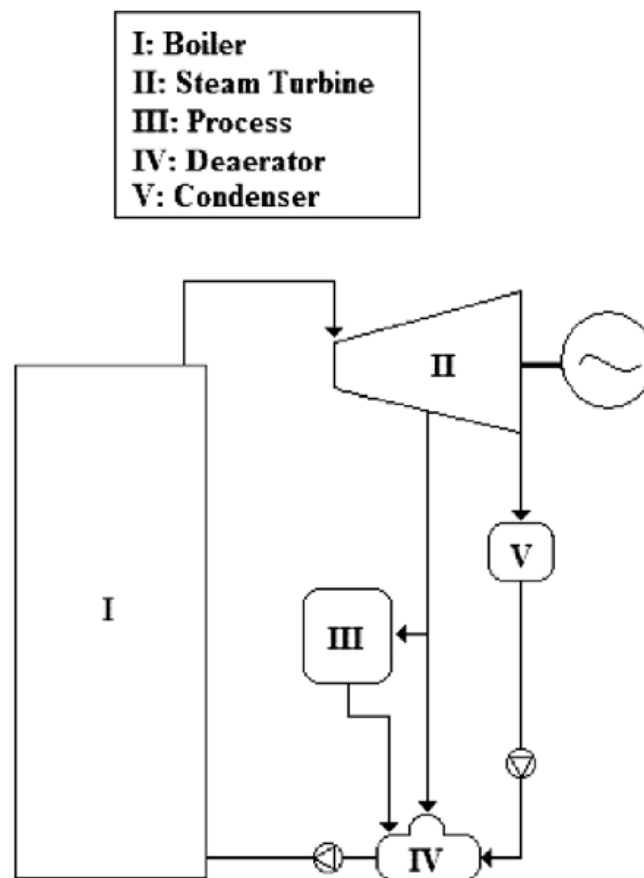


Figura 22: configurazione 2, schema di processo.

Configurazione 3: è basata sulla gassificazione del bagasso. Il sistema di gassificazione è composto dal forno per essiccare la biomassa, un gassificatore e un impianto di depurazione per eliminare le impurezze che possono inibire il funzionamento della turbina, dato che lo stesso gas prodotto viene immesso

⁸ Il deaeratore, segnato come lo stadio IV nello schema di processo, ha la funzione di eliminare le sostanze ossidanti per prevenire fenomeni di corrosione. Soffre la particolarità di dover lavorare a basse pressioni, di conseguenza in alcuni periodi dell'anno in cui la caldaia lavora a pressioni maggiori, può essere necessario condensare il vapore uscente dalla turbina.

direttamente nella turbina. Il gas viene compresso allo stesso livello dell'aria immessa nella camera di combustione. I gas esausti uscenti dalla turbina sono usati per generare il vapore nell'HRSG (*heat recovery steam generator*) che opera ad una pressione pari a 2.5 bar. Il calore necessario per essiccare il bagasso viene fornito proprio dall'HRSG con una corrente entrante alla Temperatura di 200 °C.

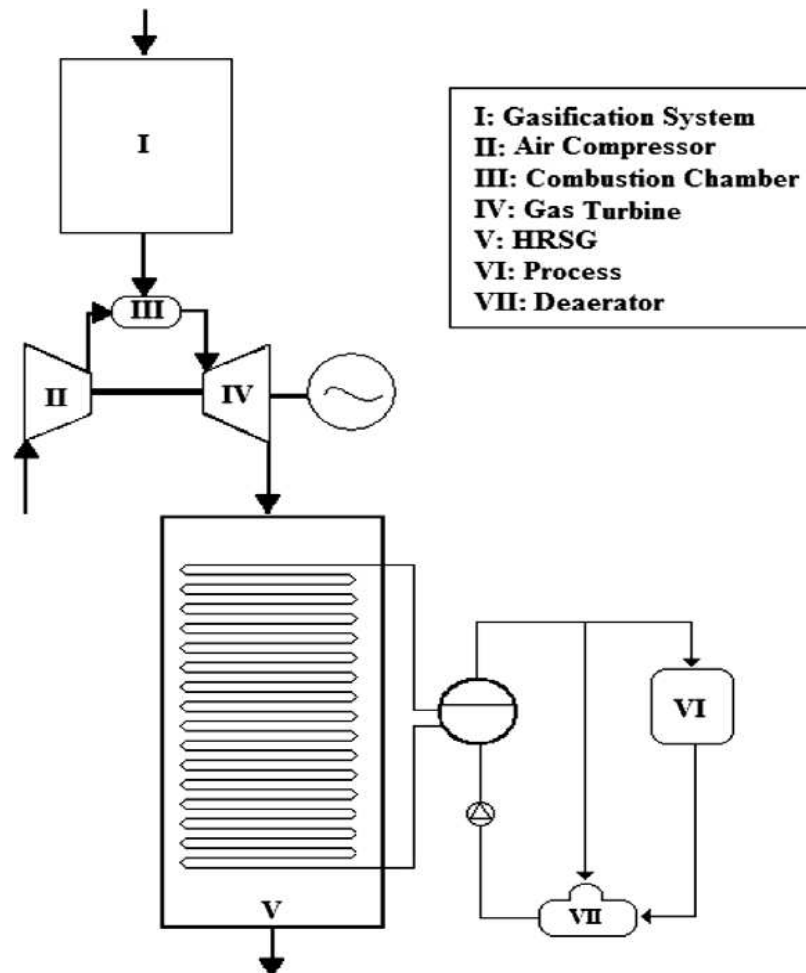


Figura 23: Configurazione 3, schema di processo.

Configurazione IV: consiste in un ciclo combinato con la gassificazione del bagasso (BIG-CC). Come nella configurazione precedente ha l'obiettivo di produrre il vapore nell'HRSG. La differenza è che il vapore prodotto in eccesso rispetto a quello necessario per essiccare la biomassa nel pretrattamento passa attraverso una turbina a condensazione con estrazione controllata, che restituisce il vapore ad una pressione pari a 2.5 bar.

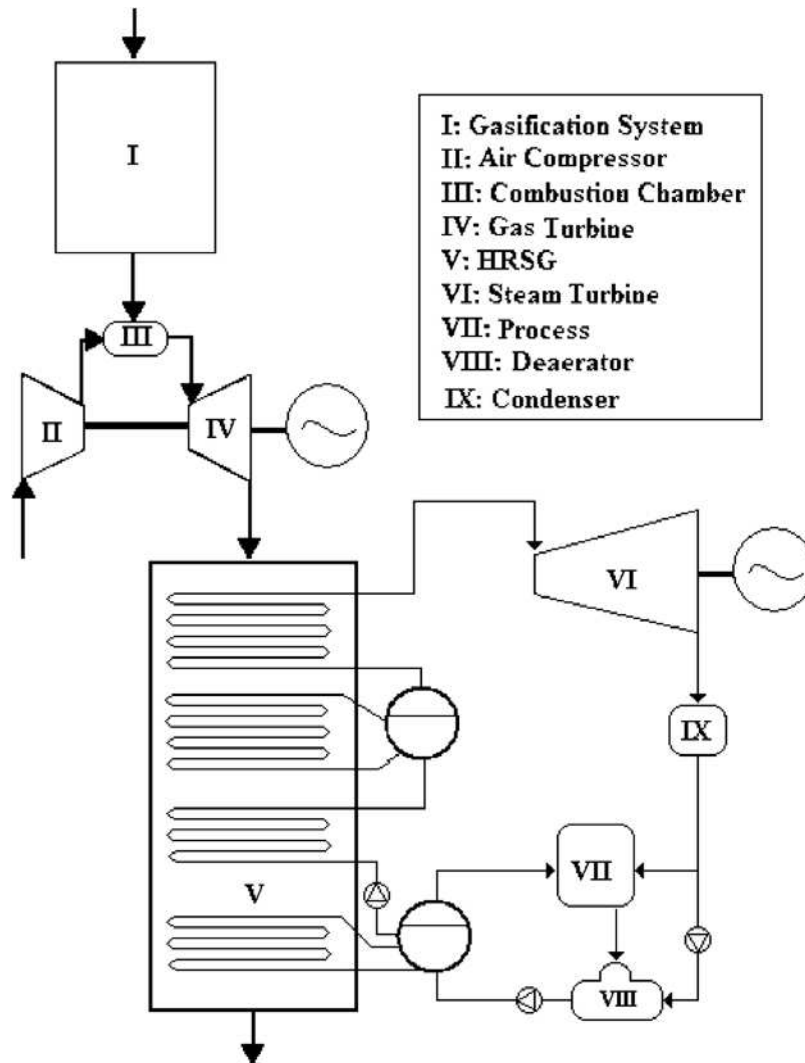


Figura 24: Configurazione 4, schema di processo.

É il processo che presenta la maggior efficienza ed é presente solo negli impianti costruiti o implementati recentemente; quelli progettati al fine di produrre energia in eccesso per essere immessa e venduta nella rete nazionale.

7.2 La via biochimica: Idrolisi enzimatica

Il bagasso della canna da zucchero, come si è già detto in precedenza per quanto riguarda le biomasse, è costituito principalmente da lignina, cellulosa ed emicellulosa.

Attraverso il processo di idrolisi è possibile separare tali elementi ed utilizzarli come materie prime nella produzione di etanolo, per quanto riguarda l'emicellulosa e la cellulosa, e nella produzione dei energia termica per quanto riguarda la lignina.

Fino ad ora il solo metodo usato industrialmente per la separazioni di tali macromolecole è stata l'idrolisi acida. È un processo che prevede il trattamento delle biomassa con acidi diluiti, prevalentemente solforico e cloridrico. Presenta una bassa efficienza nella separazione dei componenti e genera ingenti quantità di residui di difficile smaltimento. Avviene ad alte Temperature e Pressioni, e ha bisogno di una strumentazione in grado di resistere alla corrosione; questo insieme di condizioni problematiche hanno fatto sì che la ricerca iniziasse ad elaborare alternative maggiormente viabili.

Attualmente la soluzione più promettente all'idrolisi acida è l'idrolisi enzimatica. È un bioprocesso che sfrutta l'azione di un complesso di enzimi in grado di rompere i legami che tengono uniti lignina cellulosa ed emicellulosa e liberare gli zuccheri utili alla produzione di bioetanolo.

Nell'idrolisi enzimatica, a differenza che in quella acida, le biomasse devono essere pretrattate con sostanze generalmente acide, ma solo per agevolare l'azione degli enzimi nelle fasi successive del processo.

7.2.1 Il Pre-trattamento

La struttura complessa e compatta delle biomasse rende necessario sommetterle ad un pre-trattamento fisico e/o chimico precedente all'idrolisi enzimatica. Tale trattamento ha lo scopo di rimuovere la lignina e l'emicellulosa, ridurre la cristallinità della cellulosa e aumentare la porosità dei materiali in modo da rendere la cellulosa stessa più accessibile all'attività degli enzimi.

Esistono vari metodi di pre-trattamento per il bagasso della canna da zucchero, sia di tipo fisico che chimico e biologico; se ne elencano alcuni tipi con le principali funzioni:

Acido diluito, "steam explosion", "steam explosion" con catalisi acidi: idrolisi parziale e solubilizzazione dell'emicellulosa, redistribuzione della lignina sulle fibre superficiali e frazionamento delle fibre;

Acqua calda: rimozione dell'emicellulosa e di parte della lignina;

Succo di Lime: rimozione della lignina;

Ossidazione umida e esplosione umida: rimozione e parziale ossidazione della lignina, solubilizzazione e ossidazione di parte dell'emicellulosa;

AFEX: separazione della lignina e depolimerizzazione di emicellulosa e cellulosa;

Organosolv/Alcell: rimozione della lignina e della emicellulosa.

Método	Catalisador	t(min), T(°C)	Condições da Hidrólise Enzimática	Rendimento da glicose (%)	Rendimento da Xilose (%)	Referências
AFEX	NH ₃ conc.	5, 90	1% glicano, lavado, 15 FPU / g celulose	96	77,7	Dale, 1982
ÁLCALI	Ca (OH) ₂	4 semanas, 55	1% glicano, lavado, 15 FPU / g celulose	92	52,8	Kaar, 2000
Hidrólise ácida – 1	H ₂ SO ₄ 0,49 %	20, 160	1% glicano, lavado, 15 FPU / g celulose	91,6	91,2	Kálmán, 2002
Hidrólise ácida – 2	H ₂ SO ₄ 5 %	90, 120	3 % de sólidos, lavado, 15 FPU / g sólidos, 72 h	54,6	100	Varga, 2002
Vapor-1	H ₂ SO ₄	5, 190	5 % de sólidos, lavado, 25 FPU / g sólidos, 48 h	73,6	61	Mosier et al, 2005
Vapor-2	SO ₂	5, 190	2 % de sólidos, lavado, 15 FPU / g sólidos, 96 h	90	84	Varga, 2004
Explosão a vapor	H ₂ O	15, 190	1 % glicano, lavado, 15 FPU / g celulose	85,2	26,3	Lloyd, 2005
Oxidação com H ₂ O, solução fraca de ácido ou álcali	O ₂ , NO ₂ , CO ₃	15, 190	2 % de sólidos, lavado, 25 FPU / g sólidos, 24 h	74	53,7	Ohgren et al, 2005.

(Galbe e Zacchi 2007).



Figura 25: i diversi tipi di pretrattamento con le relative caratteristiche di processo.

I principali obiettivi su cui si sta lavorando nell'implementazione del pretrattamento del bagasso di canna da zucchero sono:

riduzione della formazione di prodotti in grado di inibire l'attività degli enzimi o del meccanismo di fermentazione;

implementazione della separazione della lignina dal bagasso;

sviluppo di un pretrattamento di tipo biologico

massimizzazione dell'accessibilità al bagasso da parte dell'azione enzimatica;

minimizzazione della perdita di zuccheri;

massimizzazione dell'ottenimento di prodotti con valore aggiunto senza che debbano essere sottoposti ad ulteriori trattamenti (come la lignina che può essere riutilizzata nella produzione di energia termica)

Minimizzazione dell'utilizzo di energia, di prodotti chimici e impianti costosi;

Ottimizzazione del processo per il passaggio alla scala industriale.

7.2.2 *L'idrolisi enzimatica*

Il bagasso della canna da zucchero è formato dalla emicellulosa che sostiene la struttura della biomassa tenendo insieme la cellulosa e la lignina. Vi sono inoltre i polisaccaridi che rafforzano tale legame mantenendo unite le fibre trasversalmente. La lignina, situata nella parte più esterna, ha la funzione di proteggere la biomassa da attacchi esterni di tipo fisico e di tipo chimico.

Lo scopo dell'idrolisi enzimatica è quello di utilizzare l'attività degli enzimi al fine di distaccare un componente dall'altro.

Tale separazione avviene per merito di un complesso enzimatico in grado di disunire la emicellulosa e la lignina dalle fibre di cellulosa.

All'interno del complesso enzimatico sono presenti anche degli enzimi "accessori", come lo xilosi per esempio, che hanno la funzione di pulire la fibra e agevolare l'azione degli enzimi incrementando l'efficienza del processo di digestione della cellulosa. È proprio in quest'ultima infatti, che si trova il materiale di interesse per l'industria energetica, il glucosio. Tale zucchero viene successivamente fatto fermentare insieme al succo di canna o alla melassa estratti in precedenza, permettendo di incrementare la quantità di etanolo prodotto del 30 % senza che sia necessario aumentare l'area coltivata.

Gli enzimi che agiscono in tale idrolisi sono la Endoglicanase, la cellobioidrolasi e la beta-glicolisidase. La prima agisce sulla cellulosa e produce Cellulosa amorfa e Oligosaccaridi solubili, la seconda agisce prelevando da due a quattro unità dalle estremità delle catene dando luogo a tetra-saccaridi mentre la terza anch'essa è utile alla digestione della cellulosa.

Le caratteristiche principali dell'idrolisi enzimatica sono:

selettività degli enzimi con bassa formazione di sub prodotti;

costi ridotti per il trattamento dei residui del processo;

condizioni di processo non critiche ($T=60^{\circ}\text{C}$ e pH neutro);

Gli enzimi sono biodegradabili;

Il rendimento dell'idrolisi raggiunge l'85%.

Tabella 2: paragone fra idrolisi acida ed idrolisi enzimatica

Idrolisi Acida	Idrolisi Enzimatica
Condizioni aggressive e critiche	Condizioni non aggressive e lontane dalla criticità
Basso rendimento	Alto rendimento
Forma sub-prodotti che inibiscono la fermentazione	Evita la formazione di sostanze in grado di inibire il processo di fermentazione
Basso costo di installazione	Costi ancora elevati ⁹
Bassi tempi di contatto	Elevati tempi di contatto ¹⁰

Nel processo di idrolisi vi sono dei fattori limitanti su cui si sta cercando di lavorare:

l'inibizione del prodotto effettuata dalla glucosio e dalla cellulosio

il legame improduttivo della cellulosio con la cellulosa

gli enzimi che sono assorbiti dai pori della lignina e non raggiungono la cellulosa

Lo snaturamento e la perdita di attività enzimatica dovuta alla estrazione meccanica, alla attività proteolitica o alla bassa stabilità.

Il processo di idrolisi viene attualmente condotto separatamente dalla fermentazione; si sta ricercando per creare un complesso enzimatico che permetta di unire i due processi, ovvero di evitare l'inibizione della cellulosa da parte dei prodotti della fermentazione, e di evitare la contaminazione dell'etanolo prodotto. Tale implementazione di processo è di notevole importanza dato che permetterebbe di diminuire i volumi di processo e di conseguenza i costi.

Gli altri miglioramenti del processo riguardano:

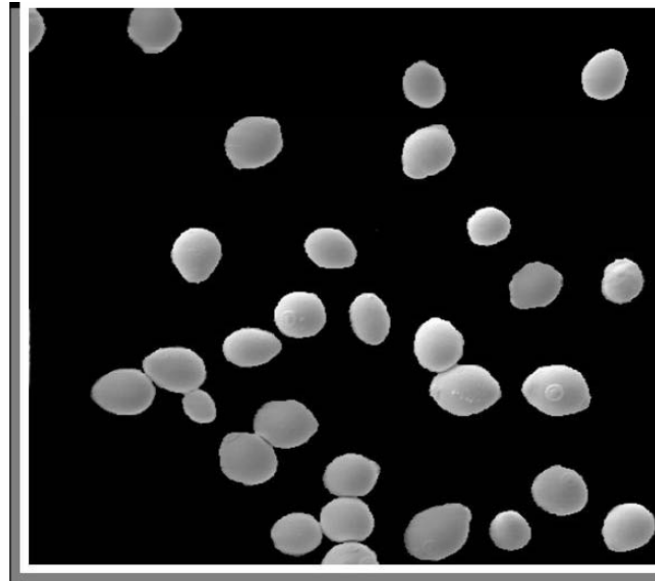
l'aumento del rendimento del processo di idrolisi fino a 90-95% ;

processi con alta concentrazione

⁹ Le ragioni dei costi elevati sono relativi al fatto che è un impianto non ancora diffuso a livello industriale e che si sta tutt'ora ricercando sugli enzimi adeguati. L'ottimizzazione del processo e la sua trasposizione su scala industriale comportano un notevole impegno dal punto di vista economico.

¹⁰ Ad alti tempi di contatto corrisponde un reattore con un volume maggiore.

elaborare un complesso enzimatico in grado di sopportare gli eccessi di glucosio;
aumentare la velocità di reazione degli enzimi.



S. cerevisiae

Figura 26: visione della Saccharomyces Cerevisiae al microscopio

Il processo di fermentazione a dare etanolo è lo stesso già presente nella produzione di etanolo di prima generazione. I microrganismi quali la Saccharomyces Cerevisiae (lievito tipico della preparazione del pane), detti facoltativamente aerobici, in presenza di ossigeno hanno una elevatissima velocità di crescita che rallenta notevolmente in condizioni anaerobiche dato che usa la maggior parte dell'energia che sintetizza dai nutrimenti per produrre il proprio etanolo.

Nella figura che segue si riporta lo schema di funzionamento del processo

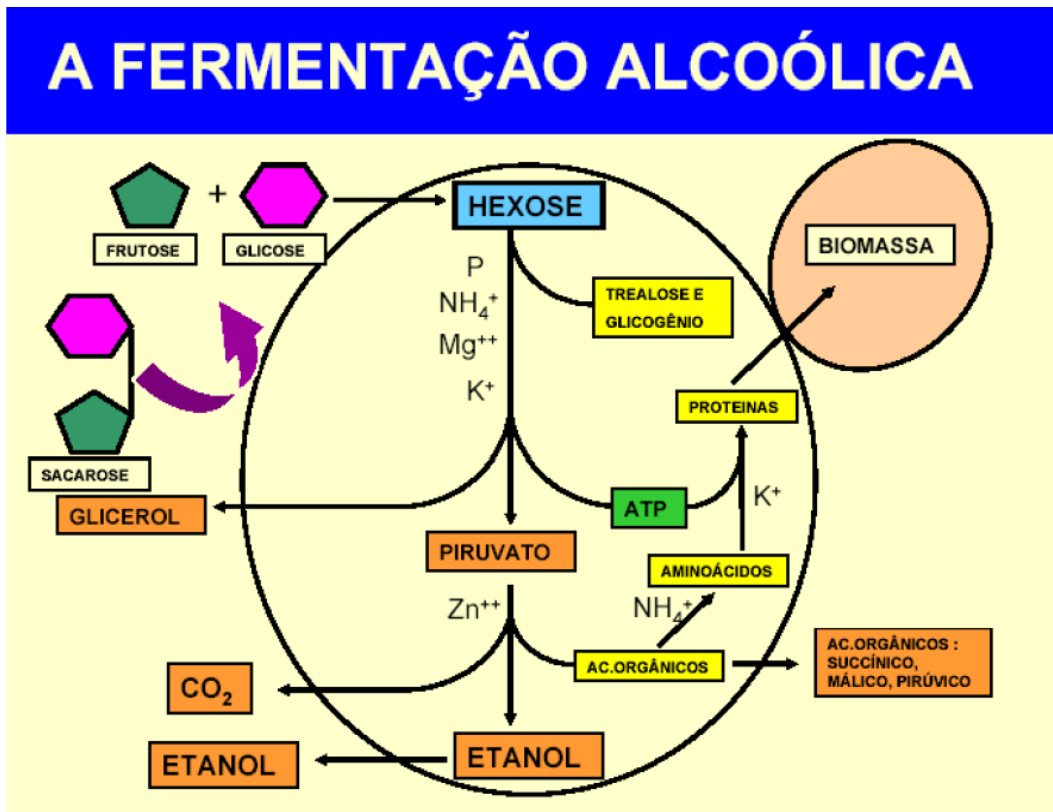


Figura 27:schema di funzionamento della fermentazione alcolica

fermentativo. Gli zuccheri producono acido piruvato per via glicolitica; l'acido piruvico(piruvato) in assenza di ossigeno dà luogo a differenti prodotti (alcoli ed acidi organici) fra cui l'etanolo è il favorito.

Tale processo, essendo già largamente attivo a livello industriale in tutte le bioraffinerie del Brasile, è molto più evoluto rispetto all'idrolisi enzimatica ed al pretrattamento. Nonostante ciò data la grande utilità del processo e l'apparentemente infinita profondità che può essere raggiunta al giorno d'oggi nella ricerca in campo biogenetico, si continua a ricercare al fine di ottenere:

Un trattamento con basso costo per eliminare le sostanze che inibiscono la fermentazione;

Usare un liquido idrolizzato con una maggior concentrazione di zuccheri per poter aumentare la produttività con volumi costanti;

Aumentare la tolleranza dei microrganismi alle sostanze che li inibiscono;

Migliorare la fermentazione delle pentosi (5 atomi di carbonio).

Ridurre il consumo di acqua:

Riutilizzando le correnti di processo

Riciclando la vinazza prodotta

Il costo della produzione di bioetanolo per via idrolitica varia in funzione dei tipi di pretrattamento e idrolisi utilizzati:

Processo	USD/L
H ₂ SO ₄ diluído	0,373
HCl concentrado	0,507
Organosolv	1,348
Explosão com vapor + Hidrólise enzimática	0,388
Pré-tratamento com vapor de amônia + Hidrólise enzimática	0,691
Explosão com vapor + Hidrólise enzimática + Fermentação de pentoses e glicose	0,453

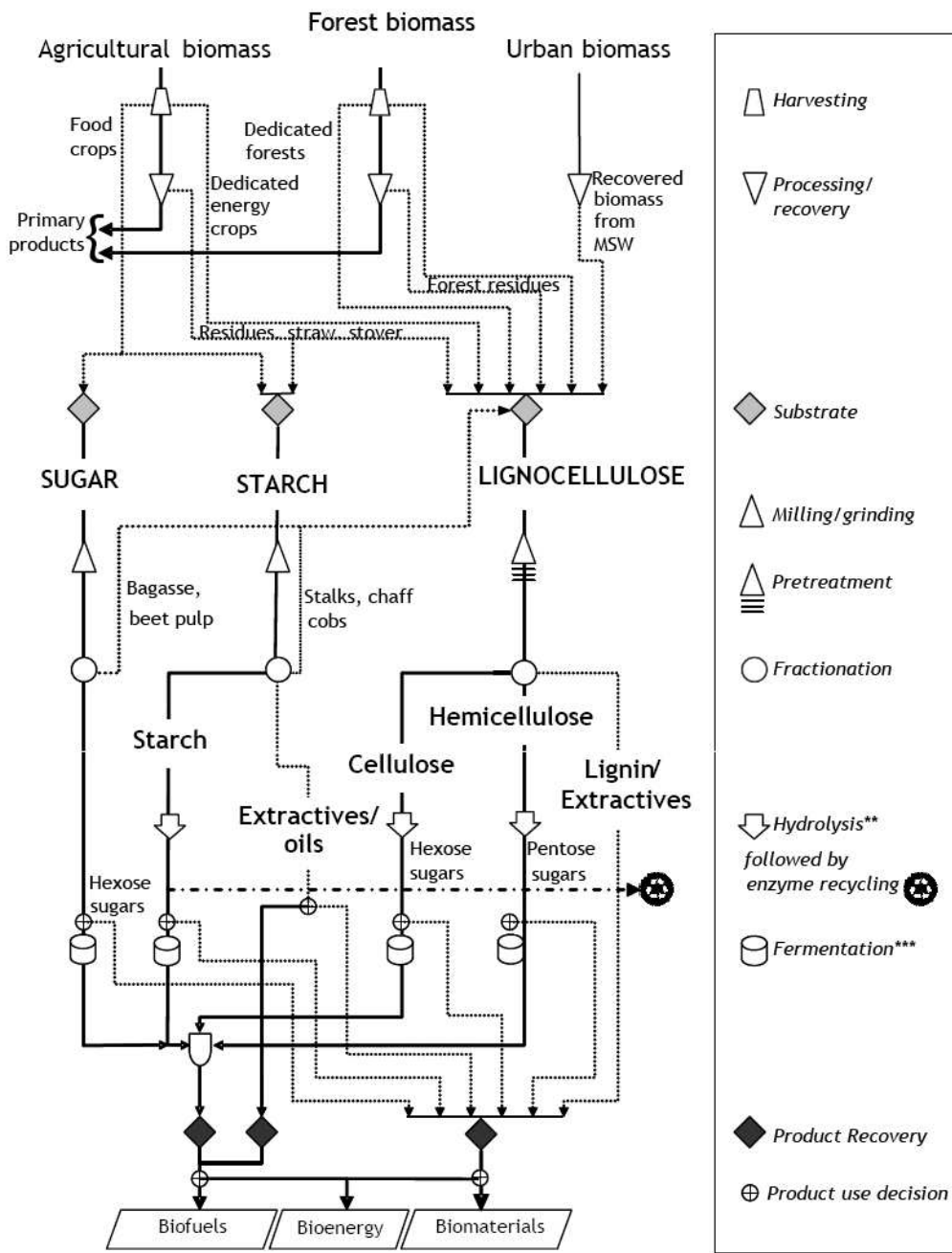
Maiorano et al, 2000

Figura 28: costo della produzione di etanolo in funzione del processo di idrolisi utilizzato.

7.2.3 *schema di impianto*

Si noti nello schema di processo quanti differenti tipi di biomassa possono essere utilizzati nella produzione di etanolo attraverso l'idrolisi enzimatica. Il processo è estremamente versatile e proprio per questa ragione un impianto di questo tipo rappresenta un investimento molto promettente in zone in cui l'agricoltura è molto diffusa e sono presenti grandi quantitativi di biomassa.

In seguito si riportano i differenti schemi di processo possibili.



* Pretreatment technologies can include water-based, acid, alkali and organic chemical treatments as well as physical processes.

** Enzymatic hydrolysis includes enzyme production and potential recycling.

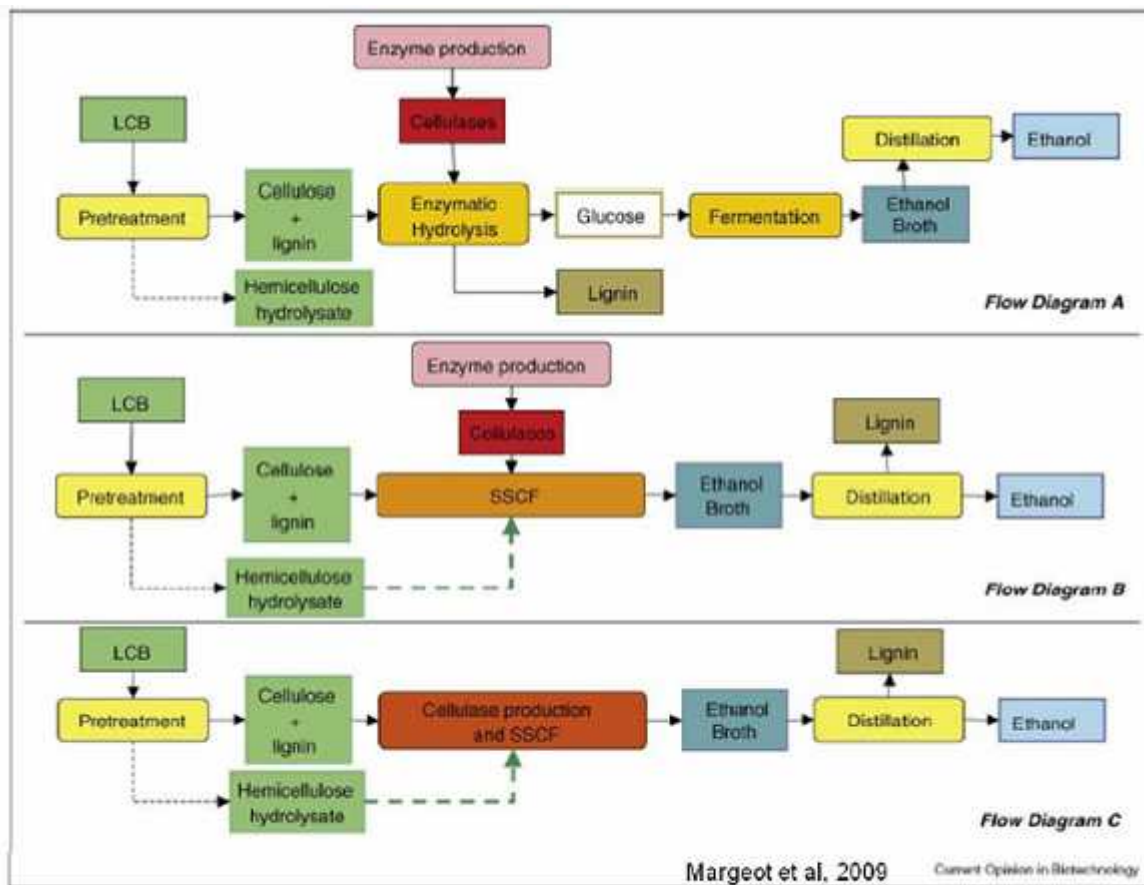
*** Fermentation stage includes yeast production.

Source: Mabee *et al.*, 2005

Figura 29: schema di impianto in funzione dei differenti tipi di biomassa nell'idrolisi enzimatica.

Qui di seguito si riporta invece uno schema dei tipi di processo ipoteticamente adatti alla valorizzazione del proprio bagasso di canna da zucchero.

Il primo rappresenta il metodo convenzionale, nel secondo il processo di idrolisi enzimatica e fermentazione sono condotti simultaneamente nello stesso reattore, nel terzo invece c'è il processo come è stato consolidato nel 2009.



Flowsheet of production of bioethanol from lignocellulosic biomass. Flow diagram (A), 'conventional' process. Flow diagram (B), simultaneous saccharification and co-fermentation process (SSCF). Flow diagram (C), consolidated bioprocessing (CBP). LCB, lignocellulosic biomass. Dotted lines represent optional process configuration (depends on pretreatment used).

Figura 30: differenti schemi di processo dell'idrolisi enzimatica del bagasso al fine di produrre etanolo; (A)convenzionale, (B) idrolisi e fermentazione simultanee , (C) bioprocesso consolidato.

7.3 La Via Termochimica: Biomass to liquids (BTL)

La via termochimica per la produzione di biocombustibili è basata principalmente su tecnologie esistenti da decenni. In passato si è sempre cercato di trasformare il carbone, coal-to-liquids, ma al giorno d'oggi ha preso piede una nova tecnologia, chiamata Biomass-to-liquids, in cui il processo di sintesi prevede come intermedio di processo il syngas (ottenibile da qualsiasi tipo di biomassa e non solo).

In estrema sintesi il processo prevede la produzione di biosyngas che costituisce materia prima per la produzione di energia elettrica, per la sintesi di Fischer-Tropsch o per l'industria chimica in generale. La sintesi di FT è di interesse specifico per la produzione di biocombustibili, dato che a partire dal gas di sintesi si può ottenere una vasta gamma di combustibili, sia per autoveicoli, ma anche per navi e aerei.

7.3.1 *La Sintesi di Fisher Tropsch*

Furono i chimici tedeschi Franz Fischer e Hans Tropsch, ricercatori presso l'*Istituto Kaiser Wilhelm of Coal Research*, a brevettare il processo nel 1925. Il primo impianto pilota venne realizzato in Germania nel 1934, mentre l'applicazione su scala industriale avvenne nel 1936. Il processo Fischer-Tropsch ebbe un ruolo rilevante nella Germania nazista durante il periodo della seconda guerra mondiale, fornendo energia tramite gassificazione del carbone e quindi evitando la necessità di fare ricorso alle scorte estere di petrolio.[1]

In Sudafrica, a seguito dell'embargo petrolifero durante il periodo dell'apartheid, nacque negli anni 1950 la compagnia Sasol con lo scopo di sfruttare la gassificazione delle grandi riserve interne di carbone per produrre combustibili che potessero soddisfare il fabbisogno nazionale tramite il processo Fischer-Tropsch. Ancora oggi la Sasol è molto attiva nell'ambito della ricerca e dell'applicazione di questa tecnologia.

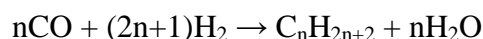
Nel 1993, a Bintulu (Malaysia), la Shell costruì un impianto che produce il gas di sintesi necessario per attuare il processo Fischer-Tropsch partendo dal gas naturale; tale tecnologia viene definita *Gas-to-Liquids* per distinguerla dalla

Coal-to-Liquids originariamente sfruttata in Germania e Sudafrica. Attualmente l'uso del gas naturale è divenuto prevalente.

Chimicamente il processo consiste in una riduzione del monossido di carbonio (CO) ad opera dell'idrogeno (H₂) in condizioni di temperatura comprese tra i 170 ed i 220 °C e pressione di 20bar. La reazione viene condotta su un letto di catalizzatore costituito da ossido di cobalto, cobalto metallico, ossido di magnesio e diossido di torio supportato da kieselguhr. In tal modo è possibile ottenere idrocarburi caratterizzati da diversa grandezza della catena carboniosa e diverso grado di saturazione.

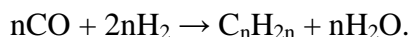
L'equazione chimica che governa in generale la formazione di alcani è

Equazione 4



mentre quella relativa alla formazione di alcheni è:

Equazione 5



Il meccanismo di reazione implicato prevede l'iniziale formazione di un complesso cobalto-carbonilico (l'effettivo catalizzatore) che successivamente reagisce con l'idrogeno formando un carbinolo. Due molecole di carbinolo danno quindi una reazione di condensazione formando un prodotto che reagisce col monossido di carbonio e con l'idrogeno producendo il cobalto-carbonile e un nuovo complesso metallico alchilato. Il meccanismo è di tipo "a catena" e per ogni ciclo si ha un allungamento della catena alchilica fino al punto in cui avviene la reazione di rottura che porta alla formazione del cobalto-carbonile originario, di acqua e dell'idrocarburo finale.

Da 1 m³ di miscela di CO + H₂ si ottengono 130-140 g di miscela idrocarburica, con un rendimento in peso del 61,9-66,7%. Le benzine ottenute hanno numero di ottano basso (massimo 40) e sono dunque necessari ulteriori trattamenti quali il reforming o l'aggiunta di antidetonanti. La frazione altobollente è un ottimo carburante per motori Diesel.

Il vantaggio principale è che il processo di sintesi FT non è sottoposto a restrizioni d'uso, di conseguenza, non solo può essere utilizzato a livello

industriale senza problemi legislativi, ma la stessa ricerca è aperta a qualsiasi gruppo di ricerca che possa essere interessato al suo miglioramento.

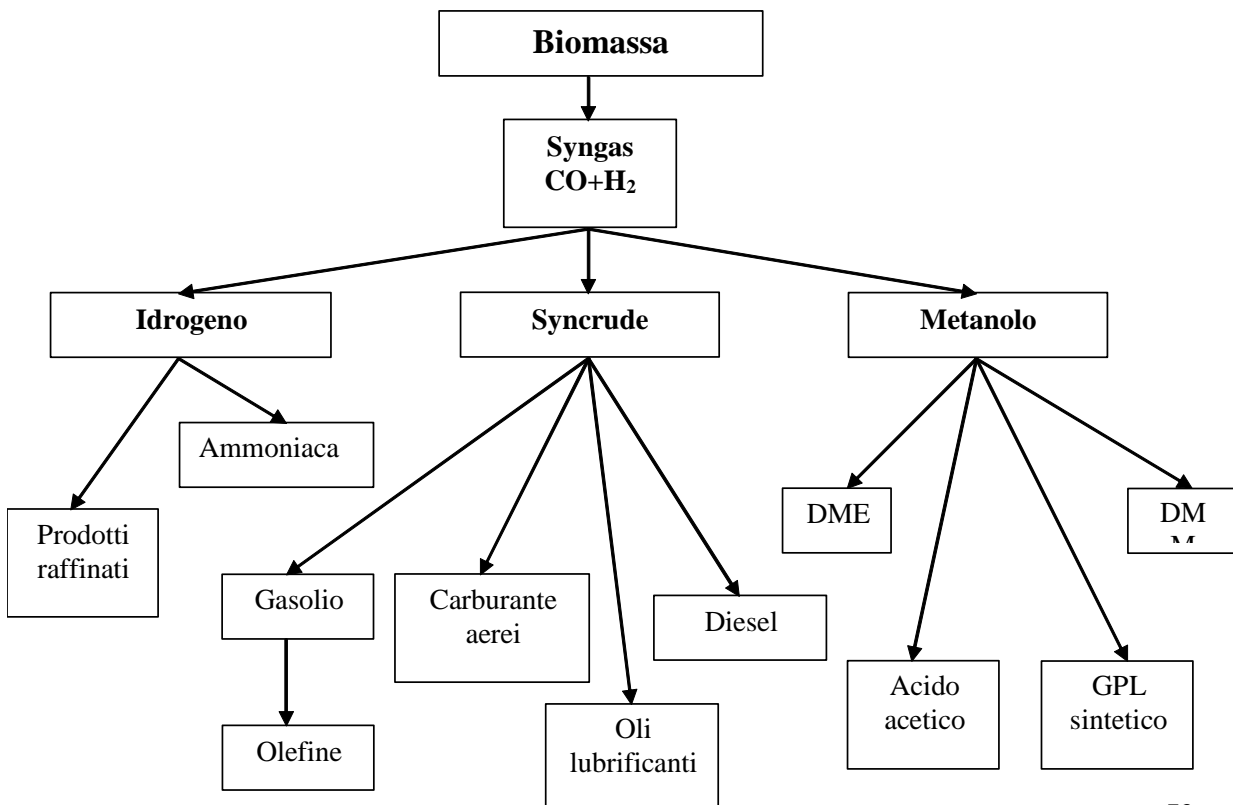
7.3.2 *Applicazione industriale*

La produzione di bio-syngas apre gli orizzonti commerciali di una bioraffineria come produttore di materia prima per numerosi processi chimici. Ogni componente del gas può essere riconosciuto, separato e utilizzato singolarmente. Nonostante ciò, vi sono dei fattori chiave che limitano la diffusione di tale processo:

- la produzione di un gas sufficientemente libero da impurezze;
- gli alti costi di investimento e di funzionamento confrontati con i costi correnti delle produzioni aventi come base l'olio minerale.

I residui volatili, come già accennato possono rappresentare un limite nella produzione su larga scala, ma alcune imprese fra cui la Choren, la Ensyn e la Enerkem hanno dimostrato che gli alti costi di rimozione degli stessi sono adeguatamente ricompensati dal fatto che sono impiegati come materia prima per prodotti chimici ad alto valore aggiunto.

Possono essere ottenuti differenti tipi di combustibile in funzione del processo utilizzato.



La biomassa lignocellulosica secca viene sottoposta ad elevate temperature in presenza di aria o ossigeno puro in regime controllato, per far sì che non avvenga il processo di combustione ma bensì la gassificazione della sostanza organica. Si producono prevalentemente CO e H₂, ma anche CO₂, metano ed altri composti più pesanti a base di carbonio. Il gas generato viene pulito attraverso la rimozione dei residui, quindi filtrato e stipato per essere riutilizzato.

Il processo BTL comprende processi di pirolisi e gassificazione, e non bisogna ignorare i grandi quantitativi di calore generati che permettono di produrre vapore e dunque energia.

La sintesi di Fischer Tropsch può dar luogo ad una vasta gamma di idrocarburi, così come rilascia grandi quantità di calore dovute alla alta esotermicità delle reazioni.

I miglioramenti del reattore hanno sempre avuto come scopo principale quello di migliorare la rimozione del calore e il controllo della temperatura. Per quanto riguarda il catalizzatore si punta a massimizzare l'attività, il tempo di vita utile e la selettività. Come già accennato, il processo dà luogo a olefine, paraffine e prodotti ossigenati quali alcoli, aldeidi, acidi e chetoni con acqua come sub prodotto.

La proporzione dei composti presenti nel gas di uscita può essere regolata attraverso:

le temperature utilizzate;

il tipo e la composizione del catalizzatore;

la pressione di processo;

la composizione in entrata del gas di sintesi (in particolare la percentuale di CO e di H₂);

è inoltre possibile effettuare dei miglioramenti nei prodotti uscenti per quanto concerne le caratteristiche di qualità e purezza, che ne incrementano il valore.

In generale si può affermare che:

Alte temperature di processo danno luogo alla produzione di benzina sintetica e prodotti chimici di base.

Basse temperature danno luogo a WAXY PRODUCTS che possono essere rotti per produrre nafta sintetica, cherosene o gasolio.

Il gasolio prodotto dalla sintesi di FT è di alta qualità, ha caratteristiche energetiche simili a quelle del gasolio distillato a partire dal petrolio, ma con un alto numero di cetano ed un minor contenuto di zolfo. Anche la possibilità di produrre nafta ed altri distillati intermedi è molto attraente dal punto di vista commerciale, ma data la tendenza globale alla vendita di petrolio pesante, più economico rispetto al leggero perché più abbondante in natura, anche i composti leggeri cominciano ad offrire interessanti prospettive.

Tabella 3: proprietà fisico chimiche dei combustibili

Combustibile	Formula Chimica	Potenziale energetico MJ/l	Densità Kg/l	Numero di ottani	Numero di cetani	Funzionalità stoccaggio
Benzina	C4 – C12	31.2-32.2	0.72-0.77	90-95		No
Metanolo	CH ₃ OH	15.4-15.6	0.79	110-112		SI
Gasolio minerale	C15-C20	35.3-36.0	0.82-0.84	-	45-53	No
Gasolio BTL	C12-C20	33.1-34.3	0.77-0.78	-	70-80	No
Nafta	C5-C9	31.5	0.72	50		Si
Nafta BTL	C5-C9	31.5	0.72	40		Si
Dimethyl etere	CH ₃ OC H ₃	18.2-19.3	0.66-0.67	-	55-60	Si
Idrogeno	H ₂	8.9	0.074	106		Si

La gassificazione è un processo chimico-fisico complesso mediante il quale si trasforma un combustibile solido (legno, scarti agricoli, rifiuti) in un combustibile gassoso.

Al fine di ottenere un buon livello di efficienza è bene che il tenore di umidità sia al di sotto del 20%; può essere necessario tritare la materia lignocellulosica per

aumentare la superficie di contatto e dunque incrementare lo scambio interfascio gas-solido.

Le tecniche di essiccazione sono piuttosto avanzate ma richiedono grandi quantitativi di energia, ma può essere sfruttato il calore del gas in uscita attraverso un sistema rigenerativo come quello mostrato in figura.

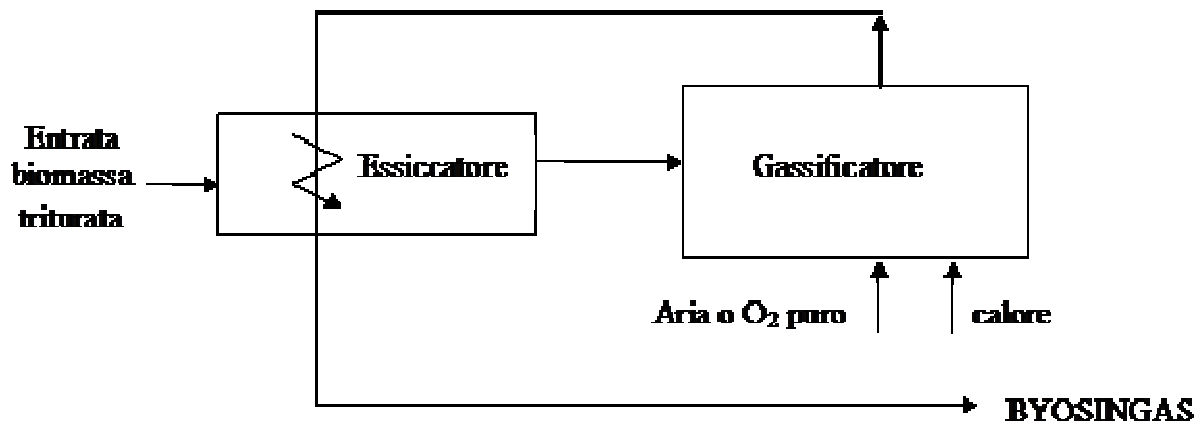


Figura 31: sfruttamento del gas caldo nel processo di essiccazione

Partendo da una materia prima sufficientemente trattata in quanto a dimensione e tenore di umidità, il processo si realizza in 2 fasi:

una prima fase di pirolisi in cui si ottiene una parziale “distillazione” del legno;

una seconda fase di gassificazione in cui i prodotti della pirolisi reagiscono con l'agente gassificante dando origine a vari prodotti di cui alcuni compatibili.

Il processo consiste nell'ossidazione incompleta (ottenuta limitando il contenuto di ossigeno), a temperature comprese fra 700÷1500°C in funzione del tipo di processo e catalizzatore utilizzati. Il prodotto risultante, il syngas, (detto gas di gasogeno) è un composto caratterizzato da un potere calorifico inferiore variabile (valori intermedi attorno a 10.000 kJ/Nm³) e può essere utilizzato sia per la produzione di biocombustibili sia per una ulteriore combustione in motori a gas sia in turbine a gas per generare energia elettrica.

Un sistema di gassificazione completo comprende: gassificatore, ciclone di abbattimento delle polveri, sistema di raffreddamento del gas, sistema di lavaggio

(*cleaning*) del gas, sistema di separazione delle condense ed un sistema finale di depurazione delle polveri.

I vantaggi della gassificazione rispetto alla più tradizionale combustione possono essere così riassunti:

- elevato rendimento di generazione elettrica, anche a piccola scala;
- buone prospettive di utilizzo in impianti di teleriscaldamento (central heating plant, combined heat and power generation CHP);
- emissioni all'esterno più contenute.

Per quanto riguarda l'utilizzo del biosyngas nella sintesi di FT, invece il biosyngas prodotto presenta alcune problematiche in più rispetto all'utilizzo del gas di sintesi tradizionale, in particolar modo influisce la presenza di notevoli quantità di impurezze all'interno del gas.

In alternativa alla gassificazione descritta, per superare il problema della depurazione del gas, il processo può essere fermato alla fase di pirolisi, 450-600 °C in assenza di ossigeno, per formare principalmente un bio-petrolio liquido ed ulteriori prodotti solidi e gassosi. Il bio-petrolio presenta caratteristiche simili al greggio e di conseguenza è facilmente trasportabile, può essere usato come materia prima in chimica fino a, dopo esser raffinato, nella produzione di combustibili sintetici.

I gassificatori possono essere a letto fisso o a letto fluido (bollente o circolante) e si distinguono in funzione del tipo di ossidante utilizzato (aria o ossigeno) e fra quelli che operano ad alta pressione o meno.

Come già enunciato in precedenza i prodotti della gassificazione o della pirolisi possono essere trasformati in combustibili sintetici e non solo. I primi catalizzatori utilizzati furono ferro e cobalto, tali sostanze sono facilmente avvelenabili dai residui solidi presenti nel biosyngas. Il reforming del catalizzatore è un processo particolarmente caro che pregiudica la stabilità economica del sistema.

Al momento esistono quattro tipi di reattori utilizzati nel processo di sintesi FT:

- Reattore tubolare a letto fisso;
- Reattore a letto fluido con ricircolo operante ad alte T;
- Reattore a letto fluido fissato, progettato dalla SASOL con l'avanzamento sviluppato dalla Synthol;

Il Reattore a letto fluido fissato ha rimpiazzato quello a letto fluido con ricircolo per via del fatto che ha permesso di dimezzare i costi di investimento iniziali ed ha ridotto i costi di funzionamento. Inoltre è un tipo di reattore estremamente flessibile in termini di quantitativi, può arrivare a produrre fino a 20'000 barili di combustibile al giorno.

La via termochimica risulta dunque estremamente cara per via dei capitali di investimento e dei costi di funzionamento elevati. Le sfide a livello tecnologico restano produrre un byosingas su larga scala con le caratteristiche adeguate alla sintesi FT o in alternativa sviluppare catalizzatori in grado di resistere all'avvelenamento dovuto alle impurezze.

Nonostante i numerosi anni di ricerca, la possibilità di sfruttare il bagasso di canna da zucchero attraverso la gassificazione resta un'idea lontana e ancora difficilmente realizzabile. All'interno dell'università di San Paolo il professor: Valdimar Ushima ha eseguito numerose prove ma sfortunatamente i risultati conseguiti non paiono al momento molto promettenti.

In conclusione di quanto riportato, si può affermare che vi sono ancora delle lacune di carattere tecnico scientifico sulla gassificazione ed i sistemi di lavaggio (*cleaning*) del syngas che non permettono l'applicazione del processo BTL con bagasso di canna da zucchero come materia prima.

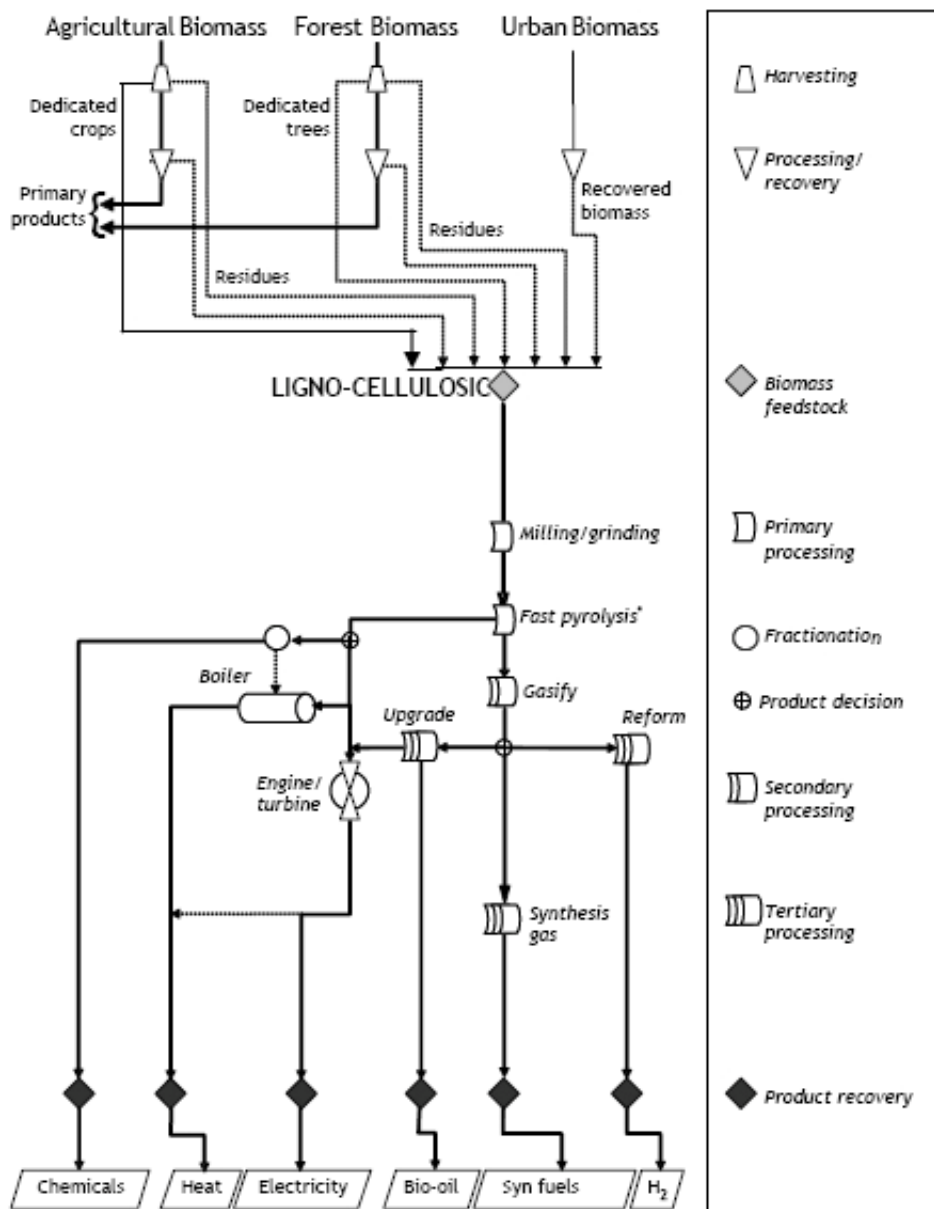
Ad oggi, il processo Biomass To Liquids più avanzato è quello utilizzato dalla Choren, a Friburgo, in Germania.

Non esiste ancora nessun impianto industriale che sfrutta il processo BTL per il bagasso della canna da zucchero; sarebbe opportuno provare a sviluppare un programma di simulazione e successivamente progettare un impianto pilota in grado di simulare il processo industriale per valutarne in maniera adeguata la potenzialità.

7.3.2.1 schema di impianto

Come visto per la via biochimica, nello schema di processo a seguire è facile notare l'estrema versatilità di un impianto di gassificazione per il quale,

Figure 35 Thermo-chemical conversion process overview using multi-feedstocks to produce multi-products.



*Fast pyrolysis produces a number of vapours which can be condensed into value-added products such as bio-oil.

Source: Mabee *et al.*, 2005

Figura 32: schema di processo dell'impianto di gassificazione di biomassa differenziato per differenti materie prime

esattamente come per la combustione, la materia prima può essere di differente natura.

Nel caso del bagasso di canna da zucchero il processo è composto dalle seguenti fasi:

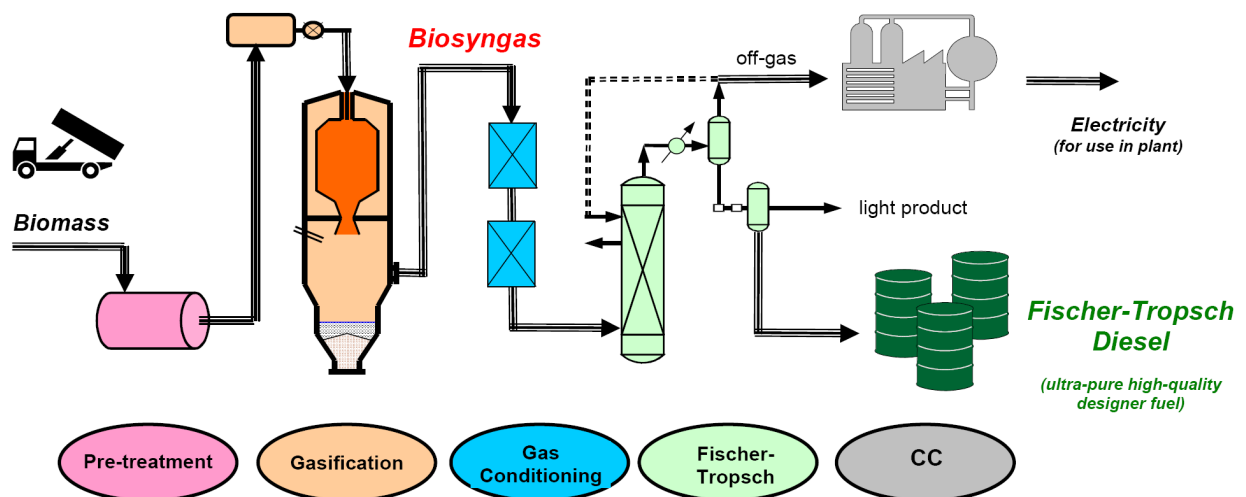
pretrattamento della biomassa;

La gassificazione e la produzione di Biosyngas;

La depurazione del gas;

La sintesi di Fisher Tropsch;

La separazione della corrente in uscita con la produzione di biocombustibile sintetico e valorizzazione della frazione leggera per la produzione di elettricità.



Schematic line-up of the integrated BTL plant.

Figura 33: scema di processo del processo BTL

Come già spiegato nel paragrafo precedente il processo può considerarsi composto da due parti principali che sono la gassificazione della biomassa a per generare il biosyngas e la sintesi di Fisher Tropsch per la produzione di biocombustibili sintetici.

In seguito si riportano i flussogrammi relativi maggiormente dettagliati.

Figure 33. Pyrolysis of biomass linked with gasification to produce syngas.

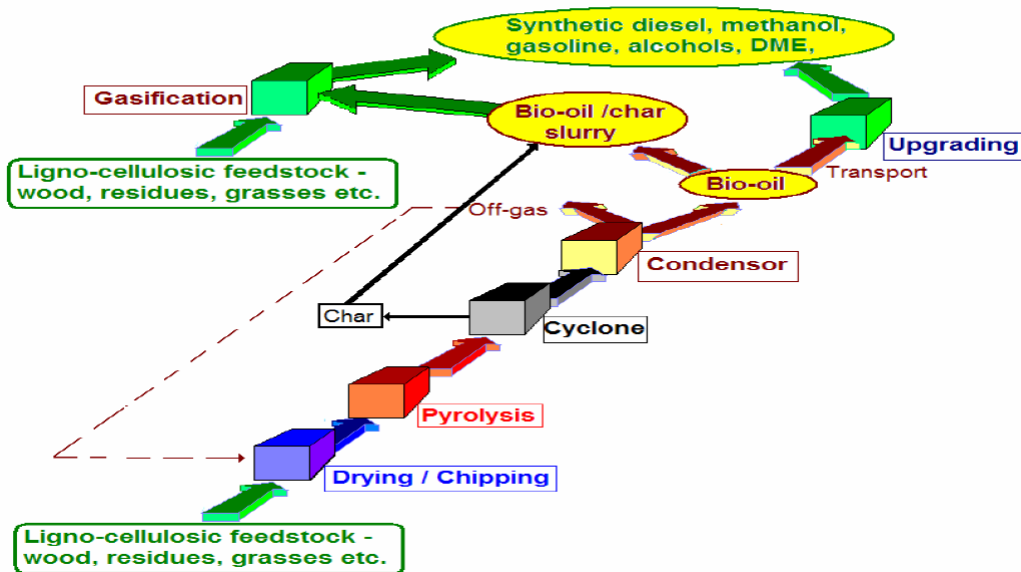


Figura 34: flussogramma della generazione di biosyngas a partire da biomassa lignocellulosica.

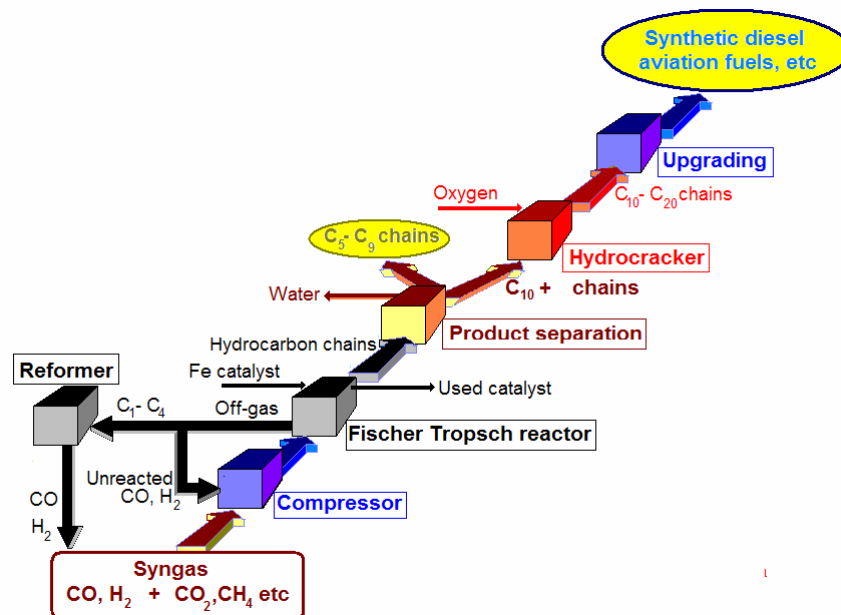


Figura 35: flussogramma del processo di conversione del syngas in combustibili sintetici.

8 L'impatto ambientale

La nozione di impatto ambientale

La norma [ISO 14001/96](#) definisce l'impatto ambientale come "qualunque modificazione dell'ambiente, negativa o benefica, totale o parziale, conseguente ad attività, prodotti o servizi di un'organizzazione"..

Per impatto ambientale deve intendersi l'insieme degli effetti rilevanti, diretti ed indiretti, a breve e a lungo termine, permanenti e temporanei, singoli e cumulativi, positivi e negativi, che progetti, pubblici o privati, hanno sull'ambiente inteso come insieme complesso di sistemi naturali e umani.

Come definire quanto un impatto ambientale possa essere significativo? Quando si getta una carta in terra, dell'olio usato nel lavandino, o semplicemente non effettuiamo la raccolta differenziata, in che modo possiamo dire se un impatto è maggiore di un altro? E soprattutto, vale la pena investire tempo e denaro nell'evitare di produrre o minimizzare tale impatto?

La definizione di impatto ambientale è un termine assolutamente relativo, ha bisogno di una serie di parametri di riferimento che possono essere previamente stabiliti o possono essere valutati dalle autorità competenti.

La normativa a riguardo, col passare degli anni si fa sempre più consistente e complessa, ma allo stesso tempo aiuta, per quanto sia possibile, il lavoro dei professionisti che operano nel campo.

8.1 Aspetti pratici e legislativi.

La valutazione di impatto ambientale (V.I.A.), oggi praticata per tutte le iniziative destinate ad incidere sul territorio, ha fra gli scopi primari quello di proteggere e migliorare la salute e la qualità della vita, mantenere la varietà delle specie, conservare la capacità di riproduzione degli ecosistemi e garantire l'uso plurimo delle risorse e lo sviluppo sostenibile.

La normativa italiana non prevede ancora un organico recepimento della direttiva 85/337/CEE, norma europea di riferimento del sistema di valutazione di impatto ambientale, giunta alla sua seconda edizione (direttiva 97/11/CE).

Il D.lgs. n. 4 del 16 gennaio 2008, meglio conosciuto come correttivo al T.U. ambientale ha apportato profonde modifiche all'intero meccanismo procedurale della valutazione di impatto ambientale.

Nonostante esista una procedura ben specifica, sia tecnica che amministrativa, lo scopo ultimo della maggior parte degli studi ambientali resta quello di ottenere una autorizzazione.

La 'VIA' di approvazione si presenta come una **procedura "interattiva"**, il progetto iniziale può subire diverse modifiche ed integrazioni in seguito ai risultati preliminari dello studio al fine di riuscire a soddisfare i requisiti minimi previsti dalla legge in quanto a impatto prodotto, conciliando l'investimento economico ed i conseguenti profitti degli investitori. Si può affermare che questo concetto è tanto più vero quanto i finanziamenti provengono da fonti private; in caso di utilizzo di fondi statali, un bilancio economico negativo provocato da un miglioramento delle condizioni ambientali può essere ritenuto un investimento giustificato dal miglioramento del benessere della popolazione e di conseguenza ugualmente incentivato dalla spesa demaniale.

Il nuovo T.U. ambientale ha ricondotto ad un corpo unico ed omogeneo (almeno questa era l'intenzione primaria del legislatore) tutte le norme che a livello nazionale e comunitario, a partire dal 1985, regolavano la disciplina della valutazione di impatto ambientale. L'art. 5 comma I, lett. b) del Decreto legislativo 152/2006 sancisce che per 'VIA' si intende "il processo che comprende lo svolgimento di una verifica di assoggettabilità, la definizione dei contenuti dello studio di impatto ambientale, lo svolgimento di consultazioni, la

valutazione del progetto, dello studio e degli esiti delle consultazioni, l'informazione sulla decisione ed il monitoraggio" e inoltre definisce, alla lettera c) l'impatto ambientale come *"l'alterazione qualitativa e/o quantitativa diretta o indiretta, a breve e a lungo termine, permanente e temporanea, singola e cumulativa, positiva e negativa dell'ambiente, inteso come sistema di relazioni fra i fattori antropici, fisici, chimici, naturalistici, climatici, paesaggistici, architettonici, culturali, agricoli ed economici, in conseguenza dell'attuazione sul territorio di piani o programmi o di progetti nelle diverse fasi della loro realizzazione, gestione e dismissione, nonché di eventuali malfunzionamenti"*. È opportuno mettere in evidenza la trasformazione della definizione di impatto ambientale avvenuta nell'ultimo trentennio (Luis Sanchez [25]); inizialmente era valutato solo in termini scientifici, come il livello di inquinamento dell'acqua o dell'aria, mentre al giorno d'oggi come ambiente è inteso anche il contesto sociale e culturale su cui un investimento industriale possa influire.

La normativa attuale, aderendo a quanto già affermato in passato, suddivide la 'VIA' in due sottocategorie: statale e regionale/provinciale, in relazione alla competenza su chi debba rilasciare l'autorizzazione alla realizzazione del progetto.

La mancata effettuazione della procedura 'VIA' quando è richiesta per legge in uno qualsiasi dei punti, provoca la nullità di tutte le autorizzazioni eventualmente ottenute in precedenza.

I soggetti coinvolti nell'iter sono principalmente il proponente o committente (chi presenta il progetto) e l'autorità amministrativa cui compete il rilascio del giudizio di compatibilità ambientale. Quest'ultima differisce a seconda si tratti di procedura statale o regionale; nel primo caso sarà competente principalmente il Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio ma in accordo con il Ministro per i beni e le attività culturali, mentre nel secondo la decisione spetta all'autorità individuata dalla Regione o dalla Provincia autonoma.

Le fasi che costituiscono la 'VIA' sono le seguenti:

1. **SIA E SCOPING** *Condizio sine qua non* per l'avvio della procedura di VIA è lo studio di impatto ambientale (Sia), tuttavia il T.U. ambientale prevede un'altra fase preliminare e facoltativa rispetto al Sia, cioè lo scoping "attivato allo

scopo di definire, in contraddittorio con le autorità competenti, le informazioni che devono essere riportate nello studio di impatto ambientale”, con lo scopo di realizzare un vero e proprio confronto tra il proponente e la P.A.

2. **DEPOSITO DOCUMENTI** L’apertura formale del meccanismo procedurale di valutazione di impatto ambientale si verifica con la richiesta di compatibilità ambientale all’autorità competente (art. 26 T.U.), a corredo della quale devono prodursi i seguenti documenti:

- SIA (studio di impatto ambientale);
- Progetto definitivo (non più preliminare come nelle normative previgente);
- Una sintesi non tecnica destinata all’informazione del pubblico (congruo numero di copie);
- Elenco autorizzazioni e altri atti necessari alla realizzazione e all’esercizio dell’opera
- Asseverazione del responsabile dello Studio di impatto ambientale.

La documentazione indicata deve essere inoltrata a corredo della domanda principale alle Regioni, Province e Comuni interessati dalla realizzazione del progetto. Nel caso di Via statale invece, la documentazione indicata dovrà essere spedita al Ministero dell’ambiente e della tutela del territorio, al Ministero per i beni e le attività culturali, alla/e Regione/i interessate e alla Commissione tecnico-consultiva per le valutazioni ambientali e ad altri Ministeri eventualmente interessati. Entro 30 giorni l’autorità competente valuta la completezza della documentazione presentata.

3. **PUBBLICITA’** Il committente deve mettere in condizioni il pubblico di poter conoscere il progetto che intende realizzare, oltre che attraverso il deposito nelle modalità prima esposte, mediante la contemporanea diffusione a mezzo stampa e sul sito web dell’autorità competente della notizia dell’avvenuto deposito. Chiunque abbia interesse può prendere visione del progetto ed inviare/esprimere pareri ed osservazioni da inviare all’autorità competente entro 60 giorni dal deposito.

4. **ISTRUTTORIA TECNICA** In questa fase l'autorità preposta valuta la completezza della documentazione (chiedendo eventualmente un'integrazione), verifica la correttezza dei dati fisici riportati, nonché degli strumenti previsionali adottati.

5. **DECISIONE** L'autorità competente conclude con provvedimento espresso e motivato il procedimento di Valutazione di Impatto Ambientale nei 150 giorni successivi alla presentazione dell'istanza. In considerazione della particolare complessità del progetto può prolungare il procedimento sino ad un massimo di altri 60 giorni, dandone comunicazione al proponente. Il correttivo (D.lgs. n. 4 del 2008) ha il pregio di aver fissato all'art. 26 comma II, i tempi massimi, certi e definiti per l'adozione della decisione finale: giustappunto la procedura Via deve concludersi nel termine 5 mesi ed il tempo complessivo, considerando le eventuali interruzioni per integrazioni o sospensioni, non può comunque superare i 330 giorni complessivi. L'inutile decorso di siffatto termine implica l'intervento sostitutivo del Consiglio dei Ministri, che deve pronunciarsi nel termine di 60 giorni.

6. **MONITORAGGIO EX POST** Il monitoraggio rappresenta la fase successiva al provvedimento di valutazione di impatto ambientale e si realizza attraverso il controllo operato dalle autorità competenti all'approvazione della compatibilità ambientale che avvalendosi del sistema delle Agenzie ambientali, sono chiamate ad individuare gli eventuali effetti negativi impreveduti ed attuare tutte le misure correttive opportune.

8.2 Aspetti tecnici e scientifici

Al di là degli aspetti burocratici ed amministrativi che regolano l'approvazione di un progetto, la condizione *sine qua non* per la quale può risultare possibile o impossibile ottenere i permessi per portare a termine un determinato progetto è oggi giorno l'effettuazione di un corretto studio dell'impatto ambientale indotto.

La necessità di produrre un'analisi preliminare completa delle conseguenze ambientali ha reso necessario lo sviluppo di tecniche adeguate in grado di spaziare fra tutti i campi di studio coinvolti.

Il fenomeno di globalizzazione avvenuto nell'ultimo decennio ha portato ad un ampliamento del campo d'azione delle imprese; allo stesso modo le conseguenze

indotte dall'immissione sul mercato di un prodotto hanno assunto rilevanza mondiale. Si è sentita dunque la necessità di pensare all'intero ciclo di vita del prodotto, il cosiddetto "Life Cycle Thinking" invece di limitarsi ad individuare gli effetti di una sola operazione condotta in un solo luogo, Ciò ha permesso di relazionare le differenti fasi del processo che oltre ad avvenire in luoghi che possono essere sostanzialmente lontani sono anche spesso svolte da imprese differenti. A livello pratico, tale necessità si è espressa con l'applicazione dell'LCA, il Life Cycle Assessment, che al giorno d'oggi rappresenta il miglior modo di effettuare la valutazione dell'impatto ambientale indotto dalla maggior parte dei prodotti industriali.

8.3 Life cycle assessment(LCA)

Il Life Cycle Assessment (Valutazione del Ciclo di Vita) rappresenta uno degli strumenti fondamentali per l'attuazione di una Politica Integrata dei Prodotti, nonché il principale strumento operativo del "Life Cycle Thinking". L'LCA è un metodo oggettivo di valutazione e quantificazione dei carichi energetici ed ambientali e degli impatti potenziali associati ad un prodotto/processo/attività lungo l'intero ciclo di vita, dall'acquisizione delle materie prime al fine vita ("dalla Culla alla Tomba").

Lo sviluppo dello studio del ciclo di vita cominciò in coincidenza della crisi petrolifera degli anni 70. All'epoca l'obiettivo che s'intendeva perseguire era una valutazione del processo produttivo al fine di razionalizzare il consumo delle fonti di energia e cercare di accrescere l'inserimento di fonti di energia alternative al petrolio. Di conseguenza il focus era prevalentemente energetico, gli aspetti ambientali erano considerati secondari.

Studiare il ciclo di vita di un prodotto permette di avere una visione globale, dando modo di valutare come le varie tappe di un processo produttivo o del consumo possano affettare l'ambiente, come possa variare il consumo di energia o l'efficienza di sfruttamento della materia prima.

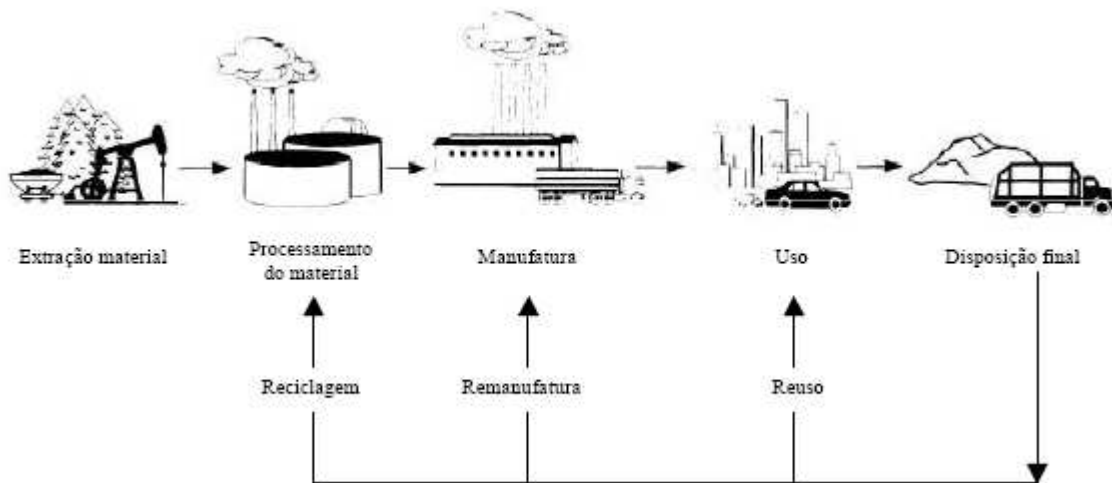


Figura 3 fasi del ciclo di vita di un prodotto.

Gli impatti indotti in ogni fase del ciclo di vita di un prodotto possono essere ridotti facilmente durante la fase di progettazione ma spesso anche a posteriori.

Tradizionalmente l'obiettivo principale della progettazione di un sistema produttivo è stato la riduzione massima dei costi, focalizzando la maggior attenzione solo in alcune fasi del processo, principalmente nella ricerca della materia prima e nel massimizzare la produttività. Con l'assunzione di importanza delle questioni ambientale ed energetica tale concetto ha subito consistenti modificazioni nelle ultime decadi.

Secondo Rubin & Davidson (2001), le migliorie nel sistema produttivo sono il risultato della riduzione delle materie prime e dell'energia necessarie alla fabbricazione di un prodotto così come il miglioramento del recupero di energie e materiali riciclabili nel consumo del prodotto. Di conseguenza affermano che il ciclo di vita di un prodotto sia un importante strumento per lo sviluppo di prodotti ambientalmente sostenibili, per prevenire l'inquinamento e ridurre la generazione di residui, rappresentando un parametro fondamentale per la corretta pratica della progettazione ingegneristica.

L'LCA di un prodotto può essere inoltre una fonte di informazione per i consumatori, in particolare di questi tempi in cui sta crescendo la richiesta di prodotti sostenibili sotto il maggior quantitativo di aspetti possibili. Costituisce

una forma di sensibilizzazione della popolazione al fine di mettere in evidenza le differenze fra i prodotti dal punto di vista energetico-ambientale.

La metodologia con cui viene effettuato lo studio del ciclo di vita di un prodotto influisce notevolmente sui risultati. Spesso differenti metodologie hanno condotto ad ottenere valutazioni significativamente contrastanti per lo stesso prodotto.

Oltre alla metodologia applicata, vari fattori possono influire sulla buona riuscita di un LCA; primo fra tutti è la raccolta dei dati; è la base su cui si basa lo studio e dev'essere assolutamente completa e ben fondata. Semplificazioni erronee nelle tappe del ciclo di vita o una conoscenza non sufficientemente approfondita del processo possono mettere in dubbio la validità dell'intero studio.

Per queste ragioni è necessario che lo studio sia fatto con assoluta sistematicità e seguendo delle linee guida possibilmente definite a priori per l'LCA di qualsiasi prodotto.

A livello internazionale la metodologia LCA è regolamentata dalle norme ISO delle serie 14040 in base alle quali uno studio di valutazione del ciclo di vita prevede: la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dell'analisi (ISO 14041), la compilazione di un inventario degli input e degli output di un determinato sistema (ISO 14041), la valutazione del potenziale impatto ambientale correlato a tali input ed output (ISO 14042) ed infine l'interpretazione dei risultati (ISO 14043).



Figura 37: schema delle fasi principali che costituiscono un LCA

A. *Definizione degli scopi e degli obiettivi* (Goal and scope definition): vengono stabiliti le finalità dello studio, l'unità funzionale, i confini del sistema analizzato, il fabbisogno di dati, le ipotesi di base ed i conseguenti limiti di rappresentatività. Una considerazione errata in questa fase dello studio quale una precisione eccessiva o una raccolta di dati eccessivi può causare problemi notevoli. Per esempio può aversi un incremento dell'investimento necessario o un aumento del tempo necessario, se non addirittura arrivare ad impedire il completamento dello studio.

È l'applicazione dell'LCA che definisce esattamente il livello di dettagli necessario e le semplificazioni che possano essere applicate.

Secondo la norma ISO 14040 l'obiettivo deve indicare l'applicazione finale, le ragioni per effettuare lo studio e il pubblico a cui è destinata la comunicazione dei risultati. Nello scopo devono essere descritti e considerati diversi fattori, fra i quali possono essere citati: le funzioni del sistema produttivo (o dei sistemi nel caso di studi comparativi), l'unità funzionale (l'unità di riferimento in uno studio di LCA), i limiti del sistema produttivo (quali unità devono essere incluse), i limiti geografici, i requisiti dei dati (qualità, numero, consistenza, ecc..), le ipotesi, le semplificazioni, le limitazioni, ecc..

Citando Chehebe (1998), in tale fase devono essere definiti:

Estensione: dove inizia e finisce lo studio del ciclo di vita;

Spessore: quanti e quali sottosistemi bisogna includere;

Profondità: il livello di dettaglio necessario ad un buon studio di LCA.

B. *Analisi di Inventario* (Life Cycle Inventory LCI): in questa fase vengono raccolti i dati al fine di poter ricostruire ed analizzare i flussi coinvolti nel ciclo di vita del sistema di processi e/o attività considerato; i flussi energetici, le materie prime, altre entrate fisiche, i prodotti e i sottoprodotti di processo, le emissioni di gas, gli effluenti liquidi, i residui solidi, i trasporti etc. vengono presi in esame e permettono di costruire il principale strumento di un LCA, il modello analogico del sistema reale che si sta studiando.

Nella raccolta dati stessa si ridefiniscono passo passo i requisiti stimati nella definizione degli scopi (fase A); spesso sorgono limitazioni o necessità di nuovi dati affinché sia consistente l'intera raccolta.

È fondamentale ottenere dati sui differenti flussi energetici di ognuna delle tappe del processo, considerando i tipi di combustibili, le fonti di elettricità utilizzate e l'efficienza di conversione e distribuzione della stessa.

Nella raccolta dei dati può essere molto utile identificare dei sotto insiemi; ciò permette di associare la produzione di sostanze inquinanti o il consumo di energia, ad esempio, ad una esatta fase del processo e saper dunque dove investigare in cerca di implementazioni.

I dati devono essere raccolti in funzione della giusta dimensione, generalmente essa è di tipo energetica o materiale. È fondamentale che tale parametro (la dimensione) sia costante nell'intero studio che altrimenti risulta inconsistente.

C. *Analisi degli impatti* (Life Cycle Impact Assessment, LCIA): è lo studio dell'impatto ambientale provocato dal processo o attività che ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni generate a seguito dei rilasci nell'ambiente e dei consumi di risorse calcolati nell'inventario.

Secondo il testo, ancora in discussione, della ISO 14042, il processo di valutazione dell'impatto deve essere composto almeno dai seguenti oggetti (ISO 1998 e Chehebe 1998):

Selezione delle categorie di impatto, indicatori e modelli. Per esempio la categoria di impatto "surriscaldamento globale" rappresenta le emissioni di

effetto serra calcolate all'interno dell'LCI, l'indicatore relazionato sarebbe il potenziale di riscaldamento globale (GWP, Global Warming Potential)¹¹

Classificazione dei dati dell'inventario nelle diverse categorie selezionate.

Caratterizzazione per mezzo della modellazione dei dati all'interno della categoria di impatto.

Le categorie usualmente utilizzate nella valutazione degli impatti sono; esaurimento di risorse non rinnovabili, riscaldamento globale, incremento del buco nell'ozono, tossicità umana, ecotossicità, acidificazione, ossidazione fotochimica, eutrofizzazione delle acque, impatti umani e sociali. (Chehebe, 1998).

La scelta delle categorie dipende strettamente dallo scopo e dagli obiettivi definiti per lo studio. In questa fase esiste una soggettività molto elevata, principalmente per le metodologie (modelli) che traducono il dato dell'inventario in un potenziale impatto. Per questo devono essere utilizzate metodologie basate sul conoscenza scientifico e, in quanto possibile, accettate a livello globale. Proprio per tale soggettività questa è una delle fasi che viene maggiormente messa in questione all'interno di un LCA.

D. *Interpretazione e miglioramento* (Life Cycle Interpretation): costituisce la fase conclusiva di un LCA ed ha lo scopo di individuare i cambiamenti per ridurre l'impatto ambientale dei processi/attività che costituiscono il sistema analizzato.

Bisogna verificare in che misura si siano raggiunti gli scopi e gli obiettivi dello studio definiti in precedenza.

Devono essere reinterpretate le ipotesi poste alla base dello studio e se necessario può essere utile effettuare una analisi della sensibilità dei risultati ad eventuali errori che possano essere stati commessi durante lo studio.

¹¹ GWP: è una misura per descrivere fino a che punto una fase può alterare l'equilibrio di entrata e uscita di energia dall'atmosfera. Quando è positivo, come nel caso dei gas serra, il gas comporta una generazione di calore in atmosfera. L'argomento sarà trattato in maniera più estesa nel seguito dato che è proprio l'indicatore che si è scelto di utilizzare nel seguente studio.

Tale fase dev'essere quella in cui vengono tratte le conclusioni e le raccomandazioni principali utili a minimizzare gli impatti ambientali riscontrati in modo che possa essere ottimizzata la progettazione.

Come si può dedurre dalla descrizioni delle varie fasi, le uniche in cui si possa seguire una linea principale valida per qualsiasi prodotto o processo, sono le prime due, la soggettività delle restanti impone una elevata professionalità e criticità da parte dei professionisti chiamati in causa. Spesso, per minimizzare l'errore umano ed aumentare la criticità si tende a creare un gruppo di lavoro composto da specialisti con competenze tendenzialmente differenti che spaziano da campi strettamente scientifici ad altri esclusivamente umani o sociali.

A livello europeo l'importanza strategica dell'adozione della metodologia LCA come strumento di base e scientificamente adatto all'identificazione di aspetti ambientali significativi è espressa chiaramente all'interno del Libro Verde COM 2001/68/CE e della COM 2003/302/CE sulla Politica Integrata dei Prodotti, ed è suggerita, almeno in maniera indiretta, anche all'interno dei Regolamenti Europei: EMAS (761/2001/CE) ed Ecolabel 1980/2000/CE.

L'LCA del resto rappresenta un supporto fondamentale allo sviluppo di schemi di Etichettatura Ambientale: nella definizione dei criteri ambientali di riferimento per un dato gruppo di prodotti (etichette ecologiche di tipo I: Ecolabel), o come principale strumento atto ad ottenere una Dichiarazione Ambientale di Prodotto: DAP o EPD (etichetta ecologica di tipo III).

Potenzialmente, quindi, le sue applicazioni sono innumerevoli:

Sviluppo e Miglioramento di prodotti/processi;

Marketing Ambientale;

Pianificazione strategica;

Attuazione di una Politica Pubblica.

Tuttavia, poiché uno studio dettagliato di LCA può risultare a volte costoso (in termini economici e di tempo) e complesso da eseguirsi (si deve acquisire una notevole quantità di dati ambientali durante ogni fase del ciclo di vita, e si devono conoscere in modo approfondito sia gli aspetti metodologici standardizzati sia gli strumenti di supporto quali software e banche dati), si

stanno sempre più sviluppando strumenti di “LCA semplificata” che consentono una verifica immediata del ciclo di vita dei prodotti anche a coloro che non possiedono tutte le competenze e le risorse necessarie per realizzare uno studio dettagliato. Inoltre, poiché di fondamentale importanza per la buona riuscita di uno studio di LCA è la disponibilità di dati attendibili, in campo internazionale ed europeo si sta cercando di favorire l’accessibilità, la disponibilità e lo scambio gratuito e libero di dati LCA attraverso lo sviluppo di Banche Dati pubbliche, protette, compatibili, trasparenti ed accreditate.¹²

9 Metodologia dello studio

La valutazione di impatto ambientale di un prodotto industriale è uno studio molto complesso, è reso particolarmente difficile dal fatto che sia relativo a molteplici aspetti e che sia fortemente influenzato dalla soggettività del ricercatore.

In primis, non è possibile studiare le conseguenze generate da un cambiamento in un processo se non si è perfettamente a conoscenza dello stato attuale della tecnologia. Risultano essenziali una buona documentazione ed una ricerca approfondita per individuare il punto di partenza più adatto ad un corretto sviluppo dello studio ambientale. Inoltre è opportuno scegliere il metodo ed un parametro adeguati al tipo di prodotto ed è di fondamentale importanza definire correttamente le condizioni al contorno del sistema che si vuole studiare.

Per la valutazione dell’impatto ambientale indotto dalla produzione di bioetanolo a partire dal bagasso della canna da zucchero nel contesto brasiliano si è utilizzato come punto di partenza lo studio del ciclo di vita del bioetanolo prodotto attualmente.

Successivamente si è simulato il funzionamento di un eventuale impianto produttivo in grado di rappresentare il contesto brasiliano. In tal maniera si sono ottenute le informazioni necessarie alla riuscita dello studio, quindi: la quantità

¹² <http://www.ambiente.unimore.it/on-line/Home/Qualitaambientale/AnalisiCicloVita.html>

di etanolo prodotto, l'energia elettrica generata e le relative emissioni di gas serra relative al processo

Infine sono stati scelti una categoria di impatto ed un indicatore adeguati e si sono studiate le conseguenze della mancata generazione di energia elettrica a favore della produzione di etanolo di seconda generazione.

9.1.1 Categoria di impatto ambientale

Lo studio ambientale di un processo industriale in genere comprende una complessa matrice di impatti generati, uno dei compiti di un professionista è individuare i più significativi dal punto di vista della probabilità di accadimento e dell'entità del pericolo in modo da ricondurre lo studio a pochi effetti e studiarli in maniera approfondita.

Nel paragrafo 5.2 si è ampiamente discusso dei numerosi aspetti riguardanti gli impatti generati dai biocombustibili ed della sostenibilità dei processi produttivi, sia in relazione agli impatti ambientali che agli impatti sociali. Per quanto riguarda i primi si pensi al consumo d'acqua, all'inquinamento atmosferico e idrico, alla perdita di biodiversità e la deforestazione del pianeta. Per quanto riguarda i secondi si intendono l'occupazione delle terre, lo sfruttamento del personale, la salute e soprattutto il problema della competitività fra le terre destinate alla produzione d'energia e quelle finalizzate alla produzione di alimenti etc.. Il seguente studio vuole analizzare le conseguenze a livello ambientale generate dalla produzione di bioetanolo a partire dal bagasso da canna. Esistono due aspetti che permettono di semplificare notevolmente la VIA (Valutazione di Impatto Ambientale):

La materia prima è il residuo di un processo già esistente, si può pertanto ritenere opportuno considerare gli impatti dovuti alla coltivazione della canna pressoché irrilevanti.

L'oggetto dello studio è l'implementazione di un processo produttivo già esistente che dal punto di vista ambientale, che viene alterato in minima parte, rendendo quindi insignificanti gli impatti relativi all'installazione degli impianti ed alla creazione di nuove infrastrutture e vie di comunicazione.

In particolare l'alternativa proposta influisce sul processo precedente sotto forma di due principali aspetti, la produzione di un numero di litri maggiore di etanolo e

il conseguente consumo di una parte dell'energia generata in eccesso, che attualmente viene immessa sulla rete e venduta.

In conclusione si è scelto di considerare come categoria di impatto principale l'inquinamento atmosferico, la produzione di gas che contribuiscono al surriscaldamento globale.

9.1.2 *Indicatore di impatto*

L'indicatore di impatto, come già introdotto in precedenza, è costituito da quel parametro che permette una corretta valutazione dell'entità dell'impatto che si sta cercando di valutare.

Nel caso della categoria "surriscaldamento globale" l'indicatore di impatto relativo è il GWP, il Global Warming Potential, che rappresenta il potenziale proprio di una sostanza di contribuire all'aumento di temperatura del globo.

Il GWP è stato introdotto nel recente passato per lo studio dell'effetto serra. I gas serra, che si accumulano progressivamente in atmosfera, hanno particolari proprietà di assorbimento ed emissione di radiazioni che creano uno scudo protettore nell'atmosfera. Il GWP è l'unità di misura che esprime quanto un gas possa alterare l'equilibrio di entrata ed uscita di energia dall'atmosfera. Quando risulta positivo, come nel caso dei gas serra, l'effetto conseguente è il relativo effetto di riscaldamento dell'atmosfera. Ad ogni gas corrisponde il valore di GWP che è stato definito come grandezza relativa, attribuendo alla CO₂ il ruolo di gas di riferimento e conferendole, per questa ragione, il valore 1 di GWP.

Una molecola di CO₂ non ha particolari capacità di riscaldare l'atmosfera di altri gas serra, ma la sua pericolosità è rappresentata dalla sua abbondanza e dal suo tempo di permanenza in atmosfera estremamente longevo (fra i 50 e i 200 anni).

Dopo la CO₂, è il metano, CH₄, a fornire il maggior contributo al surriscaldamento globale. Al di là del fatto che la sua attività atmosferica sia di appena 12 anni il suo GWP è 20 volte superiore a quello della CO₂. Il metano viene emesso naturalmente da numerose fonti, ma è generato da numerose attività umane quali l'uso di gas naturale, coltivazioni di riso, discariche, allevamenti animali e numerosi processi di fermentazione di sostanze organiche.

Inoltre enormi quantità di metano sono racchiuse in sedimenti in acque profonde ed all'interno di aree permanentemente congelate. Si teme che il riscaldamento

delle acque oceaniche e lo scioglimento dei ghiacci possano liberare questo immenso deposito di metano rendendo irreversibile il cambiamento climatico.

10 Caso specifico

10.1 Il contesto dei biocombustibili in Brasile

Il Brasile occupa una posizione preminente nella produzione mondiale di etanolo da canna da zucchero, confermando la tradizione della coltura della canna da zucchero come coltura dominante del paese. La canna è uno dei principali prodotti agricoli mondiali; seppure coltivata in più di cento nazioni (principalmente dalle nazioni in via di sviluppo), più dei tre quarti della produzione globale è concentrata in 8 paesi. In particolare sono Brasile ed India a generare metà della canna da zucchero prodotta nel mondo. Nel'ultimo raccolto la produzione brasiliana è stata di 425 milioni di tonnellate in un'area coltivata pari a 5,2 milioni di ettari (rappresentano meno dell'1% delle aree coltivabili in Brasile). La produzione è concentrata nel Centro-Sud (85% della produzione) e solo lo stato di San Paolo è responsabile del 60% del valore totale.

La coltivazione è semiperenne e la produzione è a fasi di lavoro particolarmente intensive; a maggio si taglia circa l'80% della canna (nello stato di San Paolo, dove si raggiunge il più alto livello di meccanizzazione, solo il 30% è raccolto con l'ausilio di macchine agricole).

Il fatturato relativo al settore è intorno ai 40 miliardi di reais, pari a circa 15 miliardi di euro, ed è diviso in maniera praticamente uniforme fra la produzione di zucchero e di alcool. Al di là di tutto tale ripartizione è variabile; dipende principalmente dai prezzi relativi e dalle aspettative dei due mercati che presentano notevoli differenze. Due terzi della produzione di zucchero brasiliana è esportata mentre l'alcool è, per l'85%, diretto al mercato interno (sembra che la forte richiesta di energie rinnovabili porterà ad un aumento della percentuale esportata).

La produzione è alquanto frammentata; esistono industrie zuccheriere, industrie con distilleria annessa e distillerie autonome. Le prime fanno solo zucchero, le distillerie autonome si occupano solo della produzione di alcool (generalmente

sono di dimensioni ridotte), mentre le industrie con distillerie annesse in genere destinano il 50% del succo ottenuto dalla canna raccolta alla produzione di zucchero, e il restante alla fermentazione anaerobica al fine di produrre di bioetanolo.

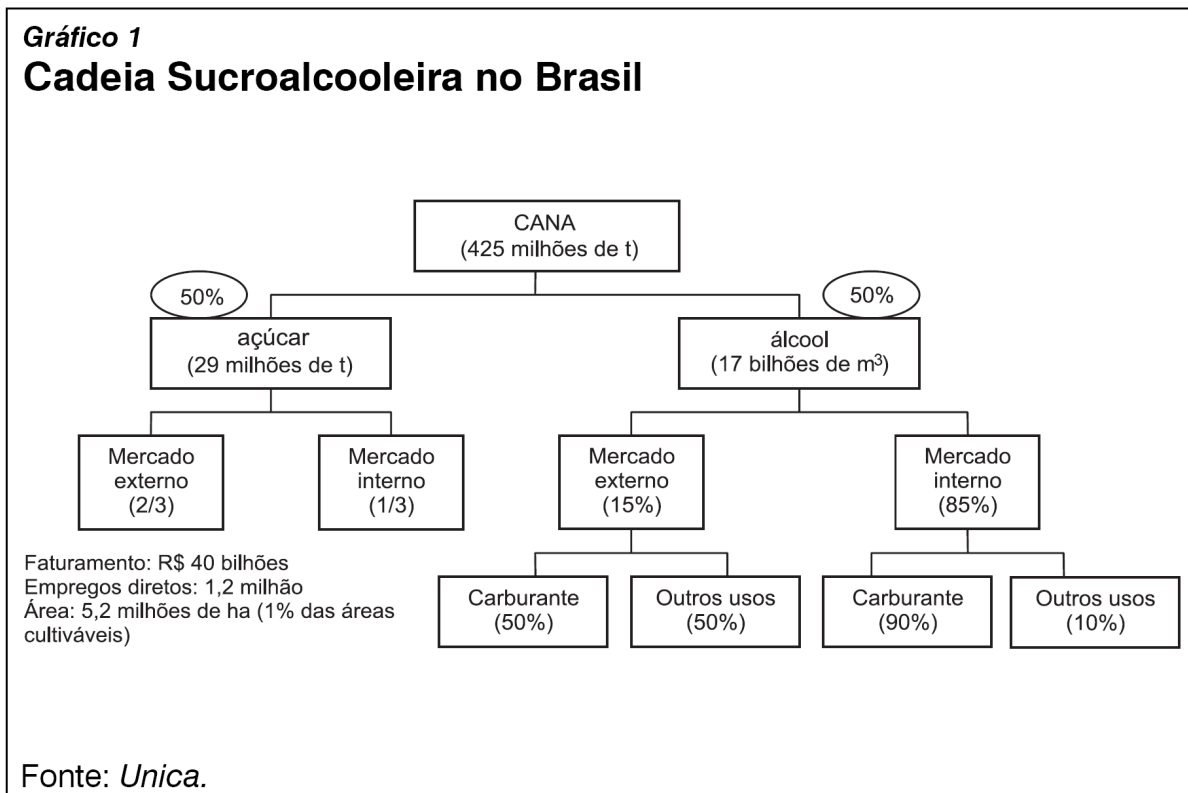


Figura 38: catena produttiva zucchero-alcool in Brasile.

In tutto sono attive 336 unità produttive (2008), di cui la maggior parte sono di piccola portata, mentre le maggiori sono: Sao Cosan, Sao Martinho, Vale do Rosario, Copersucar, Crystalsev, Nova America e Itamarati (vi sono altre unità produttive in costruzione con livelli di produttività molto elevati). A partire dal 1990, (in coincidenza con la nascita dei veicoli flex-fuel negli Stati Uniti d'America) cominciarono gli investimenti da parte dei gruppi internazionali che parteciparono a fusioni ed acquisizioni di imprese oltre al trasferimento di numerose compagnie dal Nord-Est del Brasile alle zone di San Paolo, Minas Gerais e Goiás.

Le unità produttive trattano in genere un milione di tonnellate di canna da zucchero per raccolto, 1,5 nella regione Centro-Sud. La media giornaliera di produzione di alcool è di 400 litri di alcool (in espansione progressiva in confronto ai 120-180 litri al giorno degli anni 90). Nel caso di distillerie, la

produzione è di circa 85 litri di etanolo anidro per tonnellata di canna. Le industrie annesse hanno una produzione di circa 71 kg di zucchero e 42 litri di etanolo per tonnellata di canna processata.[*CGEE (2005)*].

La produzione effettiva, nel 2006, fu stimata fra i 16 e i 17 miliardi di litri all'anno (con una capacità massima di 18 miliardi di litri/anno), con un consumo interno di 13-14 miliardi di litri [*Valor Economico (4.8.2006)*].

La Frost&Sullivan, impresa di consulenza americana, stima un aumento della produzione brasiliana che giunga fino a 30 miliardi di litri anno nel 2012, con un incremento delle esportazioni per il mercato nord americano e giapponese.

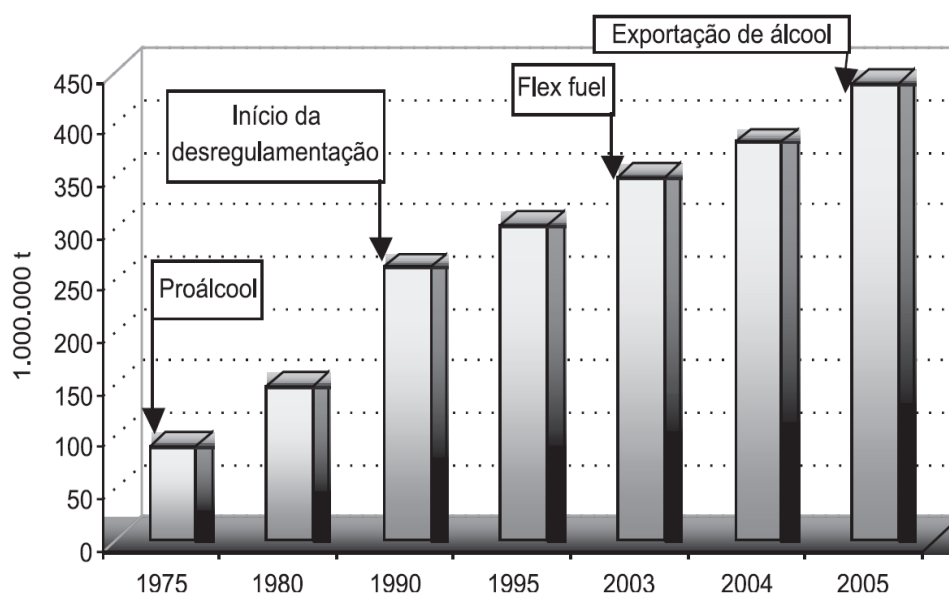
La F.O.Licht, impresa tedesca di consulenza in commodities, prevede che il Brasile nei prossimi anni diventi leader mondiale nell'esportazione di etanolo, con circa 6 miliardi di litri esportati nel 2015 principalmente in Asia e Europa. Ci si aspetta una grande richiesta di energia pulita nei prossimi anni e di conseguenza un deficit nella produttività, particolarmente all'interno dell'Unione Europea.

Attualmente il Brasile è uno dei pochi paesi che generano quantità eccedenti esportabili di etanolo, e si ritiene che avrà un ruolo fondamentale nei prossimi anni.

Di fatto, l'evoluzione della produzione brasiliana di canna da zucchero a partire dal decennio del 1970 è strettamente legata ai principali eventi correlati all'etanolo ed alla politica pubblica del settore.

Gráfico 2

Evolução da Produção de Cana e Marcos do Etanol no Brasil



Fonte: Unica.

Figura 39: evolução della produzione di canna da zucchero in funzione del tempo e degli eventi significativi.

L'inizio degli investimenti nella produzione di alcool combustibile avvenne dopo due eventi significativi, che sono la crisi del petrolio e la caduta del prezzo internazionale dello zucchero per causa delle difficoltà sorte in tale mercato a partire dal '74.

La situazione energetica alquanto critica e la svalutazione dello zucchero si tradussero prima nell'aggiunta di alcool anidro nella benzina e poi, negli anni '80 all'avvio dell'utilizzo dell'etanolo direttamente all'interno dei veicoli funzionanti ad alcool idratato.

Per ridurre l'importazione di petrolio – all'epoca il 90% della benzina era importata – e offrire un mercato alternativo allo zucchero, fu creato il Programma Nazionale dell'Alcool (Proalcool). Con questo provvedimento fu sancita una percentuale di alcool minima da aggiungere alla benzina (circa il 20%), fu incentivata la costruzione di nuove unità produttive attraverso prestiti con basso interesse e garanzie sul futuro, fu fissato il prezzo della benzina ad un livello che

conferiva vantaggi competitivi all'etanolo, e iniziarono consistenti investimenti da parte della Petrobras che diedero grande stabilità al mercato dell'etanolo (principalmente infrastrutture per la distribuzione). Inoltre, esternamente al programma, fu realizzata una grande propaganda ufficiale col fine di stimolare l'uso dell'alcool.

Il risultato fu un aumento di più del 500% della produzione di etanolo fra il 1975 e il 1979.

La seconda fase del Programma, dopo la seconda crisi del petrolio nel '79, era incentrata sulla fabbricazione di veicoli a alcool idratato. Per stimolare la migrazione dei consumi furono offerti diversi incentivi:

il fissaggio del prezzo dell'alcool sotto quello della benzina (65% nel 1980 e 59% nel 1982),

la riduzione di imposte sulla vendita delle macchine ad alcool e aumento su quelle a benzina, oltre ad una riduzione dell'IPVA.

Il programma Proalcool raggiunse il proprio auge negli anni 80, il prezzo dell'alcool fu ridotto a scapito di quello della benzina portando la produzione di etanolo ad essere triplicato fra il 1979 e il 1985 (nell'84 le vetture ad alcool costituivano il 94,5% della produzione di automobili nel paese). In quegli anni furono sostituiti più di 1,44 miliardi di barili di petrolio; considerando l'intervallo di tempo che va dal '79 al 2004, in Brasile sono stati risparmiati 120 miliardi di dollari grazie all'incentivazione della produzione di alcool. In realtà sarebbe stato possibile persino incrementare tale guadagno ma le politiche economiche di petrolio e zucchero fecero in modo che accadesse il contrario. Dopo il picco storico del prezzo del petrolio nell'estate del 2008, i prezzi del petrolio furono riportati ai minimi possibili anche allo scopo di limitare la sempre maggiore destinazione degli investimenti energetici verso fonti energetiche alternative; allo stesso modo dopo la crisi petrolifera degli anni settanta e la diminuzione del prezzo del petrolio, ed in aggiunta l'incremento del valore dello zucchero e i maggiori profitti provenienti dall'esportazione degli stessi comportarono una caduta della produzione di etanolo. Con questo la produzione di automobili alimentate ad alcool non diminuì e gli effetti furono tali da causare un deficit fra

la domanda e l'offerta di alcool, costringendo il Paese, nel 1990, ad importare l'etanolo e ad usare metanolo nella miscela con la benzina. Questi problemi uniti alle politiche fiscali degli anni a seguire finirono col provocare l'estinzione del programma Proalcool.

Solo i taxi e i veicoli da trasporto continuarono ad essere fabbricati con il motore ad alcool, mentre la miscela con la benzina fu mantenuta ugualmente.

L'introduzione nel mercato brasiliano, nel 2001, dei veicoli cosiddetti *flex-fuel*, perché in grado di essere alimentati sia ad alcool che a benzina, accompagnati dagli stessi incentivi vigenti per i veicoli ad alcool¹³ costituì una nuova spinta alla produzione di etanolo.

Furono proprio il mantenimento dell'aggiunta di etanolo nella benzina e gli incentivi statali per i veicoli *flex-fuel* i segnali di mercato che il governo ha inviato ai produttori facendo sì che ad oggi l'etanolo brasiliano, seppur un po' più caro rispetto agli anni 70 per via dell'aumento del prezzo internazionale dello zucchero raffinato, continua ad avere un prezzo vantaggioso rispetto alla benzina, anche a causa del carico fiscale su di quest'ultima.

C'è da sottolineare che, al momento, l'etanolo prodotto in Brasile è il solo biocombustibile a presentare tale vantaggio in termini economici; le ragioni sono le condizioni favorevoli in termini di clima, bassi salari, tecnologie di produzione e politiche pubbliche adeguate e grande disponibilità di terra. Anche dal punto di vista ambientale, l'etanolo prodotto da canna da zucchero risulta esser il più vantaggioso dal punto di vista di emissioni di gas serra.

¹³ 14% di imposte sulle vendite delle automobili ad alcool e 16% sulle altre. Ad oggi più dell'80% dei veicoli nuovi prodotti in Brasile sono *flex-fuel*.

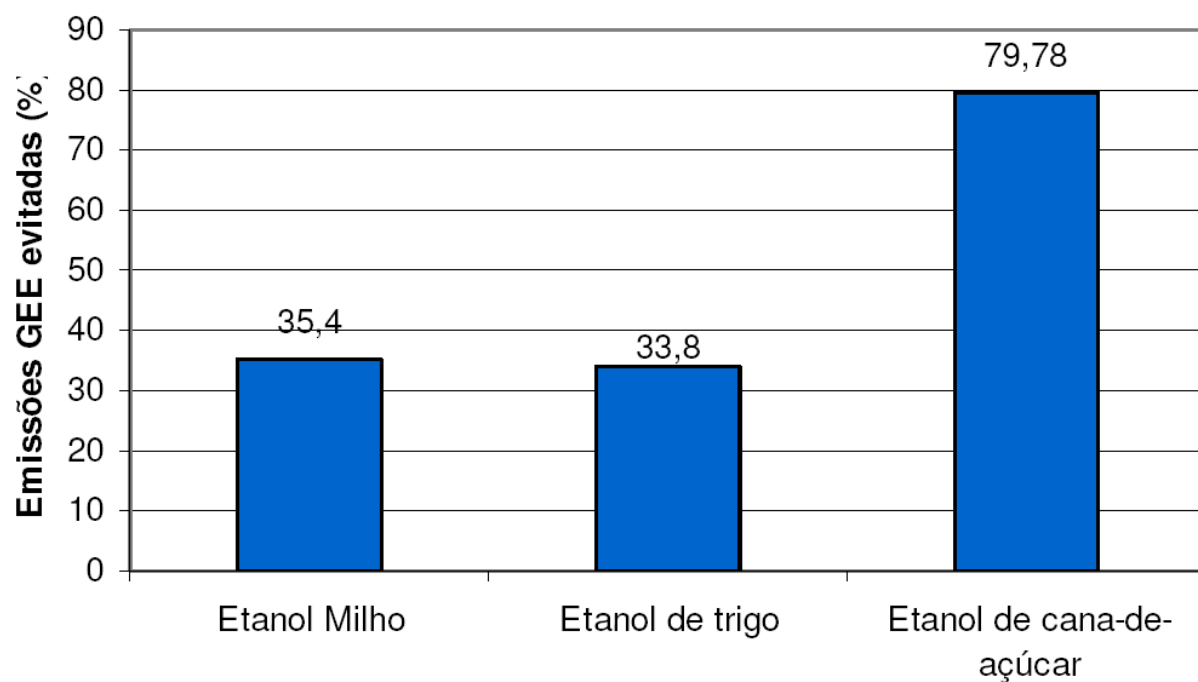


Figura 40: emissioni di gas serra relative ai principali tipi di etanolo presenti sul mercato mondiale. Fonte [24]

Per queste e molte altre ragioni ci si aspetta che una implementazione del processo che conduca a incrementare la produzione di biocombustibile a scapito della quantità di energia elettrica generata in eccesso, possa contribuire a rendere l'etanolo brasiliano uno dei biocombustibili più vantaggiosi al mondo, sia in termini economici che in termini ambientali.



Figura 41: distribuzione delle bioraffinerie produttrici di etanolo e zucchero in Brasile.

10.2 Contesto oggetto di studio

Il proposito dello studio è ottenere una valutazione di impatto ambientale relativo alla produzione di bioetanolo a partire dal bagasso della canna da zucchero nel contesto socio-geografico brasiliano. Per attenersi il più possibile alla realtà dei fatti è stata svolta una raccolta dati nelle'entroterra dello stato di San Paolo, situato nella regione a Sud-Est del Brasile.

Si è scelto di quantificare il potenziale di biomassa della bioraffineria di San Manuel, si trova in una delle aree del Brasile con la più alta concentrazione di coltivazioni di canna da zucchero. Con le sue 3'000'000 di tonnellate di canna da zucchero processate annualmente viene collocata fra le bioraffinerie di medie dimensioni, ciò conferisce una maggiore validità allo studio dato che i risultati potranno essere applicati a numerose situazioni.

Oltre a presentare differenze quasi irrilevanti in funzione dell'area in cui la canna da zucchero venga coltivata, la produzione brasiliana è concentrata al 90% nella regione a Sud-Est del Brasile, zona che presenta le migliori caratteristiche geoclimatiche per le coltivazioni di canna da zucchero, si può dunque affermare che analizzare il contesto produttivo di quest'area sia sufficientemente rappresentativo per la totalità del contesto brasiliano.

I prodotti maggiormente coltivati in tale area sono, in ordine di rilevanza, canna da zucchero, caffè e mais. Per il seguente studio si è scelto di prendere in considerazione solo il quantitativo di bagasso di canna da zucchero residuo prodotto dalla suddetta raffineria, in questo modo è stata sub-estimata notevolmente la reale quantità di biomassa disponibile. La realtà dei fatti si presenta molto più promettente dal momento che le bioraffinerie che processano biomassa risultano particolarmente flessibili e dinamiche rispetto ai quantitativi alimentati ed alle diverse materie prime. Sono, inoltre, già disponibili dati sul funzionamento del processo di idrolisi enzimatica per quanto riguarda i residui della raccolta del mais (promettente) mentre per quanto riguarda il caffè non si è ancora cercata una alternativa all'attuale utilizzo del sub prodotto della bonifica dei chicchi di caffè che presenta buone caratteristiche come fertilizzante.

10.3 Dati raccolti

Nel seguente paragrafo si riportano i principali dati utilizzati nella valutazione di impatto ambientale. L'LCA della canna da zucchero allo stato attuale della tecnologia è riportato [interamente\(é opportuno?\)](#) in appendice, in seguito si riportano i valori maggiormente significativi dello stesso.

Seguono anche i dati raccolti nella bioraffineria di Sao Manuel e le caratteristiche chimico fisiche del bagasso necessarie a completare il file di input del codice numerico sviluppato presso la *Minnesota University*; è proprio tale strumento che ha permesso di simulare il processo di seconda generazione non ancora attivo a livello industriale, in questo modo è stato possibile effettuare una stima dell'eventuale impatto ambientale scaturibile dall'implementazione del processo..

10.3.1 Raccolta dati sull'attuale processo di valorizzazione del bagasso della canna da zucchero.

La ricerca dati è stata svolta presso il CENBIO, centro di ricerca sulle biomasse, situato all'interno della “*Universidade de Sao Paulo*”, presso la “*Secretaria do Meio Ambiente do Estado de Sao Paulo*”, organo governativo che si occupa delle licenze ambientali all'interno dello stato, e presso il CTBE, Centro di Tecnologie sul BioEtanolo situato nella città di Campinas; quest'ultimo è un centro di ricerca fondato l'anno passato per affrontare proprio il concetto di produzione di alcool a partire dall'idrolisi enzimatica del bagasso. Si prevede che nei prossimi tre anni sarà prodotto il primo impianto su scala industriale ridotta.

10.3.1.1 Dati relativi al calcolo delle emissioni di CO₂ equivalente

Dopo una ampia consultazione di dati si è scelto come punto di partenza la pubblicazione effettuata da Aldo Roberto Ometto, presso l'università di Sao Carlos, Brasile, nel 2005. Lo studio riguardante il ciclo di vita dell'alcool combustibile¹⁴, a partire da dati registrati presso l'UNICA (União da Indústria de

¹⁴ “Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos edip, exergia e emergia” Sao Carlos, 2005, Aldo Roberto Ometto

Cana-de-açúcar), si basa su una bioraffineria di media portata in prossimità di San Paolo (situazione simile a quella oggetto d'esame). Lo studio analizza l'impatto ambientale relativo a ciascuno stadio del processo produttivo, a partire dalla preparazione del terreno e la semina, fino a raggiungere la totale combustione dell'alcool nei veicoli a motore con i relativi residui generati. L'impatto ambientale è studiato sotto numerosi aspetti:

- Potenziale di riscaldamento globale
- Potenziale di formazione fotochimica di ozono potenziale di acidificazione dell'ambiente circostante
- Potenziale di eutrofizzazione delle acque
- Potenziale di ecotossicità
- Potenziale di tossicità umana.

Il bagasso di canna da zucchero è un residuo del processo produttivo dell'etanolo, come tale, una differente valorizzazione dello stesso non influisce in alcun modo sulla maggior parte degli impatti presi in considerazione all'interno dell'LCA sviluppato da Aldo Roberto Ometto.

Attraverso la produzione di etanolo a partire dal bagasso della canna da zucchero l'unico aspetto ambientale sul quale si influisce in maniera decisiva è la generazione di gas serra conseguenti alla combustione dello stesso.

In seguito si riporta uno schema delle attività relative al ciclo di vita della canna da zucchero. Per la produzione industriale di etanolo si intende la fase di processo interna alla bioraffineria, di cui fanno parte: la triturazione della canna da zucchero raccolta, il trattamento del succo, la fermentazione e la distillazione. I prodotti della triturazione sono il succo, la torta di materia filtrata e il bagasso. Il succo si usa per produrre l'alcool, la torta viene usata come fertilizzante insieme alla vinazza¹⁵, il bagasso in tal caso viene utilizzato per generare vapore, di cui una parte è necessario per far funzionare le macchine industriali mentre la restante parte viene usata per generare energia elettrica destinata alla vendita.

¹⁵ residuo della distillazione dell'alcool.

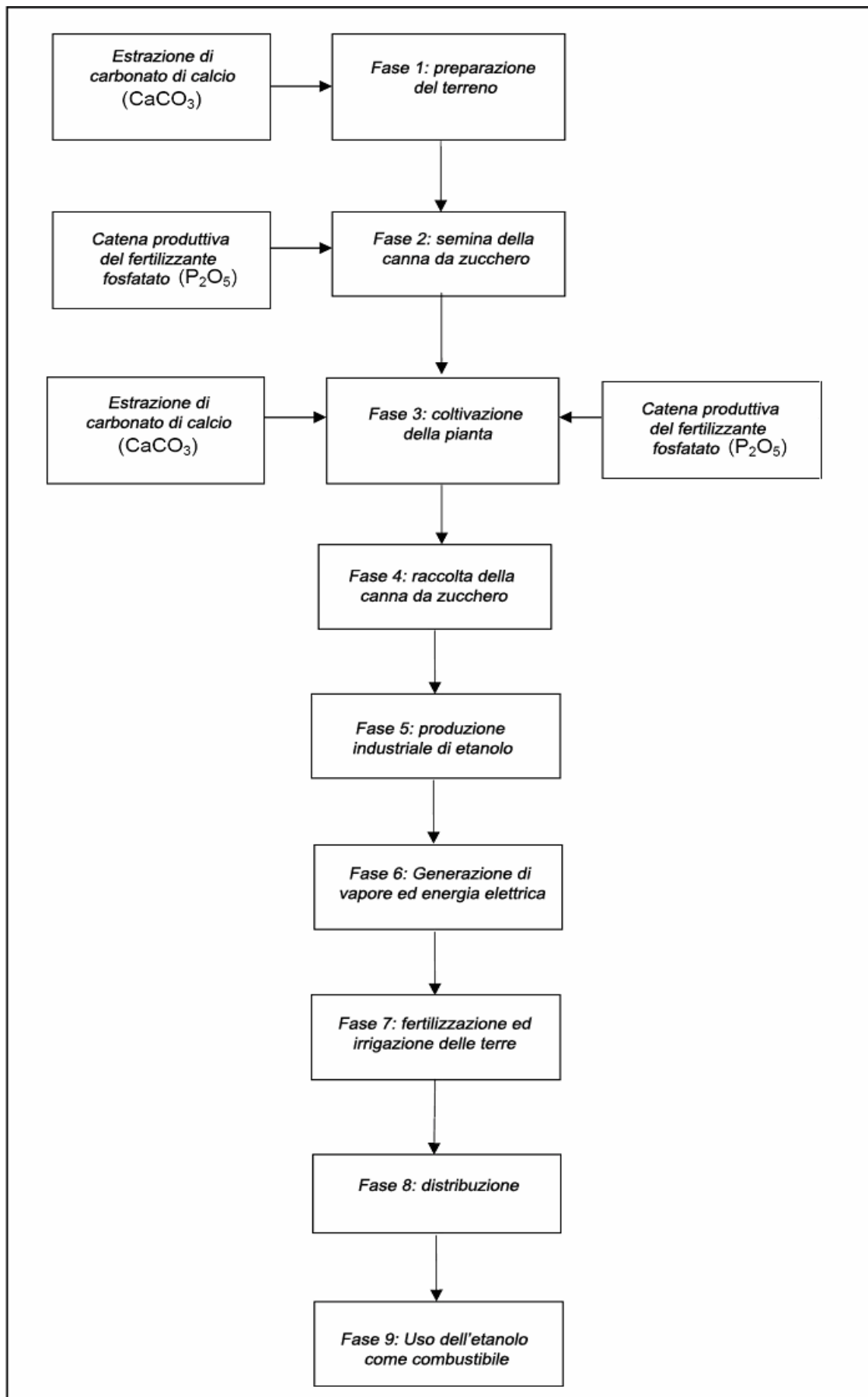


Figura 42: sistema del prodotto alcool etilico idratato combustibile

Il sistema di produzione illustrato in figura comprende, oltre alle nove unità di processo, le fasi di estrazione del carbonato di calcio (CaCO_3) e la catena di produzione del fertilizzante a base di fosfato (P_2O_5).

Inizialmente era stata inclusa nello studio la fase di stoccaggio ma data l'irrelevanza dal punto di vista dell'impatto ambientale è stata esclusa.

All'interno dello studio del ciclo di vita è stata analizzata ciascuna fase del processo in tutti i suoi aspetti; si è studiato il consumo di energia (rinnovabile e non), l'uso di fertilizzanti potenzialmente nocivi per l'ambiente o per l'uomo, le emissioni di sostanze inquinanti in atmosfera, etc...

La tabella che segue riporta proprio le emissioni di gas per ogni tappa (Ativ.) del processo.

Emissões Atmosf.	Ativ. 1	Ativ. 2	Ativ. 3	Ativ. 4	Ativ. 6	Ativ. 7	Ativ. 8	Ativ. 9	Total
	(kg / t álcool)	(kg / t álcool)	(kg / t álcool)	(kg / t álcool)	(kg / t álcool)	(kg / t álcool)	(kg / t álcool)	(kg / t álcool)	(kg / t álcool)
CO ₂	1,975	1,283	3,191	5.895,51	2.307,03	0,937	0,519	0	8.210,445
NO _x	0,019	0,016	0,046	10,815	1,485	0,013	0,008	10,900	23,303
CO	0,006	0,005	0,009	303,031	0,495	0,002	0,002	188,000	491,549
SO ₂	0,004	0,002	0,025	0,186	0	0,001	0,001	0	0,219
HC	0,001	0,002	0,005	60,497	0	0,002	0,002	15,600	76,109
NO ₂	0	0,004	0	0,293	0	0	0	0	0,297
SO _x	0,001	0,0004	0,0005	0,011	0	0,0003	0	0	0,013
Tolueno	0	0,00003	0	0,002	0	0	0	0	0,002
N ₂ O	0,0003	0,081	0,151	0,000	0	0,020	0,000007	0	0,252
K	0	0	0	1,260	0	0	0	0	1,260
Ca	0	0	0	2,160	0	0	0	0	2,160
Mg	0	0	0	0,522	0	0	0	0	0,522
S	0	0	0	0,576	0	0	0	0	0,576
CH ₄	0,001	0,0003	0,001	5,106	0	0,00002	0	0	5,108
Total	2,007	1,393	3,429	6.279,97	2.309,01	0,974	0,533	214,500	8.811,816

Figura 43 Portata massiva di sostanza gassosa emessa per ogni tonnellata di alcool.

Si sta cercando di valutare l'impatto ambientale generato da un processo che produce un biocombustibile; attraverso la tabella sopra riportata sarà possibile effettuare il bilancio di emissioni di gas serra generate in funzione dei litri di etanolo prodotti e dell'energia elettrica immessa nella rete.

Soffermandosi sui valori relativi alla CO₂, si nota come le attività 4 e 6 siano quelle che maggiormente influiscono sul totale. L'attività 4 corrisponde alla "quema da cana" ovvero all'incendio che viene innescato quando le piante raggiungono la maturazione.

Viene bruciata la paglia lasciando intatto l'arbusto, che inoltre resta meno umido, più facile da tagliare e meno ingombrante da trasportare. È la procedura utilizzata

nel caso in cui la canna venga raccolta manualmente dai contadini. Per quanto possa essere pratico sotto certi aspetti tale procedimento risulta altamente inquinante, vengono emesse enormi quantità di gas serra e particolato incombusto ed inoltre non viene valorizzata la paglia, viene disperso il calore che potrebbe essere sfruttato per produrre energia elettrica.

Al giorno d'oggi il 50 % della canna viene ancora raccolta manualmente, attraverso l'incendio dei campi, ma lo Stato brasiliano ha imposto che entro il 2014 tali metodi vengano aboliti eliminando di conseguenza le emissioni ad essi associate ed incrementando la quantità di biomassa utile alla generazione di energia elettrica o alla produzione di etanolo. Dato che nel seguente studio si sta studiando una eventuale implementazione del processo attuale, è sembrato opportuno concentrarsi sulla miglior alternativa presente attualmente, la raccolta meccanica che non prevede l'incendio dei campi prima del raccolto.

Il valore che appunto è stato preso in considerazione è relativo alle emissioni generate dall'attività 6, ovvero la combustione del bagasso per produrre energia elettrica.

emissioni relative alla combustione del bagasso per generare energia elettrica: 2'307,03 kg di anidride carbonica per tonnellata di alcool prodotto.¹⁶

In tale tabella le emissioni dovute alla combustione dell'alcool nei veicoli sono espresse in CO, ovvero non tengono in conto della reale condizione di utilizzo nelle macchine moderne ove i catalizzatori riducono quasi a zero la produzione di CO a favore della produzione di CO₂, meno inquinante.

Tale dato è stato raccolto fra gli studi messi a disposizione dalla UNICA27.

Emissioni dovute all'utilizzo dell'etanolo come combustibile nei veicoli: 1,3 kg di anidride carbonica equivalente per litro di alcool.

¹⁶ Nei calcoli saranno inseriti anche i contributi degli altri gas emessi durante tale fase del processo, non vengono riportati dato che a conti fatti risultano quasi irrilevanti

10.3.1.2 *Dati relativi alla produzione di energia elettrica generata dalla combustione/gassificazione del bagasso di canna da zucchero*

I dati relativi all'efficienza della produzione di energia elettrica attuale di una bioraffineria sono stati riportati per due scenari differenti secondo lo stato dell'arte[12],

Sono state scelte due delle quattro configurazioni di cogenerazione studiate presso la “*Universidade de Campinas*”, in collaborazione con la “*Universidad de Zaragoza*” (Gli schemi di processo sono visibili nel paragrafo 7.1.1).

- Configurazione 1: rappresenta la situazione attuale di valorizzazione del bagasso per la produzione di energia elettrica; permette di generare 70 KWh per tonnellata di canna da zucchero e sarà definita come **Scenario 1.1**

- Configurazione 4: costituisce lo scenario progettato in modo tale che a parità di materia prima disponibile si raggiunga la massima quantità di energia elettrica prodotta. Si sfrutta la gassificazione del bagasso, (la turbina a gas presenta miglior rendimento rispetto a quella a vapore), il gas compresso viene mandato direttamente in turbina e il calore residuo viene utilizzato per produrre vapore ed ulteriore energia. Consente di generare 172,2 Kwh per tonnellata di canna generata e sarà definita come **Scenario 1.2**.

Tabella 4: energia elettrica generata per tonnellata di canna processata nei due scenari presi in considerazione

Tipo di impianto	Energia prodotta per tonnellata di canna processata
Scenario 1.1	70 KWh/t cana processata
Scenario 1.2	172,2 Kwh/t cana processata

10.3.2 *Raccolta dati per formulare la proposta alternativa di valorizzazione del bagasso della canna da zucchero.*

Il processo di produzione di bioetanolo a partire dal bagasso di canna da zucchero non è industrialmente attivo e di conseguenza per ottenere una stima affidabile dei dati relativi alla produttività (litri di etanolo/tonnellata di bagasso) ed al rendimento energetico (energia generata in eccedenza/tonnellata di bagasso), si è ricorsi alla simulazione numerica.

Dopo numerose ricerche si è riusciti a individuare ed a creare una collaborazione con il dipartimento di biotecnologie della *Minnesota University* che nel corso degli ultimi anni si è specializzato nella produzione di etanolo a partire da biomasse lignocellulosiche. In particolare, il gruppo di ricerca ha studiato le differenti materie prime che potessero risultare adeguate al processo, individuandone quattro particolarmente adatte in quanto a composizione, quantità e sensibilità agli enzimi.

Successivamente ha sviluppato un modello numerico con lo scopo di simulare il funzionamento di una bioraffineria di ultima generazione. Tale impianto include un sistema di idrolisi enzimatica della biomassa con il fine di produrre etanolo attraverso la fermentazione della cellulosa e dell'emicellulosa integrato ad un impianto di gassificazione della lignina che permette di generare biosyngas (utile alla produzione di energia o ad ulteriori processi di sintesi). Ad oggi rappresenta una delle massime avanguardie nel campo della valorizzazione di materia lignocellulosica.

La ragione per cui si è scelta tale simulazione numerica è che una delle biomasse scelte dai ricercatori americani fu la paglia residuale generata dalle coltivazioni di granturco ed essa presenta caratteristiche chimico fisiche molto simili a quelle del bagasso della canna da zucchero.

In collaborazione con il professor Shri Ramaswamy del dipartimento di Biotecnologie dell'università statunitense si è pensato di raccogliere le informazioni sufficienti a riformulare l'input del programma adattandolo al residuo lignocellulosico più abbondante del sud America.

Per ottenere dati sufficientemente realistici in quanto a potenziale di biomassa disponibile, come spiegato in precedenza, si è scelto di analizzare l'esempio di

una bioraffineria di media portata, l'*usina* di Sao Manuel, situata nella provincia di Botucatu, nell'entroterra dello stato di San Paolo.

Si sono raccolti i dati riguardanti il potenziale di biomassa disponibile mentre le caratteristiche chimico-fisiche del bagasso della canna da zucchero sono state ottenute dalla letteratura[15]; con tali informazioni è stato simulato il processo di produzione di etanolo a partire dal bagasso della canna da zucchero al fine di ottenere informazioni riguardanti i litri di etanolo e l'energia elettrica generata per kg di bagasso processato.

10.3.2.1 *Modello di Calcolo: Process Modeling of Comprehensive Integrated Forest Biorefinery — An Integrated Approach.*

Come già argomentato in precedenza, al giorno d'oggi non esistono impianti industriali attivi che producano etanolo a partire dal bagasso di canna da zucchero.

Nella maggior parte dei casi la valutazione di impatto ambientale viene effettuata nella fase di progettazione, prima della realizzazione dell'impianto, di conseguenza è di uso comune appoggiarsi a dati frutto di simulazioni numeriche.

La Minnesota University ha sviluppato un modello numerico adatto a simulare il funzionamento di una bioraffineria di seconda generazione con sistema integrato[17] costituito da un impianto di idrolisi enzimatica di materia lignocellulosica integrato con la gassificazione della lignina residua.

In seguito si riporta lo schema di processo di una generica bioraffineria costituita da:

- magazzino per stoccaggio della biomassa;
- sistema di pretrattamento e idrolisi;
- sistema di fermentazione ;
- separazione dei prodotti: etanolo e residui;
- valorizzazione dei residui solidi con gassificazione e produzione di energia;
- impianto di trattamento di acque reflue.

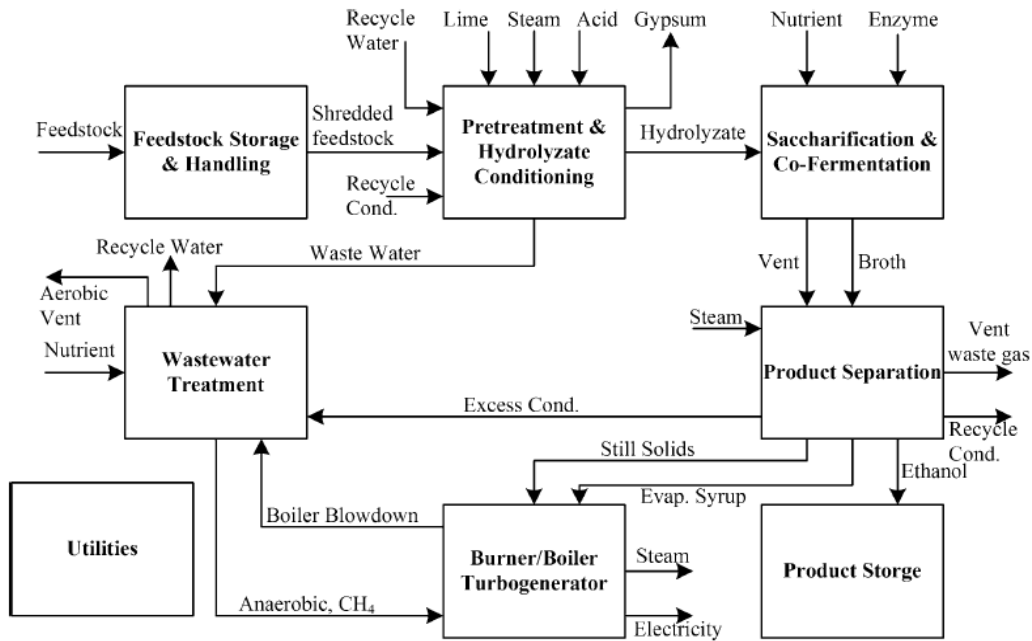


Figura 44: schema di processo di una bioraffineria tipica

Lo schema di processo della raffineria integrata è rappresentato in seguito;

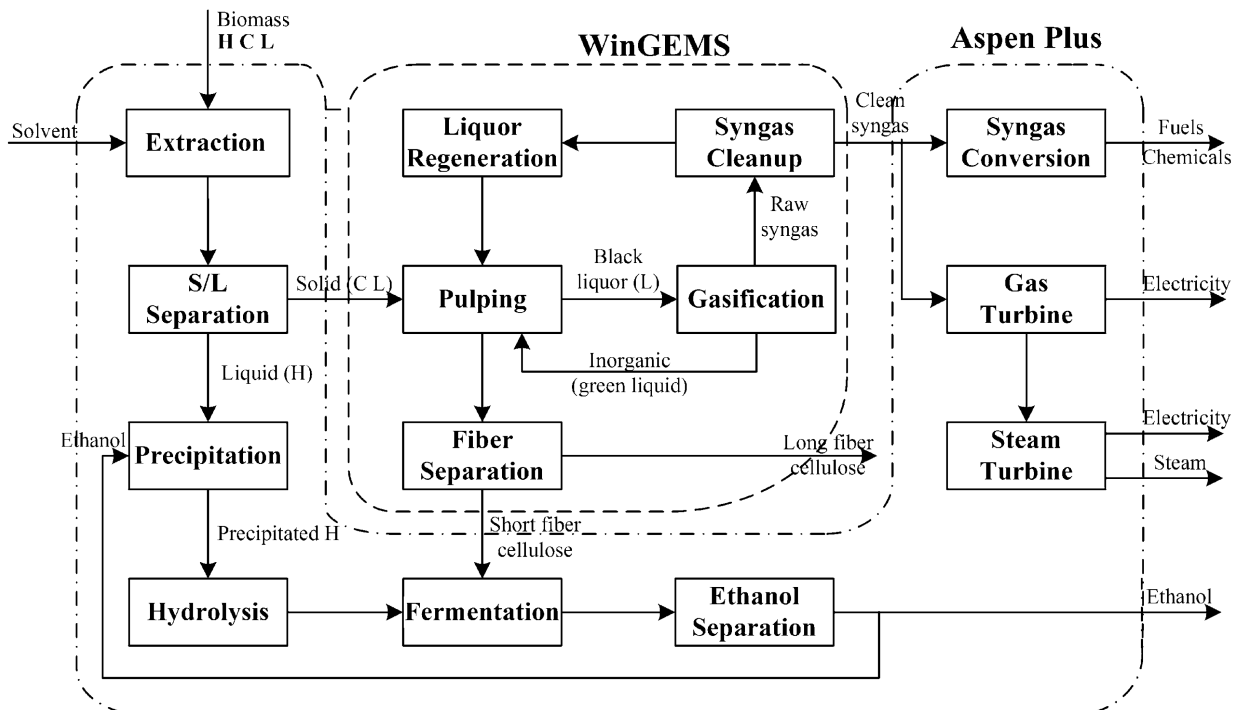


Figura 45: schema di processo di una bioraffineria integrata, L'impianto è stato suddiviso in sistemi per cui sono stati sviluppati appositi modelli numerici in grado di simularne il funzionamento.

Si noti come a principale differenza fra i due schemi sia la presenza di un apparato di idrolisi enzimatica che lavori in parallelo ad uno di gassificazione di biomassa. È proprio quest'ultimo ad ampliare gli orizzonti della bioraffineria permettendo una totale valorizzazione dei residui con minore quantitativo di emissioni (Black Liquor Gasifier), e dando luogo alla formazione di biosyngas (sostanza di partenza per numerosi processi industriali oltre che per la produzione di energia).

Il modello di calcolo è stato sviluppato in seguito ad una ricerca che ha permesso di individuare le biomasse più appropriate al processo. Fra queste, seppur non sia risultata la migliore, è di particolare interesse la presenza della paglia residua delle coltivazioni di granturco, che presenta composizione (Tabella 5: composizione elementare di bagasso di canna da zucchero e paglia residua di granturco) e caratteristiche chimico fisico molto prossime a quelle del bagasso di canna da zucchero.

Tabella 5: composizione elementare di bagasso di canna da zucchero e paglia residua di granturco

	Bagasso de canna da zucchero	Granturco
elemento chimico	% massa	% massa
C	45.15	44.52
H	5.4	5.74
O	41.8	42.42
N	0.2	0.46
S	0.02	0.008
Cl	0.03	-
ceneri	7.4	6.86

La

simulazione numerica fornisce svariati dati di output, quelli utili al seguente studio sono relativi alla quantità di anidride carbonica generata dal processo, alla quantità di litri di etanolo prodotti in funzione della biomassa alimentata ed all'energia elettrica generata o consumata dal processo.

Tutti i dati emessi dalla simulazione si riferiscono ad un impianto che funzioni 200 giorni lavorativi all'anno 24 ore su 24.

10.3.2.2 *Dati sperimentali necessari al funzionamento della simulazione*

I dati sperimentali necessari alla realizzazione di una simulazione che possa essere ritenuta verosimile sono:

- il potenziale di biomassa disponibile;
- l'umidità del bagasso
- la composizione chimica elementare
- la composizione chimica molecolare
- il potere calorifico,

Il potenziale di biomassa è stato considerato pari al quantitativo totale di bagasso umido generato annualmente dalla bioraffineria di San Manuel. Il bagasso costituisce circa il 25 % in massa della quantità di canna processata. La quantità di bagasso non dipende dalle percentuali di produzione di zucchero o alcool che possono essere differenti in funzione di ciascuna bioraffineria o essere alterati in seguito alla domanda imposta dal mercato.

La raffineria processa all'incirca 3 milioni di tonnellate di canna da zucchero all'anno, e il potenziale di bagasso risulta circa di 750.000 ton/anno.

I valori riportati dal CTC (Centro Tecnologico Copersucar) calcolati in media per il bagasso sono:

- umidità è del 50%
- potere calorifico inferiore di 7'543 kJ/kg.
- Potere calorifico superiore 18'254 kJ/kg¹⁷

Si riportano le percentuali massive degli elementi che costituiscono la composizione elementare del bagasso:

¹⁷ Valore ricavato dallo studio “*Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação*”, citato nella bibliografia.

Tabella 6: percentuale massiva degli elementi costituenti il bagasso della canna da zucchero, fonte [17]

bagasso de canna da zucchero	
elemento chimico	% massa
C	45.15
H	5.4
O	41.8
N	0.2
S	0.02
Cl	0.03
Ceneri	7.4

La composizione chimica, secondo lo stato dell'arte [15], è formata dalle molecole listate in seguito.

Tabella 7: composizione chimica in percentuale massiva del bagasso di canna da zucchero paragonata alle due grandi categorie di legname.

Molecola	Legno duro	Legno morbido	Bagasso di canna da zucchero		
			Intero	Fibra	Parte interna
A-cellulosa	38-48	40-45	30-39	38-43	26-36
Pentosi	20-25	10-13	24-30	27-32	28-33
Lignina	20-29	25-34	18-22	20-23	18-22
Ceneri	0.3-1.2	0.2-0.8	1-4	0.6-1.2	1.8-4.6

10.3.2.3 Risultati della simulazione numerica e altri dati utili al calcolo delle emissioni di CO₂ relative al processo di seconda generazione

Ricordando che si è ipotizzato un funzionamento dell'impianto pari a 200 giorni lavorativi all'anno¹⁸, 24 ore su 24, i dati di output forniti dal modello numerico sviluppato dalla Minnesota University sono riportati nella seguente tabella:

Tabella 8: risultati della simulazione svolta presso la Minnesota University

portata di etanolo prodotto	23'164 kg/hr
Quantità di energia generata dal processo	20'428 kW/hr
Quantità di CO ₂ generata dal processo ¹⁹	199'988 kg/hr

Ulteriori dati di cui ci serviremo per calcolare le emissioni di anidride carbonica relative al processo di seconda generazione sono appunto:

le quantità di CO₂ emessa per litro di etanolo o litro di benzina consumato;
il rapporto fra potenza generata da un litro di etanolo ed un litro di benzina

Tabella 9 CO₂ equivalente per litro di etanolo/benzina e rapporto fra le due potenze.

CO ₂ generata per litro di etanolo processato nel motore	1,3 kg/litro di alcool consumato
CO ₂ generata per litro di benzina processata nel motore	2,2 kg/litro di benzina consumata
Rapporto fra potenze etanolo/benzina	0,7

¹⁸ oltre a causa del mantenimento dell'impianto, nei periodi che precedono la raccolta spesso non è presente il bagasso. In particolare nel caso in cui l'obiettivo non sia la produzione di energia elettrica, che necessita di un funzionamento continuo durante l'intero anno, concentrare la produzione di etanolo permette di ridurre le spese del personale.

¹⁹ In tale quantità non è compresa la CO₂ generata dalla combustione dell'etanolo prodotto, si conta solo quella emessa dal funzionamento dell'impianto. Quella relativa alla combustione dell'alcol idratato sarà sommata al momento del calcolo delle emissioni totali.

I dati sono stati stimato attraverso i dati messi a disposizione dall'UNICA[27]:

11 Bilancio emissioni CO₂

Come argomentato in precedenza, la categoria di impatto più adatta allo studio ambientale dei biocombustibili di seconda generazione è il riscaldamento globale, mentre il relativo indicatore sono le emissioni atmosferiche espresse in tonnellate di CO₂ equivalenti.

Nell'effettuare il bilancio di emissioni si è in dovere di considerare un aspetto fondamentale quando si parla di combustibili di origine vegetale. Una pianta, che può essere di canna da zucchero come di qualsiasi altro tipo, durante la crescita, assorbe una certa quantità di anidride carbonica attraverso il processo di fotosintesi. La quantità di carbonio presente all'interno della pianta corrisponde alla CO₂ assorbita durante la crescita e quindi a quella emessa durante la combustione; di conseguenza è lecito ipotizzare l'azzeramento del bilancio totale di emissioni. La quantità di carbonio generata dalla combustione sono totalmente compensate durante il ciclo di vita della pianta stessa.

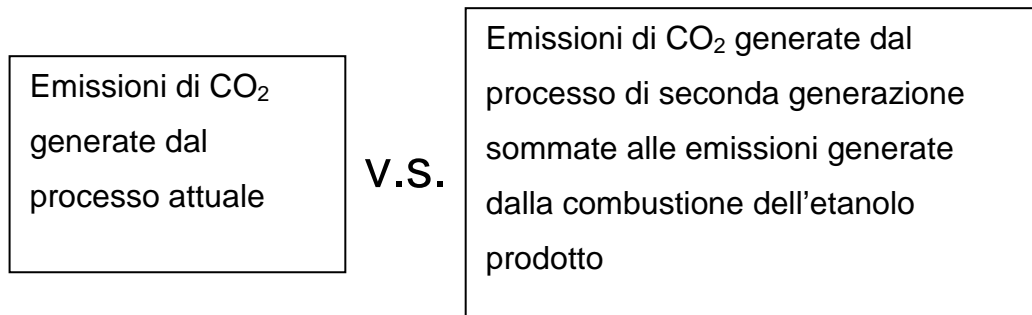
I prodotti della combustione di sostanze organiche sono numerosi composti con caratteristiche fisico chimiche differenti, per questa ragione risulta impossibile comparare valori di emissioni di gas distinti. Per ottenere un criterio di valutazione valido è stata stilata una tabella con i valori propri di ciascun gas che permettono di convertire i quantitativi di emissioni di qualunque sostanza in tonnellate di CO₂ equivalenti. È definito come GWP (Global Warming Potential), è in grado di esprimere l'influenza di ciascun composto gassoso nell'azione di riscaldamento dell'atmosfera; sono classificati in una scala di valori relativa in cui l'unità di misura è il contributo dato dall'anidride carbonica . In seguito si riporta la tabella. Si noti come nonostante la CO₂ sia il principale responsabile dell'effetto serra(per ragioni di quantità), è in realtà uno dei composti col minor potenziale di riscaldamento globale, ad esempio il metano o l'ossido di azoto risultano rispettivamente 21 e 310 volte più efficaci, e dunque pericolosi.

Industrial Designation or Common Name (years)	Chemical Formula	Lifetime (years)	Radiative Efficiency (W m ⁻² ppb ⁻¹)	Global Warming Potential for Given Time Horizon			
				SAR ¹ (100-yr)	20-yr	100-yr	500-yr
Carbon dioxide	CO ₂	See below ^a	^b 1,4x10 ⁻⁶	1	1	1	1
Methane ^c	CH ₄	12 ^c	3,7x10 ⁻⁴	21	72	25	7,6
Nitrous oxide	N ₂ O	114	3,03x10 ⁻³	310	289	298	153
Substances controlled by the Montreal Protocol							
CFC-11	CCl ₃ F	45	0,25	3,800	6,730	4,750	1,620
CFC-12	CCl ₂ F ₂	100	0,32	8,100	11,000	10,900	5,200
CFC-13	CClF ₃	640	0,25		10,800	14,400	16,400
CFC-113	CCl ₃ FCClF ₂	85	0,3	4,800	6,540	6,130	2,700
CFC-114	CClF ₂ CClF ₂	300	0,31		8,040	10,000	8,730
CFC-115	CClF ₂ CF ₃	1,700	0,18		5,310	7,370	9,990
Halon-1301	CBrF ₃	65	0,32	5,400	8,480	7,140	2,760
Halon-1211	CBrClF ₂	16	0,3		4,750	1,890	575
Halon-2402	CBrF ₂ CBrF ₂	20	0,33		3,680	1,640	503
Carbon tetrachloride	CCl ₄	26	0,13	1,400	2,700	1,400	435
Methyl bromide	CH ₃ Br	0,7	0,01		17	5	1
Methyl chloroform	CH ₂ CCl ₃	5	0,06		506	146	45
HCFC-22	CHClF ₂	12	0,2	1,500	5,160	1,810	549
HCFC-123	CHCl ₂ CF ₃	1,3	0,14	90	273	77	24
HCFC-124	CHClFCF ₃	5,8	0,22	470	2,070	609	185
HCFC-141b	CH ₃ CCl ₂ F	9,3	0,14		2,250	725	220
HCFC-142b	CH ₃ CClF ₂	17,9	0,2	1,800	5,490	2,310	705
HCFC-225ca	CHCl ₂ CF ₂ CF ₃	1,9	0,2		429	122	37
HCFC-225cb	CHClFCF ₂ CClF ₂	5,8	0,32		2,030	595	181
Hydrofluorocarbons							
HFC-23	CHF ₃	270	0,19	11,700	12,000	14,800	12,200
HFC-32	CH ₂ F ₂	4,9	0,11	650	2,330	675	205
HFC-125	CHF ₂ CF ₃	29	0,23	2,800	6,350	3,500	1,100
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	14	0,16	1,300	3,830	1,430	435
HFC-143a	CH ₃ CF ₃	52	0,13	3,800	5,890	4,470	1,590
HFC-152a	CH ₃ CHF ₂	1,4	0,09	140	437	124	38
HFC-227ea	CF ₃ CHFCF ₃	34,2	0,26	2,900	5,310	3,220	1,040
HFC-236fa	CF ₃ CH ₂ CF ₃	240	0,28	6,300	8,100	9,810	7,660
HFC-245fa	CHF ₂ CH ₂ CF ₃	7,6	0,28		3,380	1030	314
HFC-365mfc	CH ₃ CF ₂ CH ₂ CF ₃	8,6	0,21		2,520	794	241
HFC-43-10mee	CF ₃ CHFCHFCF ₂ CF ₃	15,9	0,4	1,300	4,140	1,640	500
Perfluorinated compounds							
Sulphur hexafluoride	SF ₆	3,200	0,52	23,900	16,300	22,800	32,600
Nitrogen trifluoride	NF ₃	740	0,21		12,300	17,200	20,700
PFC-14	CF ₄	50,000	0,10	6,500	5,210	7,390	11,200
PFC-116	C ₂ F ₆	10,000	0,26	9,200	8,630	12,200	18,200

Figura 46: tabella che illustra i valori di GWP per i principali gas serra.

11.1 Metodologia di calcolo

Si vuole confrontare le emissioni generate dalla combustione diretta di una tonnellata di bagasso ai fini di produrre energia elettrica (attuale processo di valorizzazione dei residui legnosi), con quelle originate dal processo alternativo preso in considerazione sommate a quelle generate dalla combustione dell'alcool idratato prodotto dal medesimo.



una volta valutato, attraverso i dati raccolti ed una serie di calcoli illustrati in seguito, avremo a disposizione i seguenti dati:

le emissioni generate dai due processi

la quantità di etanolo prodotta dal processo di seconda generazione

la quantità di energia generata dai due processi e quindi la quantità di energia elettrica che si cesserebbe di produrre nel caso di avvenuta implementazione del processo

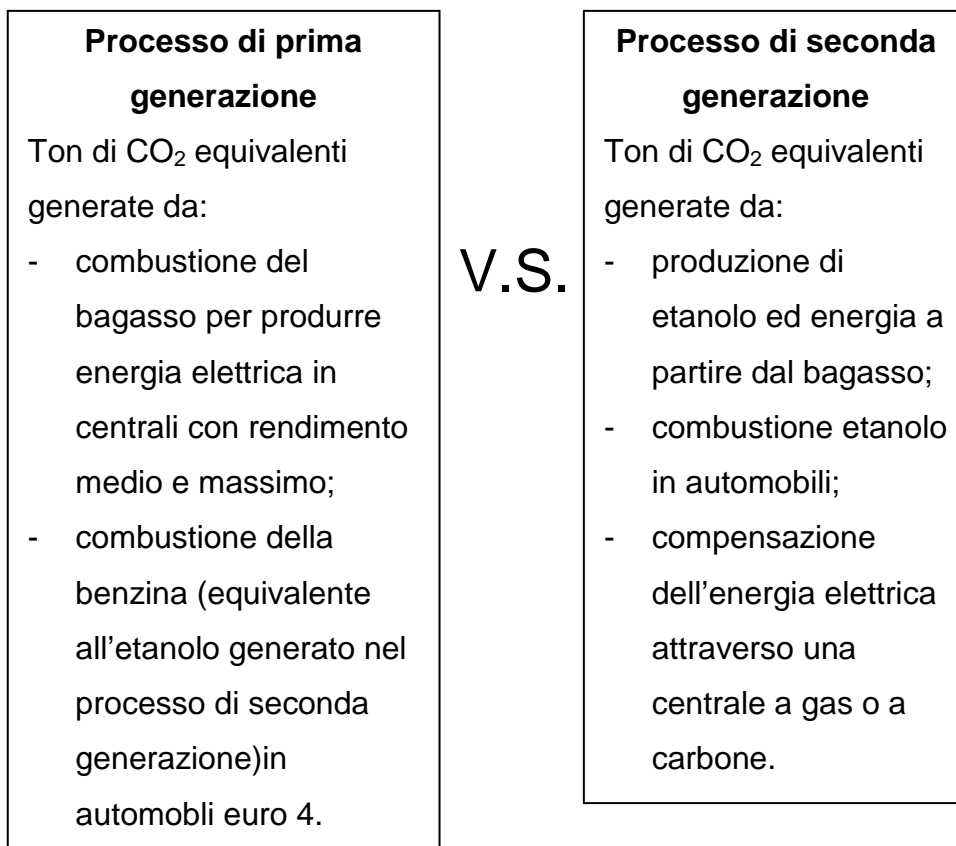
Come è possibile paragonare l'impatto ambientale dovuto allo scenario attuale con l'alternativa proposta?

È stato adottato il seguente metodo:

si ipotizza che l'etanolo prodotto vada a sostituire una quantità energeticamente equivalente di benzina e sarà dunque calcolato il bilancio delle emissioni di CO₂ risultante.

si calcolerà inoltre la quantità di energia elettrica che si è cessato di produrre e le emissioni di CO₂ generate per compensare tale quantità di energia con una centrale termoelettrica a gas o a carbone (ipotesi conservativa).

In questo modo a parità di energia elettrica e meccanica prodotta è possibile valutare l'impatto ambientale attraverso le emissioni di CO₂ risultanti dai due scenari.



Nei prossimi paragrafi si procede ad illustrare la metodologia dei vari calcoli per i due scenari. In primis saranno considerate le emissioni di CO₂ e la produzione di energia elettrica relative allo scenario attuale di valorizzazione del bagasso con rendimento medio e massimo; le emissioni di CO₂ equivalenti e la produzione di energia elettrica relative allo scenario alternativo proposto; le emissioni relative alla produzione dell'energia elettrica che si è cessato di produrre attraverso una centrale a gas tradizionale; le quantità di CO₂ equivalenti non più generate dalla sostituzione della benzina con l'etanolo prodotto secondo il processo di seconda generazione.

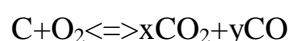
11.1.1 Scenario 1 – attuale processo di valorizzazione del bagasso

Le attuali emissioni di CO₂ equivalenti generate dal bagasso sono date dalla quantità di anidride carbonica generata dalla combustione completa del bagasso in caldaia (per produrre il vapore e generare energia elettrica) sommata alle eventuali emissioni di altri gas convertite in ton di CO₂ equivalenti. Dato il ruolo assolutamente predominante delle emissioni di CO₂, non è stata considerata la reazione di combustione completa, ma solo quella di ossidazione del carbonio presente a dare CO₂.

Si è partiti dalla composizione elementare del bagasso, ovvero dalla quantità di carbonio ivi presente, e si sono calcolate le emissioni di CO₂ corrispondenti (1:1 molare) data la reazione di combustione

La reazione di combustione è la seguente:

Equazione 6



É lecito ipotizzare che il coefficiente stechiometrico del monossido di carbonio, “y”, sia nullo; la ragione risiede nel fatto che il processo di combustione é controllato. Si tende a fornire la quantità di comburente stechiometrica necessaria a generare una combustione completa del C in modo di formare solo anidride carbonica (meno inquinante del CO).

Sulla base dei dati raccolti (paragrafo 9.3.1) sarà possibile calcolare le emissioni di CO₂ equivalenti generate dal processo attuale di valorizzazione del bagasso, e la quantità di energia prodotta, attraverso le seguenti formule:

Equazione 7

$$kg_{CO_2} = ((\% \text{Carbonio nel bagasso}) * (t_{\text{bagasso}}) / PM_{\text{carbonio}}) * \text{volume di una mole di gas} * \text{densità del gas}$$

Equazione 8

$$MW_{\text{generati in eccesso}} = \text{tonnellate di canna processata} * kWh \text{ prodotti per tonnellata di canna.}$$

In quanto alla quantità di energia generate sono state considerate due alternative allo Scenario 1 in funzione dell'efficienza del processo.

11.1.1.1 *Scenario 1.1 – Combustione del bagasso al fine di produrre energia elettrica con efficienza tipica delle centrali presenti al momento*

Attraverso tale scenario sarà possibile confrontare l'alternativa proposta con la situazione attuale dei fatti, lo schema d'impianto è presentato nel paragrafo 57, e corrisponde alla Configurazione 1.

È una installazione attualmente presente nella maggior parte delle bioraffinerie brasiliane, ha rendimenti molto bassi, i dati relativi all'efficienza del processo sono riportati nel paragrafo 10.3.1.

Tale configurazione di impianto è stata concepita in relazione al fatto che fino a pochi anni fa, la condizione di sviluppo economico brasiliana non portava a prevedere la vendita dell'energia elettrica prodotta in eccesso.

Di conseguenza la progettazione degli impianti di cogenerazione è sempre stata effettuata col fine di produrre solo l'energia necessaria al mantenimento della bio raffineria stessa.

11.1.1.2 *Scenario 1.2 – Gassificazione del bagasso al fine di produrre energia elettrica con efficienza massima disponibile su scala industriale 57*

Tale scenario permette di valutare l'ipotesi in cui all'attuale sistema di valorizzazione del bagasso (Scenario 1.1) si sostituisca il sistema che presenti la massima efficienza in quanto a produzione di energia elettrica a partire dal bagasso della canna da zucchero.

Lo schema d'impianto è presentato nel paragrafo 57, corrisponde alla Configurazione 4, mentre i dati relativi all'efficienza del processo sono riportati nel paragrafo 10.3.1.

11.1.2 Scenario 2 – processo alternativo proposto

I risultati forniti dalla Minnesota University presentano varie correnti di gas uscenti, ma non è nota la composizione esatt., Ritenendo la CO₂ il gas più dannoso fra gli altri presenti, è coerente con l'ipotesi conservativa alla base dello studio considerare le correnti in uscita interamente composte da CO₂.

Elaborando i dati forniti dalla *Minnesota University* e riportati in tabella 4, è possibile calcolare la quantità di etanolo prodotta in un anno e, con essa, l'energia elettrica generata e le emissioni di CO_e associate a tale produzione (alle emissioni di CO₂ generate dal processo saranno successivamente sommate quelle generate dalla combustione dell'etanolo prodotto all'interno dei veicoli a motore²⁰).

Equazione 9

etanolo prodotto [litri/anno] = Portata di etanolo uscente [kg/hr]*giorni lavorativi[giorni]*24[hr/giorno]/densità [kg/litro]

Equazione 10

emissioni_{CO2}[kg/anno]= Portata di CO₂ uscente dall'impianto * n[giorni lavorativi/anno] * 24[hr/giorno]

Equazione 11

energia elettrica [MW/anno] = kW/hr generati * n[giorni lavorativi] * 24[hr/giorno]

11.1.3 Emissioni di CO₂ relative alla compensazione dell'energia che si cesserebbe di produrre nel processo innovativo.

Per quanto riguarda il bilancio energetico, il concetto chiave del seguente studio, ovvero la questione che influisce maggiormente a livello ambientale, risiede nel compensare l'energia elettrica attualmente generata dalla combustione del bagasso (considerata fonte rinnovabile per l'azzeramento del bilancio di

²⁰ Dato disponibile in tabella 4.

emissioni dovuto alla capacità delle piante di assorbire anidride carbonica durante il loro ciclo di vita). La principale conseguenza della messa in funzione del processo di seconda generazione, sarà, in primo luogo, l'aumento dei litri di etanolo prodotti a scapito dell'energia prodotta.

Si è scelto di considerare differenti scenari di studio in funzione di:

efficienza del processo di produzione di energia elettrica a partire dal bagasso
tipo di energia utilizzata per compensare le perdite. Si considera che le principali alternative siano l'energia proveniente da fonti fossili (carbone, petrolio o gas), l'energia rinnovabile (solare, eolica, idroelettrica, geotermica, o proveniente dalle maree).

Nei paragrafi precedenti è stato illustrato come ottenere i valori riguardanti la produzione di energia elettrica dei due differenti scenari.

Risulta semplice effettuare la differenza dei due ed ottenere il valore dell'energia che sarà necessario produrre in forma alternativa e le relative emissioni.

Equazione 12

$(\text{En processo attuale} - \text{En processo alternativo}) * (\text{emissioni CO}_2 \text{ equivalenti/kWh})$
= Emissioni generate per compensare l'energia elettrica che si è cessato di produrre.

Per quantificare le emissioni di CO₂/kWh generate dalla produzione di energia è stata utilizzata come strumento di riferimento la tabella che segue.

Fonti	Media (g CO₂ eq/kWh)	Min (g CO₂ eq/kWh)	Max (g CO₂ eq/kWh)
Fotovoltaico	90	15	560
Eolico	25	7	130
Idroelettrico	41	1	200
Geotermico	170	150	1.000
Carbone	1.004	980	1.200
Gas naturale	543	510	760

Figura 47: emissioni di CO₂ relative alla produzione di energia attraverso alcune fonti energetiche.

Si è omessa la possibilità di bruciare petrolio dato che è ufficialmente riconosciuto che una centrale a gas sia più efficiente, meno inquinante e più economicamente viabile. Fra le varie possibilità con cui è possibile sopperire l'energia elettrica che cessa d'esser prodotta, si sono effettuati i calcoli riguardanti le emissioni di una centrale termoelettrica alimentata a Carbone o a gas.

I quantitativi di energia che sarebbe necessario produrre nel caso di implementazione del processo in una sola raffineria sarebbero irrisori rispetto al potenziale di una centrale a gas o a carbone. È opportuno considerare l'eventualità in cui il processo sia esteso a numerose bioraffinerie di media portata, in modo da rendere viabile l'installazione di nuove centrali.

L'alternativa migliore per la produzione di energia elettrica, dal punto di vista ambientale, sarebbe la sostituzione di tali quantitativi di energia attraverso lo sfruttamento di energie rinnovabili quali la eolica e l'energia ricavabile dal movimento delle maree. Dando per scontato che tale sostituzione dia luogo ad una valutazione d'impatto ambientale positiva, si è preferito studiare le alternative che presentano il maggior impatto ambientale negativo.

11.1.3.1 *Scenario 2.1 – energia generata attraverso una Centrale a Carbone.*

Nella prima alternativa considerata, definita come Scenario 2.1, si è scelto di ipotizzare che l'energia sia compensata da una centrale a carbone. Il carbon fossile presenta il maggior quantitativo di emissioni di anidride carbonica

equivalente, ovvero, dal punto di vista ambientale rappresenta la peggior alternativa all'utilizzo del bagasso di canna da zucchero. Le emissioni generate da tale centrale sono state stimate attraverso i dati presenti in Figura 47: emissioni di CO₂ relative alla produzione di energia attraverso alcune fonti energetiche..

11.1.3.2 *Scenario 2.2 – energia generata attraverso una Centrale a Gas Naturale.*

Nella seconda possibilità considerata, l'energia La ragione per cui si è scelto di utilizzare come materia prima il gas naturale risiede invece nel fatto che al giorno d'oggi è grandemente preferito all'uso del carbone, del petrolio o di altre fonti. Oltre ad essere più economico grazie alla facilità di estrazione (il gas fuori esce dai giacimenti mentre il petrolio dev'essere pompato in superficie), risulta più adatto alla combustione in caldaia. Il sistema di ultima generazione in quanto a produzione di energia elettrica è denominato Steam Induced Gas Turbine, il rendimento della conversione in energia elettrica può raggiungere il 35-38%. Il gas naturale presenta dunque la migliore alternativa fra le varie fonti fossili per le seguente ragioni:

- per praticità tecniche,
- per l'alta efficienza del processo
- per ragioni socio-geo-politiche²¹:

11.1.4 *Emissioni di CO₂ relative alla sostituzione della benzina con l'etanolo prodotto a partire dal bagasso di canna da zucchero*

Si è considerata la quantità di etanolo prodotto, ipotizzando che questo vada a sostituire una quantità energeticamente equivalente di benzina, e si sono calcolate le emissioni di CO, CO₂, NO_x e SO_x risparmiate nella sostituzione.

²¹ il Brasile ha recentemente firmato un accordo con la Bolivia per l'acquisto del gas boliviano, il fatto che la Bolivia si trovi a nord-ovest, permetterà di effettuare centrali termoelettriche a gas nella regione nord del Brasile, ove è scarsa la presenza di centrali idroelettriche. Da tale area ci si aspetta un forte crecimiento nei prossimi anni e dunque un forte aumento della domanda energetica.

L'impatto ambientale del processo in esame sarà positivo se le emissioni risparmiate sostituendo la benzina con l'etanolo nelle automobili risultano maggiori a quelle emesse per compensare l'energia che si è persa in quanto il bagasso non viene più bruciato in caldaia per generare energia elettrica.

Le emissioni di CO₂ sono state quantificate sommando le quantità generate nel processo produttivo e quelle che saranno successivamente generate nella combustione dell'etanolo nei motori.

Utilizzando un approccio conservativo si è considerata anidride carbonica il 100% dell'effluente gassoso uscente dal processo di seconda generazione; sono presenti anche vapore, piccole percentuali di NO_x, N₂ e ossigeno.

Secondo lo stato dell'arte[27], le emissioni di CO₂ generate da un litro di etanolo risultano pari a 1,3 kg/l.

L'etanolo presenta un potere calorifico inferiore rispetto alla benzina, in particolare in un litro di etanolo è contenuto meno carbonio rispetto ad un litro di benzina. Il rapporto fra le due potenze, come già espresso in precedenza è 0,7.

Le emissioni di CO₂ equivalente corrispondenti alla combustione di un litro di benzina sono pari a circa 2,2 kg; tale parametro dipende dall'efficienza della marmitta (variabile nel tempo), si è comunque scelto il valore minimo per restare nel campo delle ipotesi conservative mantenuto fino ad ora.

Attraverso le seguenti equazioni sarà possibile calcolare le emissioni di CO₂ che verrebbero risparmiate utilizzando l'etanolo al posto della benzina (si considera l'etanolo a "0 emissioni")

Equazione 13

Litri di benzina equivalente= (litri di etanolo/0,7)

CO₂ benzina= litri di benzina equivalente * 2,35 kg_{CO2}/litro

12 Risultati e discussione

12.1 Quantitativi di energia uscenti dai processi considerati

12.1.1 Energia in eccesso generabile dal processo attuale

Come descritto in precedenza, la bioraffineria di *Sao Manuel* processa 3'000'000 di tonnellate di canna da zucchero all'anno. Dalle 750'000 ton di bagasso che si generano, in funzione del tipo di impianto utilizzato (configurazione 1 e 4 descritte nel paragrafo 7.1.1), è possibile stimare il quantitativo di energia elettrica prodotta conoscendo i kWh generati per tonnellata di canna processata (10.3.1):

Scenario 1.1: valorizzazione del residuo attraverso il metodo attualmente più diffuso in Brasile

Scenario 1.2: valorizzazione del bagasso sfruttando il metodo più efficiente disponibile a scala industriale.

Tabella 10: energia elettrica generata dalla combustione diretta del bagasso in caldaia

Tipo di impianto	Energia prodotta annualmente
Scenario 1.1	210'000 MWh/annui
Scenario 1.2	516'600 MWh/annui

12.1.2 Energia in eccesso generabile dal processo di seconda generazione

Attraverso le formule espresse nelle Equazione 9 e Equazione 11 con i valori emessi dalla simulazione numerica (Tabella 8: risultati della simulazione svolta presso la *Minnesota University* si sono calcolate le produttività annuali di etanolo ed energia.

Si ottengono i seguenti dati:

una produzione di etanolo pari a 140'743'000 litri di etanolo per anno (densità etanolo = 0.79 kg/m³);

una potenza elettrica generata annualmente pari a 98'054 MWh/y.

12.2 Calcolo delle emissioni di CO₂ derivanti dai due processi considerati

12.2.1 Emissioni di CO₂ relative all'attuale processo di valorizzazione del bagasso

Dati utili:

750'000 ton all'anno di bagasso processate nella bioraffineria

Quantità di carbonio presente nel bagasso: 45,15 % in massa;

PM(C)=12 g/mole

Volume di gas: 22,4 Nm³/mole di gas

Densità CO₂=1,9767 kg/m³

Si moltiplicano le tonnellate di bagasso per la concentrazione di carbonio presente all'interno dello stesso, si divide per il peso molecolare e si moltiplica nuovamente per il volume di una mole di gas e per la densità dello stesso.

Ricordando l'equazione:

Equazione 14

$$\text{kgCO}_2 = ((\% \text{Carbonio nel bagasso}) * (\text{ton}_{\text{bagasso}}) / \text{PM}_{\text{carbonio}}) * \text{volume di una mole di gas} * \text{densità del gas}$$

$$(750'000 * 0,4515) / 12 * 22,4 * 1,9767 = 1'249'472 \text{ t di CO}_2$$

12.2.2 Emissioni di CO₂ relative all'attuale processo di valorizzazione del bagasso

Le ton di CO₂ prodotte nel processo di seconda generazione, stando ai dati forniti dalla simulazione numerica messa a disposizione dalla Minnesota University (Tabella 8: risultati della simulazione svolta presso la *Minnesota University*), possono essere facilmente calcolate sommando quelle liberate e

quelle immagazzinate per secondi fini; il totale di emissioni relative al solo processo produttivo risulta pari a 959'947 ton/anno²².

Il quantitativo di anidride generato dalla combustione dell'etanolo all'interno dei veicoli è calcolato attraverso i seguenti dati precedentemente argomentati:

Litri di etanolo di seconda generazione prodotti: 140'743'291 l;

CO₂ generata nella combustione di etanolo all'interno di un'automobile: 1,3 kg/l;

Equazione 15

litri_{etanolo}*CO₂/litro = emissioni dovute alla combustione dell'etanolo nei motori = 182'965 t CO₂

La quantità di CO₂ generata dalla combustione diretta è dunque pari a 182'965 tonnellate, che sommate alle precedenti 959'947 t del processo produttivo danno luogo a un totale di 1'142'912 tonnellate di CO₂. (non sono ton equivalenti, sono solo ton di CO₂)

Considerando anche il metano emesso, che ha un potenziale di riscaldamento globale 21 volte superiore a quello dell'anidride carbonica, bisogna aggiungere un quantitativo di CO₂ equivalente pari a:

Equazione 16

litri di etanolo*(kgCH₄/l di etanolo)*GWP_{CH₄}= CO₂ equivalente dovuta al metano emesso.

140'743'000 [l]*0,01021632 [kg/l di etanolo] * 21 = 30'195 t CO₂ equivalente

Quantitativo praticamente ininfluente sul totale che in tal modo risulta pari a 1'173'107 ton di CO₂ equivalenti.

²² Ancora una volta l'approccio è conservativo dato che le tonnellate di CO₂ emesse che verrebbero immagazzinate per secondi fini (perché è anidride carbonica libera da impurezze) costituiscono il 93 % del totale e nel caso siano riutilizzate non vengono emesse in atmosfera.

12.3 Calcolo delle emissioni generate per compensare la quantità di energia elettrica che cesserebbe d'essere prodotta in seguito all'implementazione del processo.

La perdita di energia dovuta all'implementazione del processo di seconda generazione dipende dall'alternativa a cui si fa riferimento dato che dipende dalla quantità di energia che generabile attraverso la combustione del bagasso:

Tipo di impianto	Energia prodotta annualmente
Impianto di tipo comune presente attualmente nelle bioraffinerie per valorizzare il bagasso	210'000 MWh/annui
Massima efficienza realizzabile in un impianto che sfrutti il processo attuale	516'600 MWh/annui
Impianto di seconda generazione oggetto dell'analisi.	98'054 MWh/annui

Si nota dai numeri riportati in tabella che l'energia generata in eccesso nel processo di seconda generazione è inferiore rispetto a quella che si potrebbe produrre con il processo di combustione attualmente diffuso.

Si ipotizza, dunque, come argomentato in precedenza, che tale energia possa essere compensata attraverso la generazione di energia termoelettrica prodotta a partire da combustibili fossili, in particolare gas naturale e carbone.

Le eventuali emissioni generate per produrre i MWh che si cesserebbe di produrre sono calcolate attraverso la seguente formula e i dati presenti in (Figura 47: emissioni di CO₂ relative alla produzione di energia attraverso alcune fonti energetiche.):

Equazione 17

$$\text{MWh necessari} * (\text{kg di CO}_2 \text{ equivalente/MWh}) = \text{CO}_2 \text{ generata}$$

Tabella 11: emissioni di CO₂ relative alla produzione di energia attraverso alcune fonti energetiche

Tipo di impianto	Energia che cesserebbe d'esser prodotta annualmente	Tonnellate di CO ₂ emesse da una centrale termoelettrica equivalente alimentata a carbone - Scenario 2.1	Tonnellate di CO ₂ emesse da una centrale termoelettrica equivalente alimentata a gas - Scenario 2.2
Scenario 1.1 - Impianto di tipo comune presente attualmente nelle bioraffinerie per valorizzare il bagasso	111'946 MWh	109'707 t CO ₂	57'092 t CO ₂
Scenario 1.2 - Impianto con caratteristiche di massima efficienza realizzabile in un impianto che sfrutti il processo attuale	418'146 MWh	409'783 t CO ₂	213'254 t CO ₂

12.4 Calcolo delle emissioni generate da una quantità di benzina energeticamente equivalente all'etanolo prodotto dal processo di seconda generazione.

Come spiegato in precedenza, le emissioni di CO₂ equivalente corrispondenti alla combustione di un litro di benzina sono pari a circa 2,2 kg; tale parametro dipende dall'efficienza della marmitta (variabile nel tempo), si è comunque scelto il valore minimo per restare nel campo delle ipotesi conservative mantenuto fino ad ora.

La potenza generata dalla combustione di un litro di etanolo è circa il 70% rispetto a quella generata da un litro di benzina, dunque secondo la formula espressa nella Equazione 13,

Equazione 18

140'743'000 litri di etanolo * 0,7 = 98'520'000 litri di benzina.

Possiamo dunque calcolare le emissioni di CO₂ attraverso la seguente formula:

Equazione 19

litri di benzina equivalenti * (emissioni di CO₂ equivalente per litro consumato)
= t CO₂ benzina

(98'520'000 litri di benzina) * (2,2 kg CO₂/litro benzina)*10⁻³= 216'744 t CO₂

risparmiare che nella migliore delle ipotesi considerate (si considera che la combustione avvenga solo in veicoli di tipo Euro 4) corrispondono a 216'744 tonnellate di CO₂.

12.5 Discussione dei risultati ottenuti.

12.5.1 *verifica della consistenza dei dati utilizzati.*

A scopo di verifica dei dati utilizzati, il primo confronto che si è proposto di studiare è la quantità di CO₂ risultante dal processo attuale di valorizzazione del bagasso (Scenario 1.1) e dall'implementazione proposta attraverso i risultati ottenuti dalla collaborazione con la Minnesota University.

A parità di materia prima, ovvero di Carbonio, sommando da un lato le emissioni di CO₂ derivanti dalla combustione totale del bagasso e dall'altra quella emessa dal processo produttivo dell'etanolo e quelle da esso generate al momento dell'utilizzo nelle automobili. le emissioni di CO₂ risultanti non possono essere eccessivamente diverse

I numeri differiscono di circa 100'000 tonnellate, si ritiene che tale differenza scaturisca dal fatto che nello scenario alternativo sono presenti alcuni sottoprodotti contenenti carbonio, e dunque non tutta la materia prima giunga a combustione generando CO₂.

Tabella 12: emissioni di anidride carbonica relative al processo attuale e al processo alternativo

Fase del processo considerata	t CO ₂ generate dal processo attuale	t CO ₂ generate dal processo alternativo proposto
Combustione del bagasso per produrre energia elettrica	1'249'472	/
Produzione di etanolo ed energia elettrica attraverso idrolisi enzimatica e gassificazione	/	959'947
Combustione dell'etanolo nei motori di automobili	/	182'965
TOTALE	1'249'472	1'142'912

12.5.2 Confronto fra la situazione attuale – Scenario 1.1 - ed i processi alternativi proposti – Scenari 2.1 e 2.2.

Il secondo confronto che si è voluto studiare, per ottenere una corretta valutazione dell'impatto ambientale conseguente all'implementazione del processo di valorizzazione del bagasso di canna da zucchero attualmente diffuso in Brasile è effettuato studiando la quantità di CO₂ equivalente emessa a parità di energia elettrica (prodotta all'interno della bioraffineria) e meccanica (conseguente alla combustione di etanolo o benzina all'interno dei motori di automobile) secondo la metodologia descritta nel paragrafo 11.1.

Tabella 13: paragone emissioni di anidride carbonica a parità di energia generata-Scenario 1.1

Fase del processo considerata	t CO ₂ Processo attuale – Scenario 1.1	t CO ₂ Processo alternativo – Scenario 2.1	t CO ₂ Processo alternativo – Scenario 2.2
Combustione del bagasso per produrre energia elettrica	1'249'472	/	/
Produzione di etanolo ed energia elettrica attraverso idrolisi enzimatica e gassificazione	/	959'947	959'947
Combustione dell'etanolo nei motori di automobili	/	213'113	213'113
Combustione di una quantità di benzina energeticamente equivalente alla quantità di etanolo prodotta	216'744	/	/
Generazione dell'energia elettrica che si cesserebbe di produrre in conseguenza allo Scenario 1.1 – centrali termoelettriche a combustibili d'origine fossile	/	109'707	57'092
TOTALE	1'466'216	1'282'767	1'173'844
Differenza fra lo Scenario 1.2 ed il totale	/	-183'362	-235'976

Dai valori ottenuti e riportati nella tabella e nel grafico sottostante si nota come le quantità di anidride carbonica equivalente generate sono assolutamente inferiori nelle alternative proposte rispetto a quelle generate dai processi attuali di valorizzazione dei residui lignocellulosici. Anche il carbone, la materia fossile maggiormente inquinante porta ad un risparmio di emissioni pari al 12,51 %.

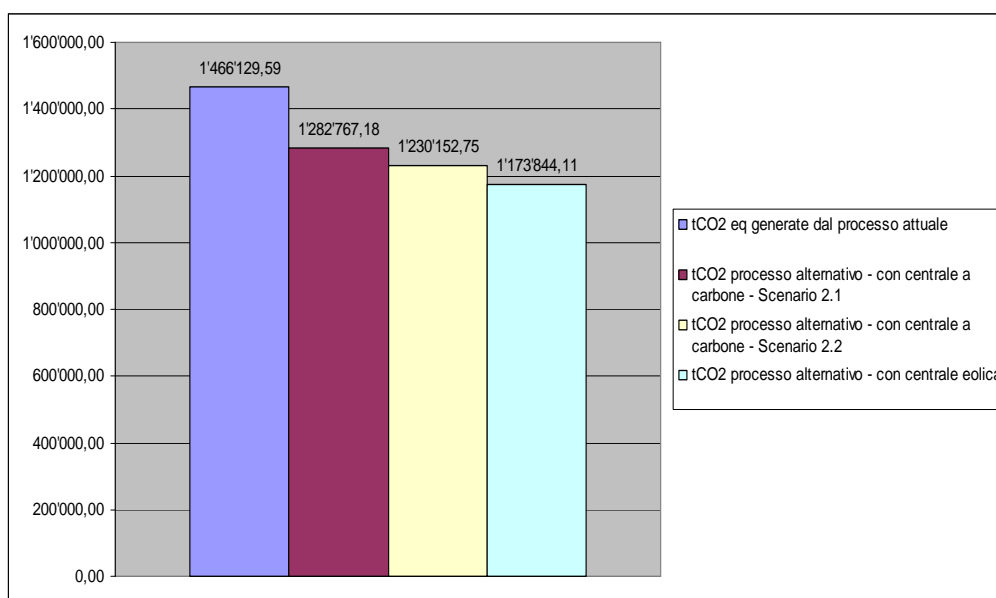


Figura 48: grafico riportante le emissioni di CO2 relative a ciascuna alternativa di processo – Scenario 1.1

Non si è discusso a livello numerico il caso dell'impiego di centrali eoliche per la generazione dell'energia elettrica necessaria a compensare quella che cesserebbe d'esser prodotta, per via del fatto che in qualità di forma di energia a bassissime emissioni risulta ovviamente conveniente. Per completezza di dati viene ugualmente riportato il risultato nel grafico di Figura 48: grafico riportante le emissioni di CO2 relative a ciascuna alternativa di processo – Scenario 1.1

12.5.3 Confronto fra il processo di prima generazione in condizioni di massimo rendimento– Scenario 1.2 -- ed i processi alternativi proposti – Scenari 2.1 e 2.2.

In tal caso è stata valutata l'ipotesi che gli attuali sistemi di valorizzazione vengano implementati con turbine e caldaie con massimi rendimenti ed efficienze ottenibili nella combustione del bagasso della canna da zucchero (studiate presso l'università di Campinas– UNICAMP – SP [12]).

Ad esse sono state associate le emissioni di CO₂ calcolate precedentemente (valore costante dato che la quantità di materia prima ad essere bruciata è la medesima) e sono state calcolate le emissioni derivanti dalla produzione di una quantità di energia equivalente secondo il metodo descritto nel paragrafo 11.1.3.

Dai dati risultanti dalla tabella e da quelli riportati nel grafico in seguito, risulta che nel caso in cui la bioraffineria fosse costruita ex novo, ovvero con gli alti rendimenti tipici delle centrali termoelettriche di ultima generazione, l'alternativa di produrre l'energia elettrica, che cesserebbe d'esser prodotta nel passaggio al processo di seconda generazione, attraverso una centrale a carbone, incrementa le emissioni di CO₂ generate; restano invece convenienti dal punto di vista ambientale le ipotesi di utilizzare il gas naturale come materia prima nella centrale termoelettrica come, ovviamente, l'impiego di centrali eoliche. Anche in questo caso non sono stati riportati i numeri relativi all'alternativa di utilizzare energia eolica dato che il punto critico è proprio dimostrare la convenienza anche restando nell'utilizzo delle fonti fossili.

Tabella 14:paragone emissioni di anidride carbonica a parità di energia prodotta - Scenario 2.1

Fase del processo considerata	t CO ₂ Processo attuale – Scenario 1.2	t CO ₂ Processo alternativo – Scenario 2.1	t CO ₂ Processo Alternativo – Scenario 2.2
Combustione del bagasso per produrre energia elettrica	1'249'472	/	/
Produzione di etanolo ed energia elettrica attraverso idrolisi enzimatica e gassificazione	/	959'947	959'947
Combustione dell'etanolo nei motori di automobili	/	213'113	213'113
Combustione di una quantità di benzina energeticamente equivalente alla quantità di etanolo prodotta	216'744	/	/
Generazione dell'energia elettrica che cesserebbe d'esser prodotta in conseguenza allo Scenario 1.2 attraverso centrali termoelettriche a combustibili d'origine fossile		410'174 t CO ₂	213'458 t CO ₂
TOTALE	1'466'216	1'583'235	1'386'518
Differenza fra lo Scenario 1.2 ed il totale	/	+117'105	-79'610

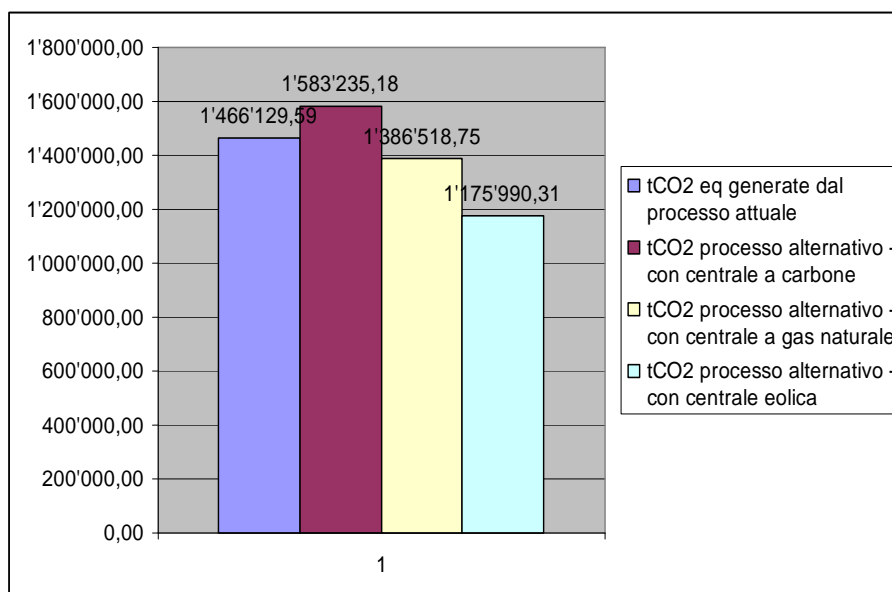


Figura 49: grafico riportante le emissioni di CO2 relative a ciascuna alternativa di processo – Scenario 1.2.

In seguito si riportano inoltre le percentuali di emissioni di anidride carbonica risparmiate nel passaggio dagli scenari 1.1 e 1.2 ai 2.1 e 2.2.

Tabella 15: percentuale di emissioni di anidride carbonica risparmiata (negativa) o generata (positiva).

Scenari	Scenario 1.1	Scenario 1.2
Scenario 2.1	-12,51% emissioni di CO ₂	+7,99% emissioni di CO ₂ -
Scenario 2.2	-16,10% emissioni di CO ₂	-5,43% emissioni di CO ₂

Si noti come l'unico valore che dimostra la presenza di un impatto ambientale negativo è appunto la combinazione dello scenario 1.2 con lo scenario 2.1. Questo è il caso in cui si mettano a confronto un impianto di produzione di energia elettrica ad alto rendimento con uno di produzione di etanolo che compensa l'energia elettrica non più prodotta, attraverso una centrale a carbone. Negli altri casi il bilancio delle emissioni è decisamente positivo.

Le tonnellate di canna da zucchero processate annualmente in Brasile, secondo lo stato dell'arte [29], risalente al 2008, sono 425 milioni. Di queste, il bagasso risultante è pari al 25 %, ovvero 119 milioni di tonnellate di bagasso.

È possibile calcolare il quantitativo di emissioni di CO₂ che sarebbero risparmiate attraverso la seguente equazione:

Equazione 20

$t(\text{CO}_2) \text{ risparmiate} = (\text{t di bagasso processate i brasilie}) * (\text{t di CO}_2\text{emessa/t di bagasso}) * (\%(\text{CO}_2) \text{ che si cesserebbe di produrre attraverso il nuovo processo}).$

$t(\text{CO}_2) \text{ risparmiate} = 119'000'000 \text{ t bagasso} * 1,955 \text{ t CO}_2/\text{t bagasso} * (\% \text{CO}_2)\text{risparmiata}$

Nei quattro casi considerati tale valore è pari a:

Scenari	Scenario 1.1	Scenario 1.2
Scenario 2.1	$-2,91 * 10^7 \text{ t}$	$+1,86 * 10^7 \text{ t}$
Scenario 2.2	$-3,74 * 10^7 \text{ t}$	$-1,26 * 10^7 \text{ t}$

13 Conclusione

La ricerca effettuata nella seguente tesi ha permesso di descrivere in maniera esauriente la questione energetica globale, in quanto a risorse rinnovabili e non, dimostrando la reale necessità di incrementare la ricerca scientifica nel campo del sostenibile.

Focalizzandosi sulla valorizzazione di materia lignocellulosica ha inoltre permesso di individuare ed analizzare gli stati dell'arte col maggior grado di sviluppo e rendimento disponibili in campo scientifico, riguardanti i processi di valorizzazione di residui lignocellulosici e di produzione di biocombustibili.

In particolare si è scelto di approfondire gli aspetti ambientali di uno studio effettuato presso il dipartimento di biotecnologie della *Minnesota University*: l'analisi del processo di idrolisi enzimatica di cellulosa ed emicellulosa a dare etanolo, integrato con la produzione di energia elettrica effettuata attraverso la gassificazione della lignina.

Sulla base del contesto brasiliano è stato elaborato un metodo di valutazione dell'impatto ambientale generato nel passaggio dai processi di valorizzazione cosiddetti di prima generazione a quelli di seconda che ha permesso di dimostrare come tale variante possa ridurre in maniera consistente le emissioni di CO₂.

Il risultato è stato dimostrato a parità di quantitativi di energia generati, fermo restando una previa valutazione delle risorse energetiche alternative prese in considerazione per compensare i quantitativi di energia elettrica che si cesserebbe di produrre, nel passaggio dalla produzione di sola energia elettrica alla produzione di bioetanolo e di energia elettrica.

Dai risultati emerge che anche l'utilizzo del gas naturale (scelto come fonte energetica alternativa data la praticità di utilizzo nel contesto brasiliano e l'efficienza nell'utilizzo all'interno di centrali termoelettriche) pur non essendo una fonte rinnovabile comporterebbe una diminuzione dell'anidride carbonica generata. Non si può dire lo stesso per quanto riguarda la scelta di centrali a carbone, in quanto, compensare l'energia elettrica che cesserebbe d'essere prodotta nella variazione del processo di valorizzazione dei residui genera un impatto superiore a quello conseguente alla diretta combustione degli stessi.

Il metodo numerico, seppur pensato sul contesto brasiliano è facilmente trasferibile ad altre realtà, di paesi in via di sviluppo e non, in cui si pensa di investire nella valorizzazione delle biomasse lignocellulosiche.

Come è ben noto quasi nessun processo alternativo alla raffinazione del petrolio risulta economicamente competente con quelli del, non per niente detto, “oro nero”, di conseguenza il passaggio allo sfruttamento delle fonti rinnovabili prevede la necessità di un forte investimento da parte dei governi e dei privati nella ricerca in questo ambito. Una tesi basata sul Life Cycle Assessment studiato dal punto di vista ambientale ha proprio l’obiettivo di indirizzare la ricerca scientifica verso le soluzioni maggiormente sostenibili, offrendo ragionevoli dimostrazioni utili a mobilitare i patrimoni, governativi e non, in tali tipi di ricerca.

Nella presente tesi, ad esempio, si è dimostrato come una implementazione del processo di valorizzazione dei residui della produzione di etanolo a partire dal bagasso della canna da zucchero brasiliana, secondo i processi di seconda generazione, risulta maggiormente sostenibile rispetto a centrali termoelettriche alimentate con la medesima materia prima.

Con gli opportuni sforzi, secondo le ottimiste previsioni dell’UNICA, nel giro di 7-9 anni gli impianti di seconda generazione saranno presenti su tutto il territorio brasiliano.

Data la crescita economica esponenziale di cui è e sarà protagonista il Brasile nel prossimo decennio, un ulteriore studio, complementare alla tesi in esame, con il fine di ottimizzare i rendimenti (in particolare attraverso la ricerca su enzimi più efficienti) in funzione degli aspetti economici dei processi industriali, potrebbe essere un buono spunto per continuare e completare la ricerca oggetto della seguente tesi.

14 Appendice

14.1 Appendice 1a – foglio di calcolo con dati e conseguenze relative allo scenario 1.1 in relazione agli scenari 2.1 e 2.2

CALCOLO DEL RISPARMIO DI EMISSIONI DI ANIDRIDE CARBONICA RELATIVE ALLA SOSTITUZIONE DELL'ATTUALE SISTEMA DI VALORIZZAZIONE DI MATERIA LIGNOCELLULOSICA CON UN SISTEMA INTEGRATO DI IDROLISI ENZIMATICA E GASSIFICAZIONE DELLA BIOMASSA STESSA			
DATI			
Potenziale di biomassa disponibile			
tonnellate di materia prima lignocellulosica disponibile (in questo caso bagasso di canna da zucchero in una bioraffineria di medie dimensioni)	750000,00	t	
Scenario 1 - Processo di prima generazione			
Scenario 1.1			
rendimento elettrico della valorizzazione del residuo attraverso il processo di combustione diretta	280,00	KWh/tonnellata di materia prima	
Scenario 2 - Processo di seconda generazione			
portata di etanolo prodotto	23164,00	kg/hr	
Quantità di energia generata dal processo	20428,00	kWh/hr	
giorni di funzionamento degli impianti	200,00	g/anno	
ore di funzionamento degli impianti	24,00	hr/g	
Quantità di CO2 generata dal processo [1]	199988,96	kg CO2 equivalenti/hr	
[1] In tale quantità non è compresa la CO2 generata dalla combustione dell'etanolo prodotto, si conta solo quella emessa dal funzionamento dell'impianto. Quella relativa alla combustione dell'alcol idratato sarà sommata al momento del calcolo delle emissioni			
Dati utili al calcolo delle emissioni di CO2 relative alla combustione di etanolo e benzina			
Emissioni di CO2 dovute all'utilizzo dell'etanolo come combustibile nei veicoli	1,30	kg CO2	
Emissioni di CH4 dovute all'utilizzo dell'etanolo come combustibile nei veicoli	0,01	kg CH4	
CO2 generata per litro di benzina processata nel motore	2,20	kg CO2 equivalente/litro	
Rapporto fra potenze etanolo/benzina	0,70		
densità etanolo	0,79	kg/litro	
densità CO2	1,98	kg/m3	
GWP metano	21,00		
Dati per il calcolo delle emissioni di CO2 relative alla combustione del bagasso			
densità della CO2	1,98	kg/m3	
Volume di una mole di gas	22,40	l/mole	
Composizione della materia prima (bagasso di canna da zucchero)			
elemento chimico	% massa	PM	
C	45,14	12,00	
H	5,40	1,00	
O	41,15	8,00	
N	0,20	14,00	
S	0,02	32,00	
Cl	0,03	35,50	
Ceneri	7,40		
reazione di combustione (totale)	PM	coeff stech	
C	12,00	1,00	
O2	16,00	1,00	
CO2	44,00	1,00	
CO	28,00	0,00	
Emissioni di CO2 relative alla produzione di energia elettrica attraverso alcune fonti energetiche			
Scenario 2.1			
Carbone	980,00	g CO2 eq / kWh generato	
Scenario 2.2			
Gas naturale	510,00	g CO2 eq / kWh generato	
Scenario ideale			
Rinnovabile - caso eolico	7,00	g CO2 eq / kWh generato	
RISULTATI Scenario 1.1 - Scenario 2.1			
Emissioni di CO2 generati dalla combustione diretta	1249384,92	t CO2 equivalente	
Energia elettrica prodotta dal processo di combustione diretta - Scenario 1.1	210'000'000,00	kWh annui	
Etanolo prodotto dal processo di seconda generazione	140'743'291,14	litri di etanolo annui	
Energia elettrica prodotta dal processo di seconda generazione - scenario 2.1	98'054'400,00	kWh annui	
Emissioni di CO2 generate dal processo di seconda generazione	959'947,00	t CO2 equivalente	
Emissioni di CO2 generate dalla combustione dell'etanolo prodotto dal processo stesso	182'966,28	t CO2 equivalente	
Emissioni di CO2 equivalente generate dalla combustione del metano	30'147,21	t CO2 equivalente	
Emissioni di CO2 totali conseguenti il processo di seconda generazione	1'142'943,43	t CO2 equivalente	
CONSEGUENZE			
Energia che cesserebbe d'esser prodotta nel passaggio dalla combustione diretta al processo di Il gen.	111'945'600,00	kWh annui	
Tonnellate di CO2 emesse da una centrale termoelettrica equivalente alimentata a carbone	109'706,69	t CO2 eq/anno	
Tonnellate di CO2 emesse da una centrale termoelettrica equivalente alimentata a gas naturale	57'082,28	t CO2 eq/anno	
Tonnellate di CO2 emesse da una centrale eolica equivalente	783,62	t CO2 eq/anno	
Benzina che verrebbe sostituita grazie alla sostituzione con l'etanolo prodotto	98'520'303,80	litri	
Emissioni di CO2 generate dalla combustione della benzina	216'744,67	t CO2 eq	
Emissioni di CO2 relativa a ciascuna fase del processo considerata			
Combustione del bagasso per produrre energia elettrica	1'249'384,92		Processo attuale
Produzione di etanolo ed energia elettrica attraverso il processo di Il gen.		959'947,00	Processo di Il gen.
Combustione dell'etanolo nei motori di automobili		213'113,49	
TOTALE	1'249'384,92	1'173'060,49	

14.2 Appendice 1b – foglio di calcolo riportante i risultati ottenuti in termini di emissioni di CO₂ conseguenti allo scenario 1.1 in relazione agli scenari 2.1 e 2.2

Emissioni di CO2 a parità di energia prodotta				
	tCO2 eq generate dal processo attuale	tCO2 processo alternativo - con centrale a carbone	tCO2 processo alternativo - con centrale a carbone	tCO2 processo alternativo - con centrale a carbone
Combustione della materia lignocellulosica	1'249'384,92			
produzione di etanolo ed energia elettrica attraverso il processo di ll generazione		959'947,00	959'947,00	959'947,00
combustione di etanolo nei motori		213'113,49	213'113,49	213'113,49
combustione di una quantità di benzina energeticamente equivalente all'etanolo prodotto	216'744,67			
Generazione dell'energia elettrica che si cesserebbe di produrre in conseguenza all'implementazione del processo		109'706,69	57'092,26	783,62
TOTALE	1'466'129,59	1'282'767,18	1'230'152,75	1'173'844,11
differenza fra gli scenari alternativi ed il totale (CO2 eq risparmiata)	0,00	183'362,41	235'976,84	292'285,48
Risparmio di emissioni di CO2 percentuali	0,00	12,51	16,10	19,94

Ipotizzando di estendere l'ipotesi effettuata al il contesto nazionale brasiliano				
quantità di bagasso di canna da zucchero residua generata in un anno	119'000'000,00	t		
emissioni di CO2 generate per tonnellata di bagasso processata con il sistema attuale	1,95	t		
Quantità di emissioni di CO2 risparmiate in seguito all'applicazione dei processi studiati		2,91E+07	3,74E+07	4,64E+07
Percentuale sulle emissioni globali di CO2 ipoteticamente pari a 26 Gtonnellate		0,11	0,14	0,18

14.3 Appendice 2a – foglio di calcolo con dati e conseguenze conseguenti allo scenario 1.2 in relazione agli scenari 2.1 e 2.2

CALCOLO DEL RISPARMIO DI EMISSIONI DI ANIDRIDE CARBONICA RELATIVE ALLA SOSTITUZIONE DELL'ATTUALE SISTEMA DI VALORIZZAZIONE DI MATERIA LIGNOCELLULOSICA CON UN SISTEMA INTEGRATO DI IDROLISI ENZIMATICA E GASSIFICAZIONE DELLA BIOMASSA STESSA		
DATI		
Potenziale di biomassa disponibile		
tonnellate di materia prima lignocellulosica disponibile (in questo caso bagasso di canna da zucchero in una bioraffineria di medie dimensioni)	750'000,00	t
Scenario 1 - Processo di prima generazione		
Scenario 1.1		
rendimento elettrico della valorizzazione del residuo attraverso il processo di combustione diretta	688,80	KWh/tonnellata di materia prima
Scenario 2 - Processo di seconda generazione		
portata di etanolo prodotto	23'164,00	kg/hr
Quantità di energia generata dal processo	20'428,00	kW/hr
giorni di funzionamento degli impianti	200,00	g/anno
ore di funzionamento degli impianti	24,00	hr/g
Quantità di CO2 generata dal processo[1]	199'988,96	kg CO2 equivalenti/hr
[1] In tale quantità non è compresa la CO2 generata dalla combustione dell'etanolo prodotto, si conta solo quella emessa dal funzionamento dell'impianto. Quella relativa alla combustione dell'alcol idratato sarà sommata al momento del calcolo delle emissioni		
Dati utili al calcolo delle emissioni di CO2 relative alla combustione di etanolo e benzina		
Emissioni di CO2 dovute all'utilizzo dell'etanolo come combustibile nei veicoli	1,30	kg CO2
Emissioni di CH4 dovute all'utilizzo dell'etanolo come combustibile nei veicoli	0,01	kg CH4
CO2 generata per litro di benzina processata nel motore	2,20	kg CO2 equivalente/litro
Rapporto fra potenze etanolo/benzina	0,70	
densità etanolo	0,79	kg/litro
densità CO2	1,98	kg/m3
GWP metano	21,00	
Dati per il calcolo delle emissioni di CO2 relative alla combustione del bagasso		
densità della CO2	1,98	kg/m3
Volume di una mole di gas	22,40	l/mole
Composizione della materia prima (bagasso di canna da zucchero)		
elemento chimico	% massa	PM
C	45,14	12,00
H	5,40	1,00
O	41,15	8,00
N	0,20	14,00
S	0,02	32,00
Cl	0,03	35,50
Ceneri	7,40	
reazione di combustione (totale)		
	PM	coeff stoch
C	12,00	1,00
O2	16,00	1,00
CO2	44,00	1,00
CO	28,00	0,00
Emissioni di CO2 relative alla produzione di energia elettrica attraverso alcune fonti energetiche		
Scenario 2.1		
Carbone	980,00	g CO2 eq / KWh generato
Scenario 2.2		
Gas naturale	510,00	g CO2 eq / KWh generato
Scenario ideale		
Rinnovabile - caso eolico	7,00	g CO2 eq / KWh generato
RISULTATI Scenario 1.1 - Scenario 2.1		
Emissioni di CO2 generati dalla combustione diretta	1'249'384,92	t CO2 equivalente
Energia elettrica prodotta dal processo di combustione diretta - Scenario 1.1	516'600'000,00	kWh annui
CONSEGUENZE		
Etanolo prodotto dal processo di seconda generazione	140'743'291,14	litri di etanolo annui
Energia elettrica prodotta dal processo di seconda generazione - scenario 2.1	98'054'400,00	kWh annui
Emissioni di CO2 generate dal processo di seconda generazione	959'947,00	t CO2 equivalente
Emissioni di CO2 generate dalla combustione dell'etanolo prodotto dal processo stesso	182'966,28	t CO2 equivalente
Emissioni di CO2 equivalente generate dalla combustione del metano	30'147,21	t CO2 equivalente
Emissioni di CO2 totali conseguenti il processo di seconda generazione	1'142'943,43	t CO2 equivalente
Energia che cesserebbe d'esser prodotta nel passaggio dalla combustione diretta al processo di il gen.	418'545'600,00	kWh annui
Tonnellate di CO2 emesse da una centrale termoelettrica equivalente alimentata a carbone	410'174,69	t CO2 eq/anno
Tonnellate di CO2 emesse da una centrale termoelettrica equivalente alimentata a gas naturale	213'458,26	t CO2 eq/anno
Tonnellate di CO2 emesse da una centrale eolica equivalente	2'929,82	t CO2 eq/anno
Benzina che verrebbe sostituita grazie alla sostituzione con l'etanolo prodotto	98'520'303,80	litri
Emissioni di CO2 generate dalla combustione della benzina	216'744,67	t CO2 eq
Emissioni di CO2 relativa a ciascuna fase del processo considerata		
Combustione del bagasso per produrre energia elettrica	1'249'384,92	Processo di il gen.
Produzione di etanolo ed energia elettrica attraverso il processo di il gen.		959'947,00
Combustione dell'etanolo nei motori di automobili		213'113,49
TOTALE	1'249'384,92	1'173'060,49

14.4 Appendice 2b –risultati ottenuti in termini di emissioni di CO₂ conseguenti allo scenario 1.1 in relazione agli scenari 2.1 e 2.2

Emissioni di CO2 a parità di energia prodotta				
	tCO2 eq generate dal processo attuale	tCO2 processo alternativo - con centrale a carbone	tCO2 processo alternativo - con centrale a gas naturale	tCO2 processo alternativo - con centrale eolica
Combustione della materia lignocellulosica	1'249'384,92			
produzione di etanolo ed energia elettrica attraverso il processo di ll generazione		959'947,00	959'947,00	959'947,00
combustione di etanolo nei motori		213'113,49	213'113,49	213'113,49
combustione di una quantità di benzina energeticamente equivalente all'etanolo prodotto	216'744,67			
Generazione dell'energia elettrica che si cesserebbe di produrre in conseguenza all'implementazione del processo		410'174,69	213'458,26	2'929,82
TOTALE	1'466'129,59	1'583'235,18	1'386'518,75	1'175'990,31
differenza fra gli scenari alternativi ed il totale (CO2 eq risparmiata)	0,00	-117'105,59	79'610,84	290'139,28
Risparmio di emissioni di CO2 percentuali	0,00	-7,99	5,43	19,79

Ipotizzando di estendere l'ipotesi effettuata al il contesto nazionale brasiliano				
quantità di bagasso di canna da zucchero residua generata in un anno	119'000'000,00	t		
emissioni di CO2 generate per tonnellata di bagasso processata con il sistema attuale	1,95	t		
Quantità di emissioni di CO2 risparmiate in seguito all'applicazione dei processi studiati			-1,86E+07	1,26E+07
Percentuale sulle emissioni globali di CO2 ipoteticamente pari a 26 Gtonnellate			-0,07	0,05
				0,18

15 Bibliografia

1. *Enciclopedia Encarta 2007.*
2. *Article: "Fuel", Nasa - 2005.*
3. *Rapporto ENEA – Energia Nucleare ed Energie Alternative – 2008.*
4. *NIST Chemistry WebBook – 2009.*
5. *World Bank - Global Economic Prospects 2009: Commodities at the Crossroads.*
6. *VOL 313 SCIENCE www.sciencemag.org 22 settembre 2006*
7. *Energy Technology Perspective 2008 – pubblicata dalla IEA (International Energy Agency).*
8. *World Energy Outlook 2007 – pubblicato dalla IEA (International Energy Agency).*
9. *I Biocarburanti - Consorzio per l'AREA di ricerca scientifica e tecnologica di Trieste AREA Science Park - giugno 2007.*
10. *Progetto E.C.A.T.E. - Efficienza e Compatibilità Ambientale delle Tecnologie Energetiche-T. Faravelli, A. Frassoldati S. Granata, A. Cuoci, E. Ranzi.*
11. *The Design and economic analysis of a modern bio-ethanol factory located in Brazil - Richard Eijsberg - 16 November 2006.*
12. *Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane - Adriano V. Ensinas e Silvia A. Nebra della facolta di ingegneria meccanica della Universidade Estadual de Campinas - Miguel A. Lozano, Luis M. Serra, del dipartimento di ingegneria meccanica della Universidad de Zaragoza, - 31 August 2007.*
13. *A importância da análise do ciclo de vida na escolha dos combustíveis usados no transporte rodoviário - Laura Bedeschi Rego de Mattos - Márcio de Almeida D'Agosto - Suzana Kahn Ribeiro - 2002.*
14. *From 1st to 2nd Generation Biofuel technologies, an overview of current industry and RD&D activities - Ralph Sims, Michael Taylor- International Energy Agency – November 2008.*

15. *Sugar Cane Handbook – A Manual for Cane Sugar Manufacturers and Their Chemists – 1983.*
16. *By-products of the Sugarcane industry: their industrial utilization – Patarau J. Maurice – 1983.*
17. *Process Modeling of Comprehensive Integrated Forest Biorefinery— An Integrated Approach Hua-Jiang Huang, Weilu Lin, Shri Ramaswamy, Ulrike Tschirner.*
18. *Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação - Marcelo Bacci da Silva (UNIMINAS) - Anderson dos Santos Morais (FAZU).*
19. *www.parks.it Il Portale dei Parchi Italiani*
20. *Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos edip, exergia e emergia - Aldo Roberto Ometto - Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte do requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia (Hidráulica e Saneamento).*
21. *BEN 2009(Balance Energetico Nacional) – Empresa de Pesquisa Energetica (EPE).*
22. *Wave Power - <http://www.eia.doe.gov> – 2009.*
23. *UNICA - União da Indústria de Cana-de-açúcar.*
24. *Balanco de energia e das emissões de gases de efeito estufa da cadeia produtiva do etanol brasileiro - Cinthia Rubio Urbano da Silva – Universidade Estadual de Campinas, Brasil – 2009.*
25. *Avaliação de impacto ambiental – Luis Sanchez – ANNO*
26. *Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa – Relatórios de referência - Ministério da Ciência e Tecnologia - 2006 – emissões de gases de efeito estufa por fontes móveis, no setor energético*
27. *O Etanol e o Controle de Emissões de Gases de Efeito Estufa - Alfred Szwarc*
28. *Algenol Biofuels partners with Lee County as commission votes to approve incentive funding supporting florida-based biofuels and green chemistry facility – 3 febbraio 2010*

29. *Etanol, Alcoolquímica E Biorrefinarias - Valéria Delgado Bastos – 2008*
30. *Forest biomass and energy production: a case of study in Emilia-Romagna (Italy)- Federico Magnani, Lucia Cantoni – 2005*
31. *Biogas e biometano: destinazioni d'uso di un combustibile gassoso in forte sviluppo. Valutazioni su generazione termoelettrica, iniezione in rete ed utilizzo come carburante per autotrazione.- Roberto Renda – Sapienza, Università di Roma – Master di II livello in Management dell'Energia e dell'Ambiente. – 2008.*
32. *Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil – Joaquim Eugenio Abel Seabra – UNICAMP, Universidade estadual de Campinas - 2008*
33. *Life Cycle simulation-based economic and risk assessment of biomass-based fuel ethanol (BFE) projects in different feedstock planting areas. – Suiran Yu, Jing Tao – School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tang University - 2006*

Ringraziamenti

Ringrazio il Professor Paolo Centola per la sua disponibilità nel seguirmi in un progetto svoltosi dall'altra parte dell'oceano; la Professoressa Patricia Matai, punto di riferimento per qualsiasi necessità a livello scientifico o umano durante l'elaborazione della tesi; il Professor Shri Ramaswamy della Minnesota University per preziosa collaborazione, la disponibilità e la gentilezza; si ringrazia la fondamentale presenza di Japao e Alemao che hanno permesso lo studio di campo, e del Prof. Antonio Bonomi, fondamentale nei suoi consigli e mio padre, il miglior psicologo prima e dopo i colloqui più difficili.

Si ringraziano inoltre tutte le persone che giorno per giorno mi sono state vicine e mi hanno dato l'appoggio per perseguire gli obiettivi previsti nei momenti più duri di questo anno: Emanuele Nigro, Eugenio Apollinare Monticone, Valentina Lattuada, Fabio Castro, José Munoz, Melissa Naranjo, Giulio Parini, Luigi Gentile, Claudia Biondini, Elisa Carbonell, Lucas Moraes, Geronimo Santos, Andrea Nigro, La Laura, Michele Bosco, Catriel Nunez, Cristina Marchesi, con ringraziamento speciale a Tutta la mia "Famiglia" e alla vita....

*Dedico questa tesi a mia madre
Speranza e mio padre Luciano, genitori
meravigliosi che hanno avuto fiducia in
me, mi hanno stimolato e soprattutto,
anche contro il loro desiderio, mi hanno
appoggiato permettendomi di diventare
ciò che sono.*