



**an environmental high tech shuttle structure**

Sereco Biotest S.n.c. di Luca Poletti Tel. +39-75-5837549 /335 7029166 /335 387068  
Fax +39-75-5835084  
C.F. / P.IVA 00289900540

Via C. BALBO,7  
06121 PERUGIA  
[sereco@serecobiotest.it](mailto:sereco@serecobiotest.it)  
[www.serecobiotest.it](http://www.serecobiotest.it)

# **ANALISI E RIDUZIONE DELLA RICHIESTA ENERGETICA NELLA PRODUZIONE DI BIOETANOLO CON INTEGRAZIONE DI PROCESSO**

## **1. Introduzione**

La produzione di etanolo da biomasse agricole con la fermentazione è un processo ben conosciuto. Negli ultimi anni è stata osservata una crescente importanza dell'etanolo nel settore dei carburanti liquidi. Questa importanza è rafforzata dall'aumento del prezzo del petrolio e dalla diminuzione delle risorse petrolifere così come dall'aumento della consapevolezza della neutralizzazione della CO<sub>2</sub>. In tale contesto l'Unione Europea regola per legge che il 2% e il 5,75% della domanda di carburanti liquidi venga coperta da risorse rinnovabili per il 2005 e il 2010 rispettivamente. Per incontrare le linee guida, oltre alla produzione di biodiesel, anche la produzione di bioetanolo così come per altri carburanti da fonti rinnovabili deve essere aumentata.

La competitività economica del processo produttivo dell'etanolo dipende fortemente dalla quantità di calore e potenza usata. Per incrementare l'efficienza dell'etanolo come carburante liquido comparata alla produzione di carburante dal petrolio greggio, è stato proposto un certo numero di scale di ottimizzazione riguardanti la purificazione dell'etanolo, poiché soprattutto la concentrazione e l'eliminazione dell'acqua richiedono una grande quantità di energia termica.

Per affrontare questa elevata domanda di energia e per migliorare i benefici del processo, il concetto di poligenerazione è di crescente interesse per soddisfare i bisogni dell'ecologia e dello sviluppo locale, specialmente quando si ha a che fare con impianti di etanolo a piccola scala.

Poligenerazione significa la produzione di calore (vapore), energia elettrica e sottoprodotti (biogas, fertilizzanti, alimenti zootecnici) in combinazione con il processo del bioetanolo utilizzando residui della preparazione del bioetanolo e della biomassa.

Indagini tanto lontane sono spesso circoscritte all'abilità nella separazione della miscela etanolo-acqua e alla domanda energetica dei singoli processi di separazione. Solo una piccola attenzione viene data alla richiesta energetica dell'intero processo di produzione dell'etanolo.

In questo lavoro viene esaminata la domanda totale energetica del processo di produzione fermentativo dell'etanolo da biomasse agricole con una particolare attenzione alla concentrazione e al "dewatering" dell'etanolo. Usando una simulazione di processo, la richiesta energetica della produzione di etanolo e del "dewatering" viene calcolata per creare dati di base per l'analisi delle possibilità di coprire la domanda energetica con l'utilizzazione del calore residuale e per integrare un impianto di produzione dell'etanolo in una rete esistente di mezzi per la produzione di calore ed energia da fonti rinnovabili (produzione di biogas, combustione di biomassa ed energia eolica).

## **2. Strumento di simulazione e modelli di processo**

Per modellare le differenti unità di processo così come per calcolare il calore e la richiesta energetica dell'intero processo, è stato usato il pacchetto software industriale IPSEpro<sup>®</sup>. IPSEpro<sup>®</sup> è uno strumento di simulazione equation-oriented progettato per l'uso della distribuzione dell'energia. Lo strumento software consiste in due parti: il processo di simulazione ambientale (PSE) in cui le singole fasi del processo così come la configurazione dell'intero processo possono essere modellati e il kit di sviluppo del

modello (MDK) in cui possono essere create unità definite utenti. Oltre all'opzione di sviluppare le unità definite utenti, lo strumento offre anche la possibilità di applicare funzioni matematiche assai complesse attraverso link librari dinamici (DLL) che possono essere realizzati con differenti programmi di linguaggio (C/C++, Pascal). Le unità sviluppate si basano sull'unità standard libraria commercializzata (APP-LIB) di IPSEpro<sup>®</sup> che è stata estesa con le unità richieste (macinatura, fermentazione, distillazione, adsorbimento, etc...) così come con i dati delle sostanze necessarie per l'etanolo, gli enzimi desiderati e i catalizzatori così come la biomassa usata. Rispetto ad altri strumenti di simulazione (ASPENplus<sup>®</sup>, CHEMCAD<sup>®</sup>, etc...) la struttura flessibile di IPSEpro<sup>®</sup> in termini di estensibilità e di applicazione dei modelli rappresenta un grande vantaggio per realizzare tale studio [A. Friedl, 03].

## 2.1 Produzione di bioetanolo

Il modello del processo della produzione di bioetanolo è basato su dati di letteratura riguardanti lo stato dell'arte (Fig. 1). Dopo aver macinato il materiale grezzo e aver mescolato la farina con acqua, avvengono le fasi di liquefazione e saccharificazione, in cui viene prodotta la fermentazione della purea. In seguito, il saccarosio viene convertito ad al alcol ed anidride carbonica durante la fermentazione. A seconda della configurazione impiantistica, il numero delle unità di fermentazione può variare.

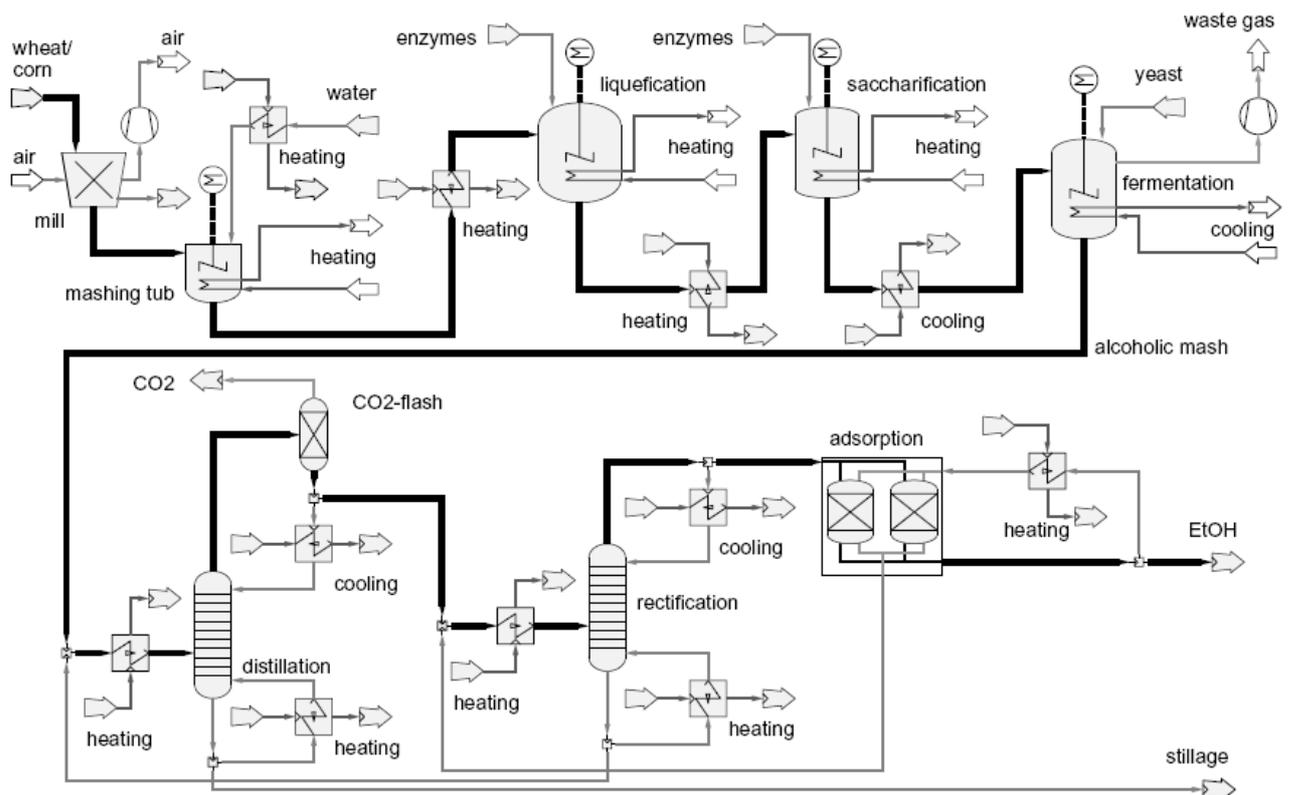


Fig. 1: Diagramma di flusso del processo di produzione del bioetanolo (tratto da *Applied thermal Engineering*, 27-2007).

La quantità di etanolo ottenuto risulta dall'analisi elementare della biomassa usata e dal contenuto zuccherino del materiale in fermentazione dopo la liquefazione e la saccharificazione. Se non è disponibile la composizione elementare della biomassa, si utilizza un modello semplificato basato solamente sul contenuto zuccherino della purea

prima della fermentazione. In questo caso non è possibile calcolare la composizione dei sottoprodotti e giudicarne la qualità.

In entrambi i casi il calcolo considera la stechiometria della formazione dell'etanolo (Eq. 1), la frazione degradabile della biomassa e la tossicità massima di circa l'8% (su massa) dell'etanolo in una purea alcolica così come il comportamento esotermico della reazione (-58,75 kJ/mol di etanolo).



L'anidride carbonica prodotta in modo equimolare in parte è disciolta nella purea alcolica seguendo la legge di Henry, mentre il gas rimanente viene rimosso dal processo produttivo attraverso un'uscita del gas dall'unità di fermentazione.

La purificazione dell'etanolo consiste in due fasi di rettificazione e inizia con la separazione dell'etanolo dal brodo di fermentazione utilizzando la distillazione in colonna di birra. In cima a questa colonna, operando a 85 °C e alla pressione di 1,5 bar, l'anidride carbonica viene strippata dalla soluzione di etanolo e conduce ad una concentrazione di etanolo di circa il 40-45% (su massa) nel lato del flusso. Questo etanolo viene ulteriormente concentrato fino al 94% (su massa) nella colonna di rettificazione. Successivamente, l'etanolo viene privato dell'acqua usando un adsorbimento su setaccio molecolare fino ad un contenuto di etanolo del 99,7% (su massa). La concentrazione e il dewatering dell'etanolo si basano sul concetto descritto da NREL. Il modello della sezione di distillazione tiene conto degli inerti solubili e insolubili così come dei sottoprodotti quali fusel oil e acidi organici. Il contenuto di acidi organici nell'etanolo anidro sta sotto lo 0,007% (su massa) e soddisfa lo Standard Europeo EN228.

Per migliorare la performance economica degli impianti di etanolo, la trebbia libera da etanolo viene convertita in DDGS (grani secchi e solubili del distillato). Questo prodotto molto proteico viene venduto come mangime zootecnico. La prima fase del processo del modello IPSEpro® del sistema produttivo del DDGS consiste in un decanter per separare il materiale secco da quello liquido (Fig. 2). Il liquido viene concentrato in un evaporatore a tre stadi e la soluzione concentrata ricombinata con il decanter si rapprende dando una miscela con un contenuto in sostanza secca del 25-30% (su massa). Questa specie di "torta" ricombinata e la soluzione vengono infine fatte passare in un tubo essiccante a vapore dando un prodotto finale con un contenuto in sostanza secca del 90% (su massa).

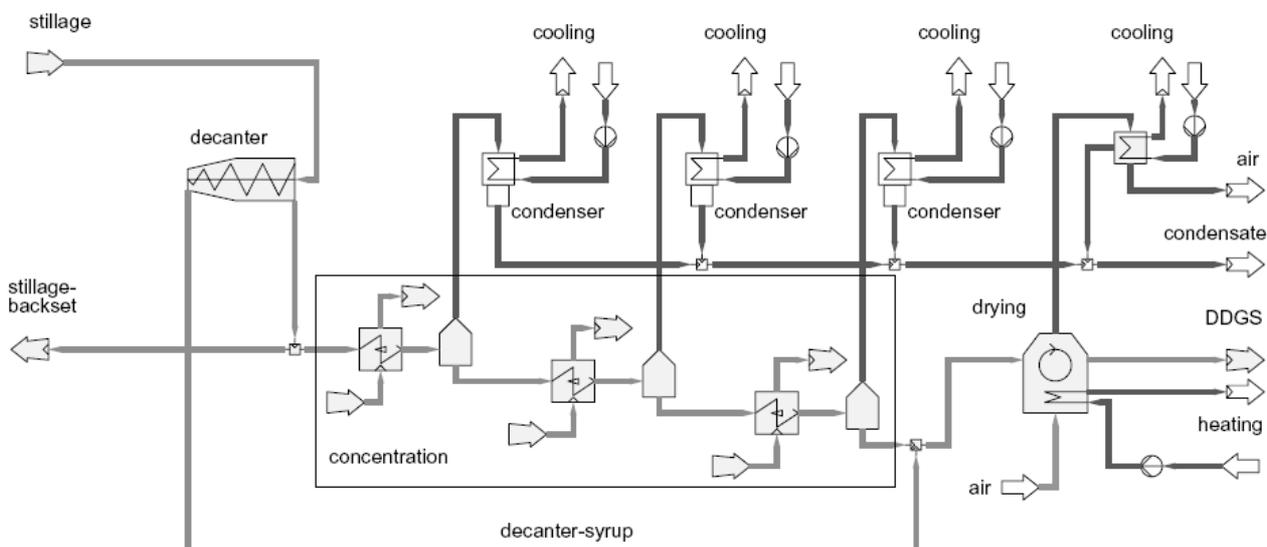


Fig. 2: Diagramma di flusso del sistema di produzione di DDGS (tratto da *Applied thermal Engineering*, 27-2007).

## 2.2 La Produzione di biogas

Come alternativa alla produzione di DDGS, che necessita di una grande quantità di energia, la trebbia proveniente dalla colonna di birra può essere usata per produrre biogas, che può essere convertito in calore o energia elettrica.

Il modello per la produzione di biogas consiste in due stadi di fermentazione (Fig. 3). La composizione del gas viene calcolata secondo l'equazione di Buswell che si basa su un'analisi elementare delle biomasse impiegate. La quantità di biogas prodotto viene calcolata a partire dal carbonio disponibile del materiale grezzo. A seconda del materiale grezzo sia il carbonio che l'idrogeno sono fattori limitanti per la produzione di metano [Pfeffer, 04].  $H_2S$  che si forma durante la digestione anaerobica viene eliminata dal biogas in uno scrubber munito di batteri immobilizzati prima della conversione del biogas in calore o energia elettrica. Per la conversione del biogas può essere usato qualsiasi impianto-CHP (motore a gas) per la produzione di energia elettrica e vapore dalla canna fumaria del motore a gas o una caldaia alimentata a biogas per produrre solo vapore.

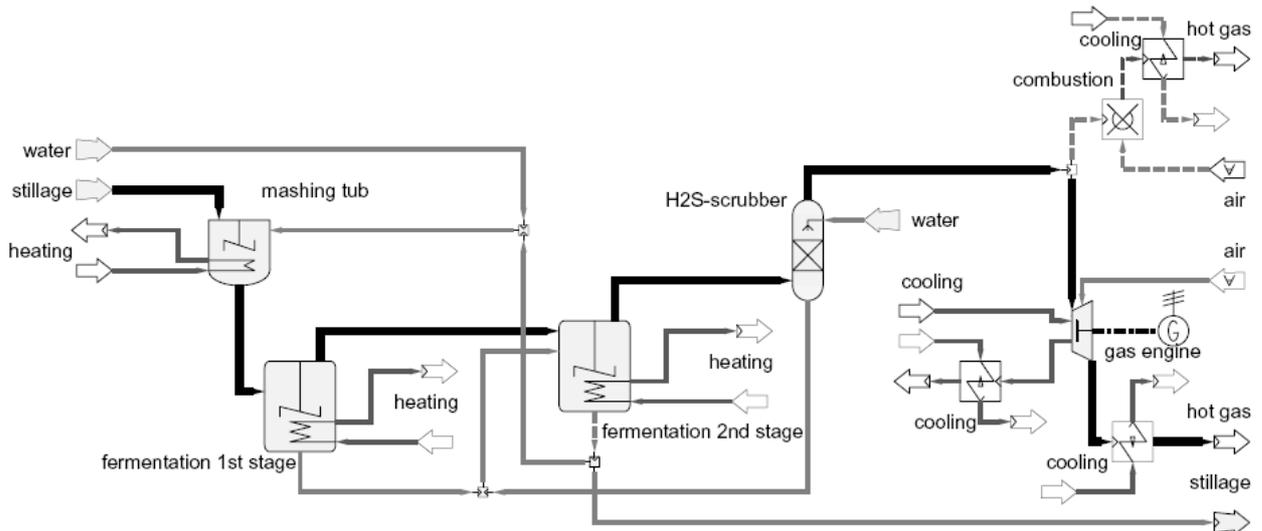


Fig. 3: Diagramma di flusso del processo produttivo del biogas (tratto da *Applied thermal Engineering*, 27-2007).

Per calcolare l'impianto-CHP (motore a gas), viene utilizzato un modello sviluppato prima, mentre la seconda via per l'utilizzazione del biogas consiste in una camera di combustione standard seguita da una caldaia a vapore standard. Il vapore prodotto può essere direttamente usato nel processo di distillazione. Un possibile eccesso di energia termica può essere trasferito ad una turbina a vapore per produrre energia elettrica che può essere erogata ad una rete energetica locale. Il calcolo della produzione del biogas al momento si basa solo sulla trebbia dopo la colonna di birra, senza cofermentazione di biomasse aggiuntive. Sono in preparazione prove sperimentali per la produzione di biogas da questi materiali e da altre miscele alimentari.

## 3. Risultati

Applicando i modelli introdotti, è stata simulata la domanda di calore e il recupero di calore della produzione di bioetanolo dal frumento come materiale di partenza. I calcoli

si sono basati su taglie di impianto di 15.000/60.000/100.000/200.000 t/a di etanolo. La taglia dell'impianto più piccolo è sufficiente a coprire le richieste petrolifere di una tipica regione rurale in Austria. L'impianto con una capacità progettata di 200.000 t/a di etanolo carburante fornisce sufficiente etanolo da sostituire il 5,75% della benzina totale consumata oggi in Austria come carburante alternativo. I risultati presentati in questo lavoro non comprendono nessuna perdita di calore o di miscelazione o per il pompaggio. Nella Tabella 1 vengono elencate le principali richieste di calore e di calore riutilizzabile dalle differenti unità ottenute dalla simulazione del processo produttivo dell'etanolo. La Tabella 1 comprende anche la richiesta termica per la produzione di 30.000 t/a di DDGS da trebbia libera da alcol. Valori positivi rappresentano una domanda di calore, mentre valori negativi si riferiscono a calore disponibile. I dati presentati corrispondono ad un impianto la cui taglia è di 60.000 t/a di etanolo.

Heat streams in ethanol, DDGS and biogas production (plant size 60,000 t/a ethanol, 50% stillage recycling, 30,000 t/a DDGS)

Process step	Temperature (°C)	Heat (MW)
<i>Ethanol production</i>		
Mashing	20 → 60	5.5
Liquefaction	60 → 90	4.6
Saccharification	90 → 60	-4.6
Fermentation	60 → 35	-3.8
Fermenter cooling	35	-2.5
Preheating feed beer column	35 → 90	5.9
Beer column, condenser	91 → 85	-1.2
Beer column, reboiler	115 → 116	13.0
Cooling overhead beer column	85 → 35	-0.29
Cooling prod. beer column	103 → 60	-10.0
Cooling stillage	116 → 35	-6.7
Preheating feed rectification column	60 → 140	2.1
Rectification, condenser	135 → 134	-12.4
Rectification, reboiler	142 → 148	14.7
Cooling recycle rectification column	148 → 35	-2.0
<i>DDGS-production</i>		
Preevaporator	35 → 95	1.7
Evaporation	95 → 126	3.5
Evaporation, condenser	100 → 99	-2.7
Cooling syrup	126 → 95	-0.12
Dryer	95 → 120	5.3
Dryer, condenser	105 → 99	-5.2
Cooling DDGS	120 → 35	-0.14

Tab. 1

I risultati della simulazione sono stati analizzati usando un'integrazione di calore. Le Figg. 4 e 5 presentano i flussi caldi e freddi del processo in un grafico temperatura-entalpia rispettivamente per la produzione di bioetanolo e per la combinazione bioetanolo/DDGS. I risultati mostrano chiaramente la possibilità di un'integrazione di calore nel processo produttivo del bioetanolo così come un'integrazione di calore nel sistema produttivo di DDGS, permettendo un uso più efficiente del calore.

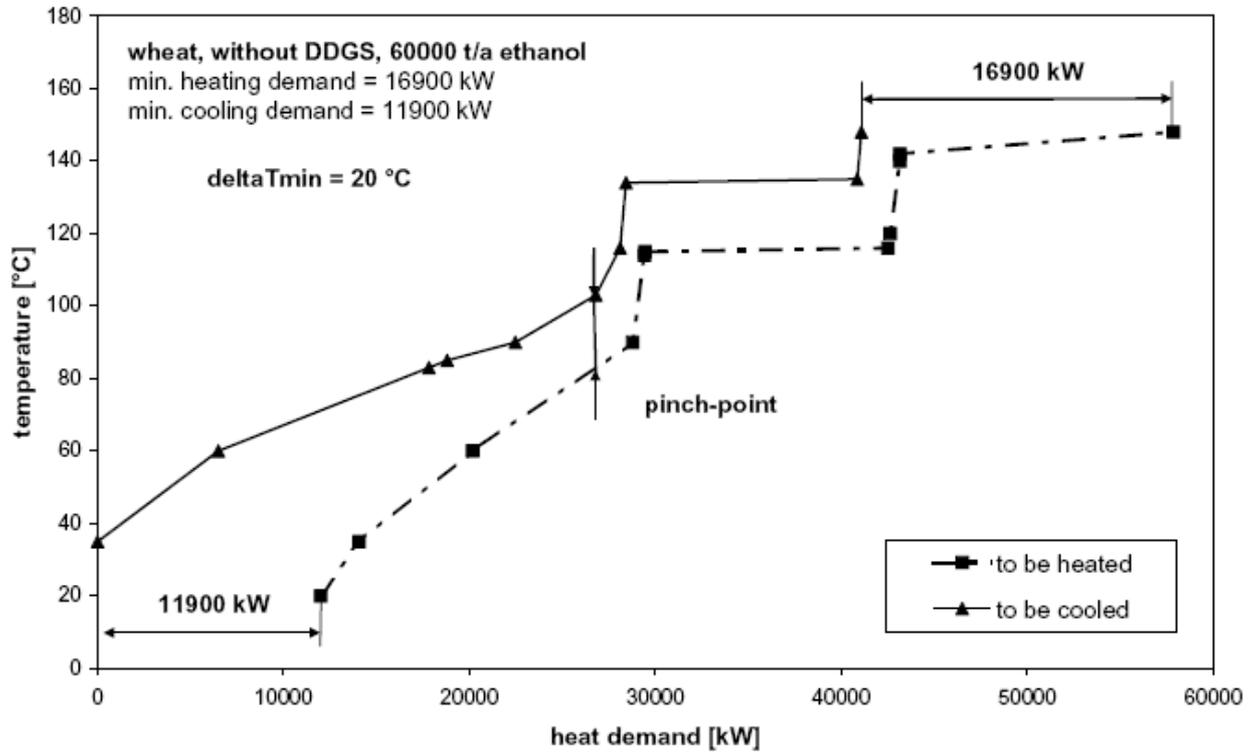


Fig. 4: Richiesta termica per la produzione di etanolo da frumento per una taglia di impianto di 60.000 t/a (senza produzione di DDGS) (tratto da *Applied thermal Engineering*, 27-2007).

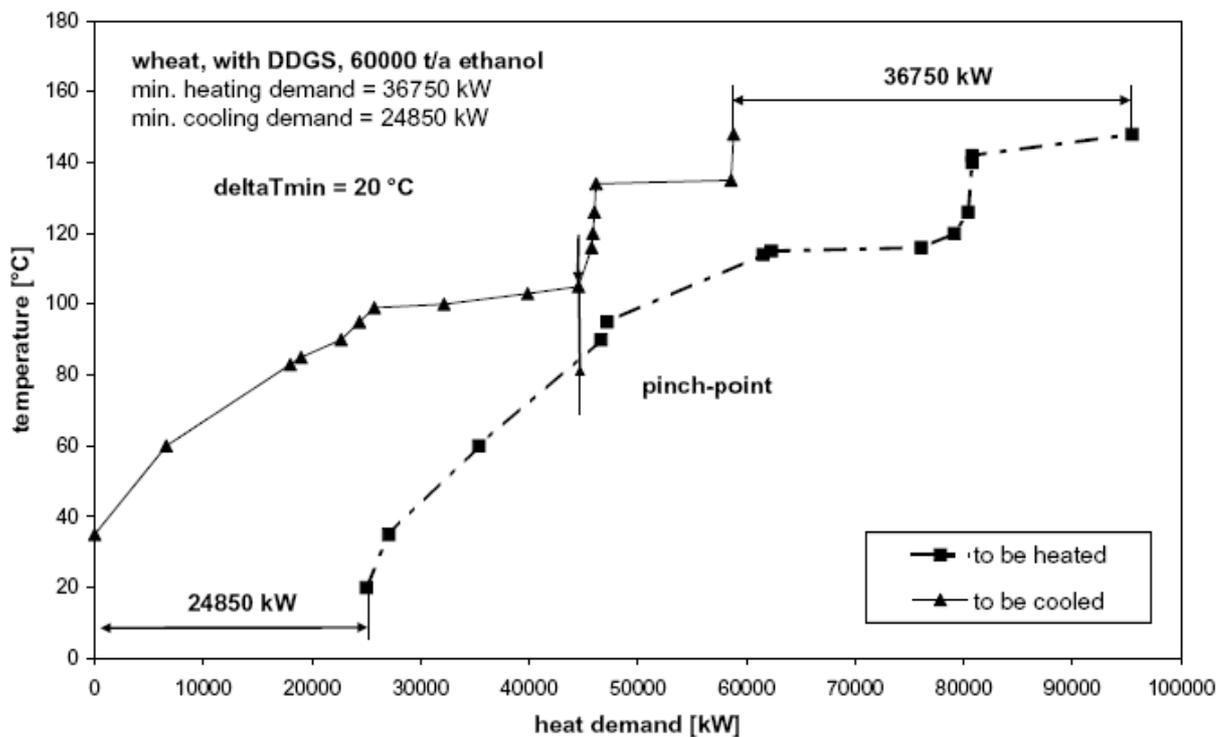


Fig. 5: Richiesta termica per la produzione di etanolo da frumento per una taglia di impianto di 60.000 t/a (con il 100% di produzione di DDGS) (tratto da *Applied thermal Engineering*, 27-2007).

Molto importante è l'ottimizzazione del sistema colonna. La domanda di calore può essere ridotta riscaldando la colonna di birra con il vapore superiore della colonna di

rettificazione. Questo è possibile adeguando la pressione a 1,5 bar e a 6,5 bar in cima alla colonna della colonna di birra e nella colonna di rettificazione rispettivamente. Il surplus termico del raffreddamento delle trebbie può essere usato per preriscaldare il flusso di alimentazione della colonna di birra. La domanda termica per riscaldare l'acqua di alimentazione nella vasca di miscelazione e il flusso di alimentazione nella fase di liquefazione può essere soddisfatta dal raffreddamento del vapore secondario (flusso prodotto) della colonna di birra e dall'eccedenza termica che si verifica nel condensatore della colonna di birra. Nonostante il riutilizzo del calore all'interno del processo, è importante considerare la richiesta minima necessaria per il raffreddamento nel processo di produzione del bioetanolo (Fig. 4 e 5).

Per un impianto da 60.000 t/a di bioetanolo, la produzione combinata di etanolo e DDGS fa incrementare la domanda termica a 36.750 kW rispetto a 16.900kW di impianti di etanolo privi del complesso produttivo dei DDGS.

Bisogna considerare che il diagramma entalpia-temperatura riguarda solo la domanda minima di riscaldamento e raffreddamento. Analizzando le possibilità di coprire la domanda termica con l'utilizzo del biogas, viene usata una richiesta energetica "fattibile" per riscaldare e per raffreddare, tenendo in considerazione solo un numero limitato di unità di trasferimento termico. La Fig. 6 mostra le differenze tra la richiesta termica totale, sommando i singoli stadi del processo (senza integrazione termica), la richiesta termica fattibile e la richiesta termica minima per diverse combinazioni di processo.

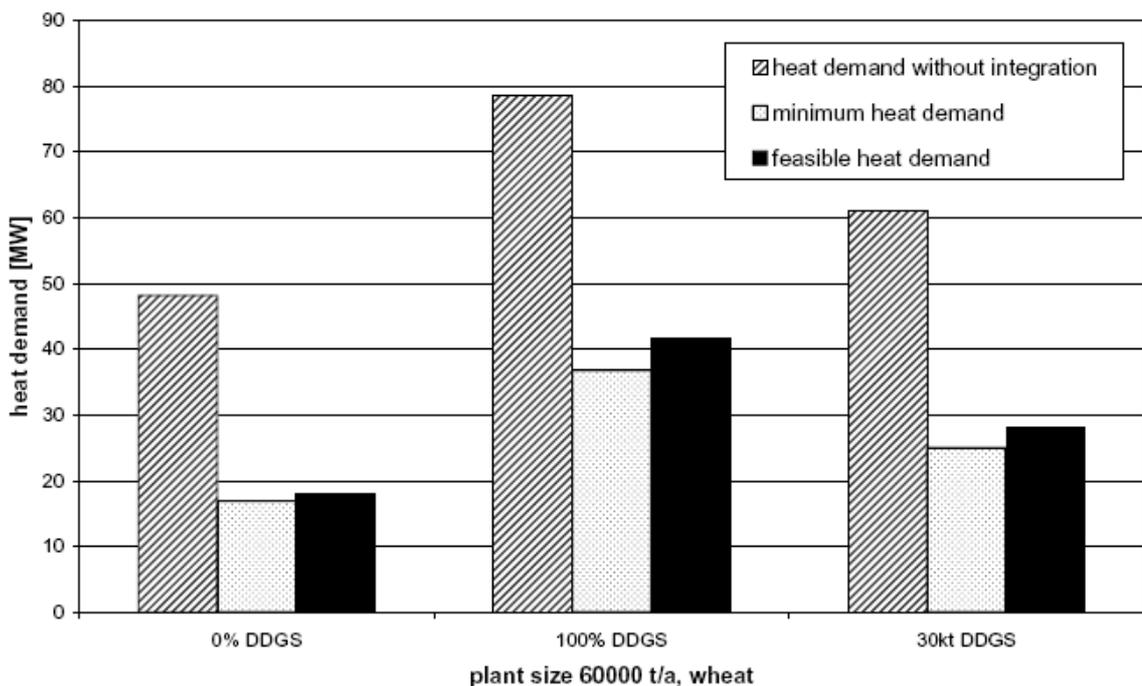


Fig. 6: Confronto globale tra domanda termica (senza integrazione), minima domanda termica e domanda termica fattibile (tratto da *Applied thermal Engineering*, 27-2007).

In Fig. 7 vengono presentati i risultati delle combinazioni del processo studiato per un impianto di capacità di 60.000 t/a di etanolo in termini di domanda termica fattibile, domanda termica copribile utilizzando biogas ed energia elettrica prodotta. Si può notare che l'utilizzazione del biogas in un motore a gas difficilmente contribuisce a ridurre la domanda esterna di calore durante la produzione di bioetanolo, ma fornisce una considerevole quantità di energia elettrica. Impiegando una caldaia a gas per convertire il biogas in vapore di processo, può essere coperto circa il 66% della

richiesta termica durante la produzione di etanolo (senza DDGS), considerando, quindi, l'utilizzo del biogas prodotto dalle trebbie.

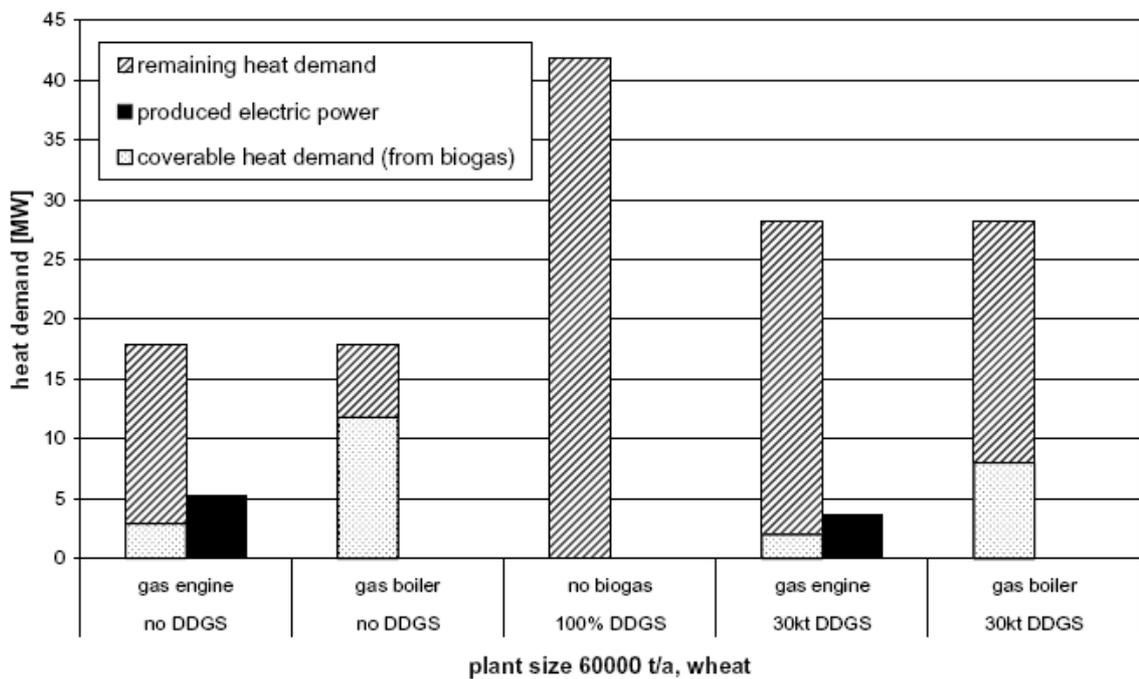


Fig. 7: Riassunto dell'analisi della richiesta termica per le diverse combinazioni di processo (60.000 t/a etanolo da frumento) (tratto da *Applied thermal Engineering*, 27-2007).

Aumentare la taglia dell'impianto a 200.000 t/a di etanolo conduce alla possibilità di coprire un po' di più del 75% del totale della richiesta energetica dell'impianto di bioetanolo, in quanto l'efficienza nella produzione di etanolo, specialmente nella separazione e nell'efficienza termica della purificazione dell'etanolo, risulta aumentata. Ma supponendo una differenza minima di temperatura di 20°C tra flusso caldo e freddo non è possibile coprire la domanda totale di calore del sistema produttivo del bioetanolo con il calore dalla combustione del biogas prodotto dalle trebbie dell'impianto di etanolo (Fig. 8).

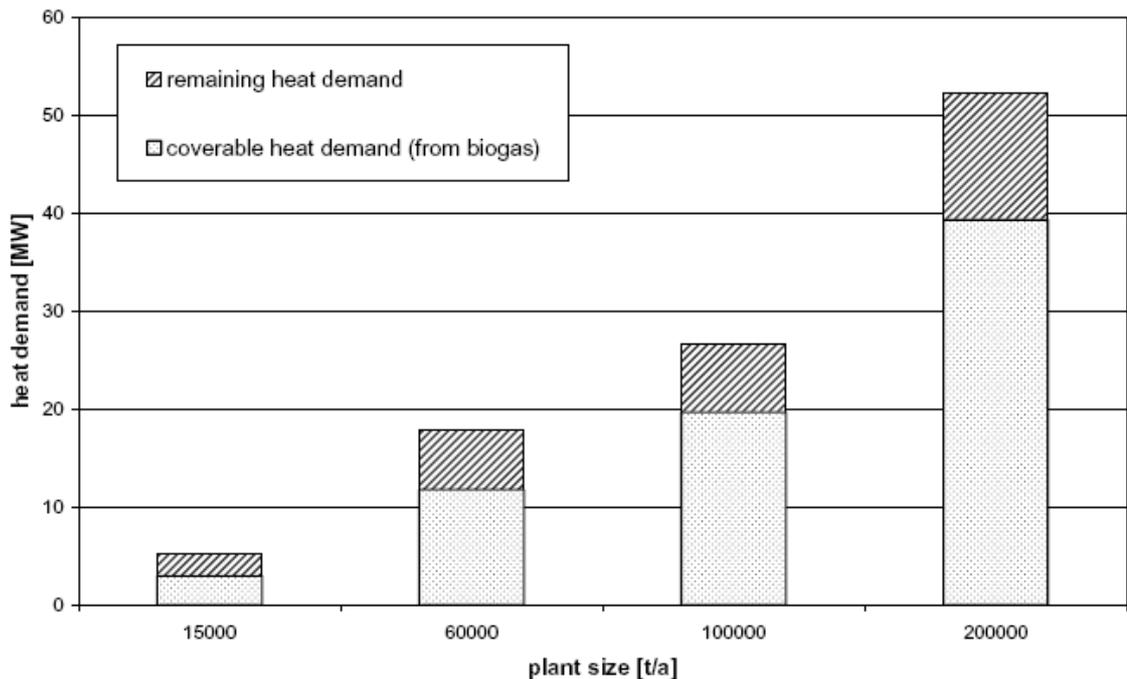


Fig. 8: Domanda termica e domanda termica copribile in funzione della taglia dell'impianto (frumento, biogas bruciato in caldaia) (tratto da *Applied thermal Engineering*, 27-2007).

#### 4. Conclusioni e prospettive

Per diminuire la domanda energetica esterna durante la produzione di bioetanolo, l'integrazione termica basata sull'integrazione di processo viene usata per integrare un impianto produttivo di etanolo in una rete esistente di sistemi per la produzione di calore ed energia elettrica da risorse rinnovabili.

I sottoprodotti della fermentazione dell'etanolo sono stati studiati per la produzione di biogas e per la conversione in calore ed energia elettrica per coprire la richiesta termica nel sistema produttivo dell'etanolo.

L'analisi del processo del bioetanolo mostra che l'integrazione termica della distillazione e della rettificazione permette la più grande riduzione della domanda di calore. Ma una notevole quantità di calore è pure necessaria nelle sezioni di liquefazione e di saccarificazione per raggiungere una temperatura di 60 °C e 90 °C rispettivamente.

A seconda del tipo di utilizzazione del biogas e della taglia dell'impianto, è possibile coprire più del 76% della richiesta energetica totale del processo del bioetanolo (senza produzione di DDGS) dal biogas, prodotto dai residui della produzione del bioetanolo e basato sul biogas disponibile fornito dalle trebbie.

Il fattore limitante potrebbe essere la taglia dell'impianto di biogas necessario per digerire la quantità presente di trebbie. Impiegando una parte delle trebbie per la produzione di DDGS diminuisce la taglia dell'impianto indispensabile di biogas, ma anche si riduce la quantità di calore che deriva dall'utilizzazione del biogas. Allo stesso tempo la domanda termica del processo aumenta poiché la produzione di DDGS necessita di una grande quantità di energia.

Un altro lavoro sarà quello di studiare la possibilità di usare la paglia (combustione della paglia, cofermentazione) per coprire la richiesta termica della produzione combinata bioetanolo/DDGS/biogas, facendo particolare attenzione all'impiego del biogas per la generazione di energia elettrica invece che di calore. Ulteriori ricerche si

indirizzeranno verso l'impiego di processi alternativi di separazione che richiedono meno calore o che sono in grado di usare calore a livelli termici più bassi per ottenere infine un sistema altamente efficiente per la produzione di bioetanolo come carburante liquido prodotto da risorse rinnovabili.

### ***Riferimenti bibliografici***

A.Friedl, P.Shausberger, G.Rheina-Wolbeck, M.Harasek, E.Perz, *Enhancement of an object-oriented power plant simulator by seawater desalination topics*, Desalination 156 (1-3) (2003) 355-360.

M.Pfeffer, A.Friedl, *Modelling of energy production from biomass - A comparison of biogas and combustion processes*, in: Proceedings of the Second Biomass World Conference, Rome, Italy, 2004.

Dott. Agr. Roberto Poletti