

# LA MECCANICA AGRARIA OGGI

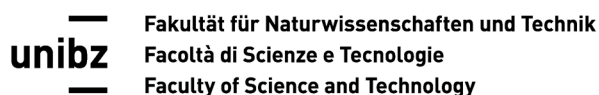
**UN CONFRONTO APERTO SU CONCETTI  
IDEE E ASPETTATIVE DI UNA DISCIPLINA IN CONTINUA EVOLUZIONE**

a cura di Marco Bietresato e Fabrizio Mazzetto

Atti dell'omonimo convegno tenutosi  
presso la libera Università di Bolzano e il NOI-Techpark  
Bolzano, 23-24 novembre 2017

*cleup*

**Pubblicazione realizzata con il contributo di**



#### **Curatori**

- Marco BIETRESATO, Libera Università di Bolzano, Facoltà di Scienze e Tecnologie
- Fabrizio MAZZETTO, Libera Università di Bolzano, Facoltà di Scienze e Tecnologie

#### **Comitato scientifico**

- Paolo BALSARI, Università degli Studi di Torino, Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari
- Raffaele CAVALLI, Università degli Studi di Padova, Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-forestali
- Giovanni Carlo DI RENZO, Università degli Studi della Basilicata, Scuola di Scienze Agrarie, Forestali, Alimentari ed Ambientali
- Andreas GRONAUER, Universität für Bodenkultur Wien, Department of Sustainable Agricultural Systems
- Fabrizio MAZZETTO, Libera Università di Bolzano, Facoltà di Scienze e Tecnologie
- Giovanni MOLARI, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari
- Danilo MONARCA, Università degli Studi della Tuscia, Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali
- Gianfranco PERGHER, Università degli Studi di Udine, Dipartimento di Scienze Agroalimentari, Ambientali e Animali
- Felice PIPITONE, Università degli Studi di Palermo, Dipartimento Scienze Agrarie e Forestali
- Giuseppe ZIMBALATTI, Università Mediterranea di Reggio Calabria, Dipartimento di Agraria

#### **Comitato organizzativo**

- Marco BIETRESATO, Libera Università di Bolzano, Facoltà di Scienze e Tecnologie
- Raimondo GALLO, Libera Università di Bolzano, Facoltà di Scienze e Tecnologie
- Fabrizio MAZZETTO, Libera Università di Bolzano, Facoltà di Scienze e Tecnologie

**DOI:** 10.23737/MECCANICA\_AGRARIA\_OGGI.HTML  
[https://doi.org/10.23737/MECCANICA\\_AGRARIA\\_OGGI.HTML](https://doi.org/10.23737/MECCANICA_AGRARIA_OGGI.HTML)

Prima edizione: luglio 2018

ISBN 978 88 6787 947 2

© 2018 CLEUP SC

“Coop. Libreria Editrice Università di Padova”  
via G. Belzoni 118/3 – Padova (t. +39 049 8753496)

[www.cleup.it](http://www.cleup.it)

[www.facebook.com/cleup](https://www.facebook.com/cleup)

Tutti i diritti di traduzione, riproduzione e adattamento, totale o parziale, con qualsiasi mezzo (comprese le copie fotostatiche e i microfilm) sono riservati.

In copertina: disegno di Giovanna Bampa e Ian Carta, Ufficio Stampa ed Organizzazione Eventi, Libera Università di Bolzano.



# Controllo fuzzy di digestori a doppio stadio: sperimentazione a scala di laboratorio per la produzione di bioidrogeno e biometano

Roberto OBERTI<sup>1</sup>, Aldo CALCANTE<sup>1</sup>, Alberto FINZI<sup>1</sup>, Giorgio PROVOLO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali-DiSAA, Università degli Studi di Milano, Via Celoria 2,  
20133 Milano

## Sommario

Il processo a doppio stadio è una semplice variante della tradizionale digestione anaerobica di biomasse che avviene in due distinti reattori in serie, che permette rese complessive migliori, oltre alla produzione di una significativa quantità di idrogeno a fianco del classico biogas ricco in metano. A tali benefici corrispondono però incrementi nei costi impiantistici e nella complessità di gestione di processo che deve bilanciare le diverse esigenze dei due stadi alimentati sequenzialmente. Lo studio esplora l'uso di un controllo a logica fuzzy per ottimizzare in modo dinamico il carico organico dell'alimentazione, adeguandolo all'andamento del processo sulla base dei valori delle principali variabili misurati online da sensori online.

Nell'ambito di una sperimentazione di lunga durata è stato monitorato il funzionamento di due identici impianti a doppio stadio a scala di laboratorio, confrontando il comportamento di un impianto alimentato dal sistema a controllo fuzzy con uno alimentato a carico costante. Grazie alla capacità di adattare dinamicamente il carico organico in funzione dello stato di processo, il sistema fuzzy ha dimostrato sia capacità di produrre significativamente più energia, sia di recuperare instabilità di processo determinate da sovralimentazioni.

Infine, il carattere interdisciplinare della ricerca viene poi discusso alla luce dell'interessante tema del Convegno, ricavandone alcuni aspetti attuali della figura del Meccanico Agrario.

*Parole chiave:* biogas; idrogeno; controllo automatico; logica fuzzy.

## 1. Introduzione

Accogliendo volentieri gli spunti di riflessione proposti dall'interessantissimo tema del Convegno, fra le diverse linee di ricerca attive presso il gruppo di meccanica del DiSAA di Milano, invece di una relazione incentrata su un argomento di tipico dominio meccanico-agrario, inerente a esempio una macchina agricola, si è intenzionalmente scelto di presentare una relazione in un ambito di ricerca tradizionalmente interdisciplinare per il nostro settore: la valorizzazione energetica degli effluenti zootecnici. Risalgono, infatti, agli anni '70 del secolo scorso le prime pionieristiche ricerche sul biogas nate proprio per un'iniziativa collaborativa tra meccanici, costruttori e microbiologi agrari che, in breve tempo, portarono alcuni centri italiani alla leadership mondiale su tale argomento. In anni più recenti, poi, la collaborazione in tali ambiti, specie per quanto attiene

gli usi in concimazione o fertirrigazione dei digestati, si è estesa, oltre che agli agronomi, anche agli idraulici agrari. La tematica proposta può, quindi, essere considerata un caso paradigmatico di collaborazione interdisciplinare che si realizza con l'applicazione di competenze trasversali all'intera Ingegneria agraria.

Nello specifico, il lavoro presentato riguarda un'attività di ricerca, ormai quasi decennale presso il DiSAA di Milano, condotta sul processo a doppio stadio, una semplice ma innovativa variante della tradizionale digestione anaerobica. Il doppio stadio prevede la separazione del processo di fermentazione della biomassa in due distinti reattori posti in serie, ciascuno caratterizzato da condizioni ottimali per due diversi consorzi microbici: nel primo si ha un ambiente acido che favorisce l'idrogenogenesi, mentre nel secondo esso è alcalino e favorisce la metanogenesi. In questo modo, diventa possibile intercettare e raccogliere l'idrogeno gassoso prodotto nelle prime fasi di più rapida degradazione della biomassa, confinate nel primo reattore, e usare i suoi prodotti effluenti, principalmente acidi grassi volatili, per alimentare la successiva e più lenta metanazione che avviene nel secondo reattore, senza interferire, anzi addirittura favorendo, la resa complessiva del processo.

Il processo a doppio stadio qui considerato, dunque, in aggiunta al classico biogas ricco in metano, si caratterizza per la produzione di una significativa quantità di idrogeno, un combustibile di evidente interesse applicativo –anche in ambito motoristico– per le sue qualità di elevatissima compatibilità ambientale.

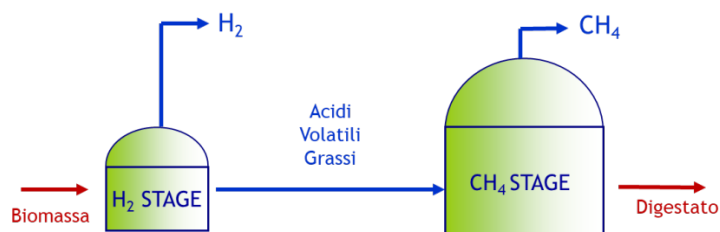


Figura 1 – Nel processo a doppio stadio, la tradizionale digestione anaerobica è separata in due reattori posti in serie: nel primo le condizioni acide favoriscono consorzi microbici specifici produttori di idrogeno gassoso; gli effluenti di questo stadio, ricchi di acidi grassi volatili, alimentano il secondo reattore dove avviene la successiva fase di metanazione favorita dall'ambiente alcalino.

A tali benefici in termini di natura dei prodotti ottenuti e di rendimento complessivo rispetto alla digestione anaerobica tradizionale, corrispondono però incrementi nei costi impiantistici e nella complessità di gestione di processo. Infatti, essendo i due stadi alimentati sequenzialmente, il funzionamento complessivo del processo è esposto a due opposti rischi di sbilanciamento:

- a) rischi di sovraccarico: elevati carichi organici di alimentazione, da un lato, favoriscono lo stadio idrogenogenico, caratterizzato da dinamiche di degradazioni più rapide, con conseguente elevata produzione di idrogeno gassoso e di acidi volatili grassi nell'effluente che alimenta lo stadio metanogeno; d'altro canto, il processo di metanazione soffre in caso di eccessivo apporto di acidi volatili grassi che devono poter essere metabolizzati dai consorzi microbici nel secondo reattore senza che si verifichino accumuli a concentrazioni che risultino inibenti (in genere si considera il limite critico di 3 g/L di AGV nel reattore metanogenico);
- b) rischi di sottoalimentazione: un moderato carico organico di alimentazione assicura una regolare produzione di metano, consentendo al secondo stadio di consumare il ridotto apporto di acidi volatili grassi provenienti dal primo stadio dove, tuttavia, si hanno produzioni sub-ottimali di idrogeno.

E' dunque evidente che il carico organico di alimentazione, ossia la concentrazione di biomassa prontamente biodegradabile (o di solidi volatili) nell'aliquota giornaliera di alimentazione, rappresenta una delle principali variabili che influenzano la produzione, il cui valore deve quindi venire attentamente bilanciato, adattandolo all'evoluzione osservata nel processo, in modo da ottimizzarne le rese senza incorrere in rischi di instabilità o addirittura di blocco.

La soluzione ideale a un tale problema consiste in un sistema di controllo di tipo feedback del carico organico di alimentazione, basato sulla misura on-line della concentrazione di acidi volatili grassi presenti nel reattore del secondo stadio e/o nell'effluente in uscita dal primo stadio che, come visto, alimenta il secondo. Tuttavia, allo stato non esistono sistemi di misura on-line, ad adeguata semplicità e costi sostenibili, in grado di determinare la concentrazione e le specie di acidi volatili grassi presenti nel brodo di reazione.

Come possibile alternativa, questo studio ha esplorato l'uso di un controllo a logica fuzzy, valutando la sua capacità di stimare lo stato nei due reattori mediante variabili di processo semplici da misurare e di reagire conseguentemente regolando il carico organico dell'alimentazione. Infatti, per la peculiarità capacità di tradurre in regole formali il ragionamento intuitivo, e spesso approssimativo, proprio dell'esperto umano, l'impiego della logica fuzzy si è spesso dimostrato efficace in applicazioni a sistemi complessi, come nel caso di bioprocessi che mostrano dinamiche non facilmente modellabili.

## 2. Materiali e metodi

Lo studio si è basato su due identici impianti sperimentali (di seguito indicati con CC e FC) a doppio stadio realizzati a scala di laboratorio. Ciascun impianto è composto da un primo reattore idrogenogenico, con volume operativo di 4 dm<sup>3</sup>, seguito dal secondo reattore metanogenico, con volume operativo di 15 dm<sup>3</sup>. Ogni reattore è stato equipaggiato con sensori per la misura on-line delle principali variabili di processo (temperatura, pH, portata del biogas prodotto) e con attuatori per la sua gestione automatizzata mediante PC (controllo della temperatura, cicli di miscelazione, scarico effluenti e carico alimentazione). La misura della composizione del biogas prodotto da ciascuno stadio, in particolare la concentrazione di H<sub>2</sub> e di CH<sub>4</sub>, è stata condotta off-line, prelevando un campione con cadenza bigiornaliera dalle sacche di raccolta, che veniva analizzato mediante gas-cromatografia.

Per favorire i diversi consorzi microbici, le condizioni operative nei due reattori sono differenti:

- nel primo stadio (idrogenogenico) la temperatura è  $T=55\pm 1^\circ\text{C}$ , il pH= 5-6, il tempo di ritenzione idraulica HRT=5 d;
- nel secondo stadio (metanogenico) la temperatura è  $T=42\pm 1^\circ\text{C}$ , il pH= 7,5-8, il tempo di ritenzione idraulica HRT=15 d.

Nella sperimentazione il processo è stato alimentato con una miscela costituita da effluenti suini e farinaccio di riso somministrata in due modalità diverse (figura 2). L'impianto CC è stato alimentato con carico organico costante, pari a 20 g<sub>sv</sub>·dm<sup>-3</sup>·d<sup>-1</sup>, ottenuto con una miscela contenente un'aliquota fissa di farinaccio (8%) e liquame (92%). L'impianto FC è stato alimentato con un carico organico variabile, determinato automaticamente dal controllo fuzzy sulla base dei dati rilevati dai sensori, e ottenuto modificando la concentrazione di farinaccio nella miscela di alimentazione.

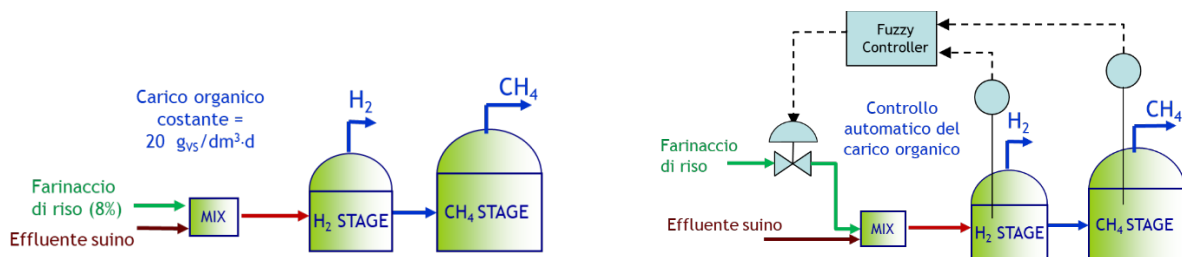


Figura 2 – I due impianti a doppio stadio confrontati nella sperimentazione: a sinistra l'impianto CC, alimentato con carico organico costante; a destra l'impianto FC, alimentato con un carico organico variabile determinato dal controllo fuzzy sulla base dei valori delle principali variabili di processo rilevati dai sensori. Il carico è stato regolato modificando opportunamente la concentrazione di farinaccio nella miscela

I due impianti CC e FC hanno operato in parallelo durante una sperimentazione comparativa di lungo termine, con l'obiettivo di valutare la capacità del sistema di controllo automatico fuzzy di: a) ottimizzare la produzione energetica; b) reagire a situazioni di forte instabilità di processo.

## 2.1 Controllo a logica fuzzy dell'impianto FC

Come evidenziato dalla figura 2, nell'impianto FC (schema a destra) il carico organico dell'alimentazione viene variato, modificando opportunamente la concentrazione di farinaccio nella miscela di alimentazione, dal sistema di controllo a logica fuzzy. Il valore del carico organico da applicare è determinato a partire dalla stima dello stato del processo nei due reattori, mediante semplici variabili di processo (pH, produzione di H<sub>2</sub>, produzione di CH<sub>4</sub>) acquisite dal sistema mediante sensori on-line, eccetto per le concentrazioni di H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> nei biogas inserite manualmente sulla base dei risultati gas-cromatografici. Nel sistema fuzzy, implementato nell'ambiente di programmazione Matlab (Mathworks, USA) i valori di input e le loro variazioni nel tempo sono stati trasformati in variabili qualitative (fuzzificazione mediante funzioni di appartenenza) a cui sono state applicate le regole di inferenza. Gli output ottenuti, corrispondenti alla stima dello stato del processo nei due reattori, sono a loro volta stati acquisiti da un successivo modulo di controllo, le cui regole di inferenza producevano 5 possibili output fuzzy di decisione sul carico organico dell'alimentazione: mantenere, aumentare poco, aumentare molto, ridurre poco, ridurre molto. Tali output, infine, venivano trasformati dallo stadio di defuzzyficazione in valori numerici (sharp output), espressi in termini percentuali del precedente carico organico, e applicati materialmente all'operazione di alimentazione dell'impianto FC.

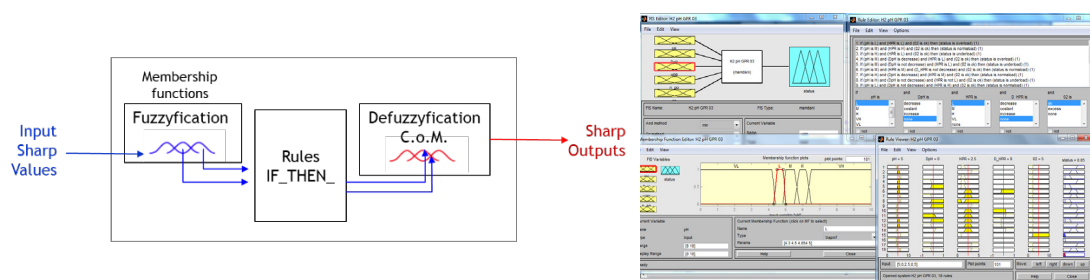


Figura 3 – Schema logico del sistema a logica fuzzy e sua implementazione sperimentale in ambiente Matlab

## 2.2 Esperimento 1: produzione energetica

Dopo l'avvio dei due impianti seguito da una fase di adattamento di durata 20 d, durante la quale per entrambi l'alimentazione è stata la stessa, con carico moderato, è stato avviato un esperimento "di produzione" avente durata 40 d. Durante tale esperimento gli impianti sono stati alimentati con frequenza giornaliera, come da disegno sperimentale: CC a carico organico costante (20 g<sub>sv</sub>·dm<sup>-3</sup>·d<sup>-1</sup>) e FC con carico organico variabile determinato dal controllore fuzzy, in base ai valori delle variabili di processo rilevate dai sensori. I dati di produzione sono stati ottenuti misurando il volume di biogas prodotto da ciascun reattore e considerando la composizione determinata mediante gas-cromatografia.

I valori ottenuti sono stati normalizzati per unità di volume di brodo di fermentazione, esprimendo la produzione specifica dei gas energetici (dm<sup>3</sup>H<sub>2</sub>·d<sup>-1</sup>·dm<sup>-3</sup>reatt) e (dm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>·d<sup>-1</sup>·dm<sup>-3</sup>reatt) rispettivamente.

## 2.3 Esperimento 2: instabilità di processo

Terminato l'esperimento di produzione, entrambi gli impianti sono stati riportati in condizioni iniziali grazie a una fase di riadattamento (20 d) in cui entrambi hanno ricevuto la stessa alimentazione con carico moderato. Di seguito, in entrambi gli impianti è stata indotta una fase di instabilità di processo, ottenuta mediante sovralimentazione con un carico organico costante pari a 80 g<sub>sv</sub>·dm<sup>-3</sup>·d<sup>-1</sup>, applicato per un periodo pari a 3 d.

Terminato l'impulso di sovraccarico, i due impianti paralleli sono stati nuovamente alimentati come da disegno sperimentale: CC a carico organico costante ( $20 \text{ g}_{\text{sv}} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ) e FC con carico organico variabile determinato dal controllore fuzzy. L'evoluzione del processo nei due impianti è stata seguita per circa 20 d successivi, rilevando le produzioni specifiche di energia.

### 3. Risultati

I due impianti hanno operato per l'intera durata dello studio (oltre 100 d), permettendo la comparazione sperimentale tra il sistema FC e il riferimento CC.

Nell'esperimento 1 di produzione energetica (Tab.1), l'impianto CC ha prodotto con regolarità significative quantità di gas energetici, stabilizzandosi intorno a  $0.4 \text{ dm}^3_{\text{H}_2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{dm}^{-3}_{\text{reatt}}$  nel primo stadio e  $0.5 \text{ dm}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{dm}^{-3}_{\text{reatt}}$  nel secondo. La produzione dell'impianto FC, invece, è stata meno costante, dato che il sistema di controllo ha modificato automaticamente il carico organico fra 15 e  $45 \text{ g}_{\text{sv}} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , ricercando le condizioni di massima produzione. Negli ultimi 15 d dell'esperimento 1, le produzioni di FC sono risultate superiori di oltre il 50% rispetto CC in entrambi gli stadi.

Nell'esperimento 2, a seguito dell'impulso di sovralimentazione (Tab.1) l'impianto CC ha avuto un breve periodo di elevata produzione (oltre  $2 \text{ dm}^3_{\text{H}_2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{dm}^{-3}_{\text{reatt}}$  nel primo stadio e quasi  $1 \text{ dm}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{dm}^{-3}_{\text{reatt}}$  nel secondo), cui è seguita una forte instabilità con blocco totale della produzione di idrogeno e shift a produzione metanogenica. Nell'impianto FC, dopo l'impulso di produzione a livelli analoghi di CC, la risposta dinamica da parte del controllo fuzzy, che ha ridotto fino quasi ad annullare il carico organico dell'alimentazione, entrambi gli stadi hanno gradualmente recuperato dalle instabilità raggiungendo, dopo 15 d, livelli di produzione nell'ordine di quelli ottenuti nell'esperimento 1.

Tabella 1 – Comparazione delle produzioni specifiche di idrogeno e metano ottenuta nei due impianti sperimentali

Impianto	Esperimento 1 (produzioni negli ultimi 15 d)		Esperimento 2 (produzioni negli ultimi 10 d)	
	CC (alimentazione a carico costante)	Stadio H <sub>2</sub>	$0.39 \pm 0.04 \text{ dm}^3_{\text{H}_2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{dm}^{-3}_{\text{reatt}}$	Stadio H <sub>2</sub>
	Stadio CH <sub>4</sub>	$0.53 \pm 0.06 \text{ dm}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{dm}^{-3}_{\text{reatt}}$	Stadio CH <sub>4</sub>	$0.50 \pm 0.16 \text{ dm}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{dm}^{-3}_{\text{reatt}}$
FC (alimentazione a controllo fuzzy)	Stadio H <sub>2</sub>	$0.86 \pm 0.09 \text{ dm}^3_{\text{H}_2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{dm}^{-3}_{\text{reatt}}$	Stadio H <sub>2</sub>	$0.66 \pm 0.08 \text{ dm}^3_{\text{H}_2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{dm}^{-3}_{\text{reatt}}$
	Stadio CH <sub>4</sub>	$0.61 \pm 0.06 \text{ dm}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{dm}^{-3}_{\text{reatt}}$	Stadio CH <sub>4</sub>	$0.44 \pm 0.12 \text{ dm}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{dm}^{-3}_{\text{reatt}}$

Nelle condizioni sperimentate, il sistema di controllo a logica fuzzy basato su input ricavati da variabili di processo semplici da misurare, grazie alla sua capacità di adattare dinamicamente il carico organico in funzione dello stato di processo, ha dimostrato la capacità di produrre significativamente più energia rispetto a quanto ottenuto con un'alimentazione costante a valori di carico moderatamente normale. Allo stesso modo, il sistema fuzzy ha permesso di recuperare le instabilità di processo determinate da un impulso prolungato di sovralimentazione che, invece, ha causato un blocco definitivo nel primo stadio idrogenico alimentato a carico costante.

#### 4. Discussione conclusiva

Al di là dei risultati scientifici ottenuti nel lavoro, i cui dettagli qui interessano relativamente al tema del Convegno, è significativo evidenziare innanzitutto il carattere interdisciplinare della ricerca in oggetto, sottolineando ancora che questo aspetto non è costituito affatto un elemento di novità. Infatti, circoscrivendo il discorso al solo tema degli impieghi energetici degli effluenti zootecnici -ma si potrebbe estendere facilmente a diverse attuali linee di attività- è interessante notare che tali ricerche "nacquero interdisciplinari", come multidisciplinare è l'impronta del lavoro dell'Ingegnere Agrario e come amplissimi sono gli interessi di ricerca e gli ambiti di applicazione della nostra disciplina.

Evidentemente, la Meccanica Agraria ha fra le sue competenze fondative e irrinunciabili lo studio delle macchine e degli impianti -si potrebbe dire delle tecnologie- impiegate nei processi agricoli. Ma è tuttavia nell'origine multidisciplinare della disciplina, così palesemente rappresentata nelle organizzazioni delle vecchie Facoltà di Agraria, che si rinviene la qualità peculiare del Meccanico Agrario.

Al di là di personali competenze specialistiche da parte dei singoli ricercatori su specifici aspetti, preziose in sé ma non esclusive della disciplina, è nella capacità di visione del dominio d'insieme che emergono le auspicabili qualità del Meccanico Agrario, o meglio, dell'Ingegnere Agrario. È la capacità di affrontare problemi pratici e attuali, riscontrati dagli operatori (agricoltori, contoterzisti, costruttori di macchine e impianti ecc.), proponendo soluzioni tecnologiche e organizzative applicabili nel breve-medio termine, adatte alle caratteristiche della coltura/prodotto e dell'ambiente in cui devono operare, economicamente sostenibili, e adeguate a integrarsi nel dominio d'insieme (filiera, processo, sistema).

Queste qualità culturali si coltivano principalmente nell'ampiezza degli interessi di ricerca, nel carattere applicativo e sperimentale del lavoro, nella curiosità verso gli stimoli di innovazione provenienti da altri settori.