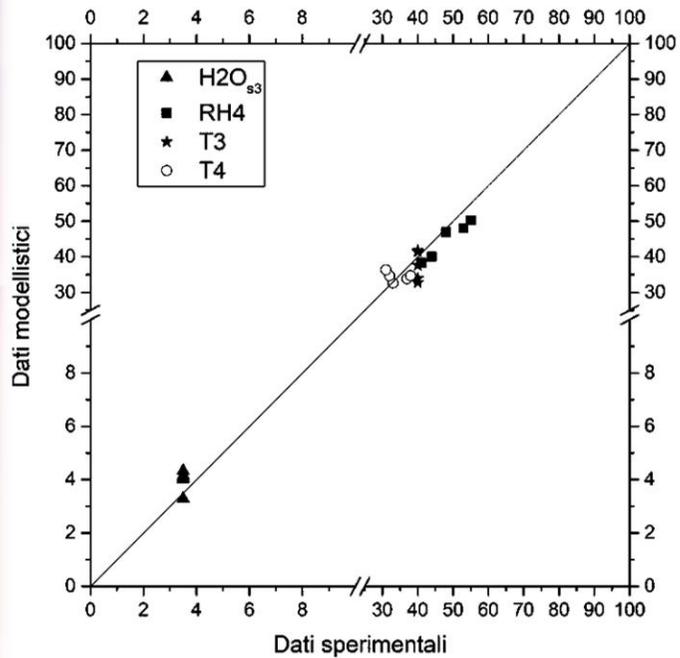


# Modellazione di un processo industriale di essiccamento di solidi granulari



Laura De Stefano



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO

**Dipartimento di Ingegneria Industriale**  
Corso di Laurea in Ingegneria Chimica

# **Modellazione di un processo industriale di essiccamento di solidi granulari**

Tesi in  
**Principi di Ingegneria Chimica**

Relatori:

Prof. Ing. Gaetano Lamberti

Ing. Diego Caccavo

Candidata:

Laura De Stefano

matricola 0612201736

**Anno Accademico 2017/2018**



*Alla mia famiglia*

Questo testo è stato stampato in proprio, in Times New Roman

La data prevista per la discussione della tesi è il 29/03

Fisciano, 18-03

# Sommario

<b>Sommario .....</b>	<b>I</b>
<b>Indice delle figure .....</b>	<b>III</b>
<b>Indice delle tabelle .....</b>	<b>VII</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>IX</b>
<b>Introduzione.....</b>	<b>1</b>
1.1 Essiccamento_____	2
1.1.1 Definizioni di umidità	2
1.1.2 Fasi fondamentali del processo	3
1.1.3 Curve di essiccamento	4
1.1.4 Fenomeni caratteristici del processo	6
1.2 Tipologie di essiccatori _____	7
1.2.1 Classificazione per modalità di trasferimento del calore	7
1.2.2 Classificazione in base al verso delle correnti [5]	8
1.2.3 Classificazione in base alla dispersione dei solidi	9
1.2.4 Classificazione in base alla continuità del processo	11
1.3 Modellazione del processo di essiccamento _____	13
1.3.1 Modello Input-Output [5]	13
1.3.2 Modello per un essiccatore in plug-flow	16
1.4 Obiettivi _____	19
<b>Modellazione .....</b>	<b>21</b>

---

2.1	Impianto di essiccamento _____	22
2.2	Bruciatore _____	24
2.2.1	Modello Input-Output per il Bruciatore	25
2.2.2	Stima della portata d'aria di progetto	28
2.3	Essiccatore _____	33
2.3.1	Modello Input-Output per l'essiccatore	35
2.3.2	Parametri del processo	37
2.4	Implementazione del modello _____	48
2.4.1	Bruciatore	49
2.4.2	Essiccatore	53
2.5	Ottimizzazione _____	55
2.5.1	Implementazione del codice di ottimizzazione	56
<b>Risultati e discussione .....</b>		<b>63</b>
3.1	Studio parametrico sull'essiccatore _____	64
3.2	Effetto del parametro $m$ _____	64
3.3	Effetto del parametro $A$ _____	66
3.4	Effetto del parametro $B$ _____	68
3.5	Effetto del parametro $q$ _____	70
3.6	Risultati dell'ottimizzazione a singolo set _____	73
3.7	Generalizzazione dei parametri _____	75
<b>Conclusioni .....</b>		<b>83</b>
4.1	Conclusioni _____	84
<b>Bibliografia .....</b>		<b>87</b>

---

## Indice delle figure

Figura 1. Schematizzazione della perdita di umidità da una matrice solida [1].	2
Figura 2. Diagramma Temperatura vs tempo. Sono evidenziate le tre fasi principali del processo [3].	4
Figura 3. Tre tipi di una curva di essiccamento [4].	5
Figura 4. Regimi del letto di particelle per essiccatori a letto fluido. Nel primo diagramma è rappresentato l'andamento delle perdite di carico vs velocità del gas. Nel secondo le zone di bolla (o di vuoto) vs la velocità del gas. Il valore $umf$ rappresenta la velocità di minima fluidizzazione [5].	10
Figura 5. Tipologie di essiccatori convenzionali, classificati per tipi di materiale in alimentazione [5].	11
Figura 6. Essiccatore a letto fluido di tipo batch [5].	12
Figura 7. Essiccatore a letto fluido perfettamente miscelato [5].	12
Figura 8. Essiccatore a letto fluido con flusso a pistone: (a) lato esterno, (b) lato interno [5].	13
Figura 9. Schema di un essiccatore equicorrente.	14
Figura 10. Elemento infinitesimo di un essiccatore cross-flow [4].	17
Figura 11. Schematizzazione dell'intero processo in esame.	23
Figura 12. Schematizzazione del bruciatore.	24
Figura 13. Etichetta del ventilatore utilizzato contenete alcuni dati di progetto.	29
Figura 14. Curva caratteristica per il ventilatore tipo FQ901N1A [8].	31
Figura 15. Schema dell'essiccatore cross flow.	33
Figura 16. Dimensioni effettive dell'essiccatore: lunghezza (L) pari a 9.2 m, altezza (h) pari a 2.7 m, larghezza (l) pari a 0.96 m. Successivamente, per l'altezza dell'essiccatore (che è leggermente sopraelevato rispetto al suolo), si considera un'altezza pari a 1.7 m [9].	38
Figura 17. Schematizzazione tridimensionale dell'essiccatore.	44
Figura 18. Implementazione di un set di dati sperimentali relativi al giorno 08-03-2018.	48

Figura 19. Implementazione dei parametri. ....	48
Figura 20. Implementazione dei dati fisici. ....	49
Figura 21. Implementazione del calcolo della portata d'aria di progetto. ....	49
Figura 22. Implementazione del calcolo per ottenere la pressione di saturazione e la densità dell'aria.....	50
Figura 23. Implementazione del calcolo della portata massica e dell'umidità assoluta dell'aria.....	50
Figura 24. Implementazione del calcolo della portata massica d'acqua nella corrente d'aria in ingresso al bruciatore. ....	50
Figura 25. Calcolo delle portate molari note, coinvolte nel caso del bruciatore. ....	50
Figura 26. Implementazione del calcolo del $C_{pmH}$ della corrente 5.....	51
Figura 27. Implementazione del calcolo del $(C_{pmH})$ della corrente 2.....	51
Figura 28. Implementazione del calcolo del metano e del bilancio di energia sul bruciatore. ....	51
Figura 29. Implementazione dei bilanci di massa sul bruciatore. ....	52
Figura 30. Implementazione del calcolo dell'umidità in uscita dal bruciatore, RH2.....	52
Figura 31. Esportazione excel dei dati ottenuti sul bruciatore.....	52
Figura 32. Implementazione del calcolo delle umidità assolute in ingresso all'essiccatore. ....	53
Figura 33. Implementazione del calcolo delle temperature e delle umidità in uscita dall'essiccatore.....	53
Figura 34. Implementazione del calcolo delle forze spingenti medio logaritmiche.....	54
Figura 35. Implementazione dei 4 bilanci legati alla conservazione e al trasporto della massa e dell'energia per l'essiccatore. ....	54
Figura 36. Implementazione del calcolo dell'umidità dei solidi e dei gas in uscita dall'essiccatore. ....	54
Figura 37. Esportazione excel dei dati ottenuti sull'essiccatore.....	54
Figura 38. Inizializzazione della funzione "essiccatore" e del vettore "v" contenente i parametri. I parametri vengono normalizzati mediante i valori iniziali contenuti in "ub". I vettori hanno lo stesso numero di elementi (4).....	56
Figura 39. Implementazione dei vettori "v0", "lb", "ub" in uno Script "run.m". I vettori hanno lo stesso numero di elementi e contengono rispettivamente: i punti iniziali (stimati dall'utente), i limiti inferiori (lower bounds) e superiori (upper bounds), di ciascun parametro. In seguito, vengono anch'essi normalizzati e sono "v0_norm", "lb_norm", "ub_norm".....	56
Figura 40. Implementazione della funzione SSE.....	57

Figura 41. Implementazione dei dati sperimentali tramite vettori. Sono riportati 8 set di dati sperimentali, tuttavia per l'ottimizzazione sono stati utilizzati 6 set. ....	58
Figura 42. Implementazione delle funzioni esponenziali che descrivono la "sseadd" e la "sseaddH2O". .....	58
Figura 43. Andamento delle funzioni esponenziali (f1 e f2) utilizzate per descrivere la "sseadd". .....	59
Figura 44. Andamento della funzione esponenziale (f3) utilizzata per descrivere la "sseaddH2O". .....	60
Figura 45. Implementazione del comando fmincon. Viene costruita una matrice "x_tot" composta da 6 righe, una per ogni set e 4 colonne, una per ogni parametro del processo. La funzione viene minimizzata per i=1:6 e per ogni singolo set di dati sperimentali, si ottengono 4 parametri ottimizzati. ....	60
Figura 46. Creazione di vettori a 6 elementi che conterranno i risultati. Per ogni ciclo di calcolo, la funzione "essiccatore" prende in input i parametri (matrice "x_tot") ricavati in seguito alla minimizzazione della sse, e i dati noti di ciascun set (m1s,RH5,f,T2,ub etc) e restituisce in output le variabili incognite calcolate dal modello, che andranno inserite nei vettori. ....	61
Figura 47. Diagramma m vs $\Delta Y_{ml}$ . .....	64
Figura 48. Effetto della variazione del coefficiente m sulla temperatura e sull'umidità dei solidi in uscita nella corrente 3. Al coefficiente m vengono assegnati tre valori ( <b>0.12, 0.2, 0.3</b> ), mentre gli altri parametri rimangono fissati <b>A = 5 · 104, B = 104, q = 3 · 103</b> . .....	65
Figura 49. Effetto della variazione del coefficiente m sull'umidità e sulla temperatura dei gas in uscita nella corrente 4. Al coefficiente m vengono assegnati tre valori ( <b>0.12, 0.2, 0.3</b> ), mentre gli altri parametri rimangono fissati <b>A = 5 · 104, B = 104, q = 3 · 103</b> . .....	66
Figura 50. Effetto della variazione del parametro A sulla temperatura e sull'umidità di uscita dei solidi nella corrente 3. Al parametro A vengono assegnati tre valori <b>104, 5 · 104, 105</b> , mentre gli altri parametri rimangono fissati <b>m = 0.3, B = 104, q = 3 · 103</b> . .....	67
Figura 51. Effetto della variazione del parametro A sulla temperatura e sull'umidità di uscita dei gas nella corrente 4. Al parametro A vengono assegnati tre valori <b>104, 5 · 104, 105</b> , mentre gli altri parametri rimangono fissati <b>m = 0.3, B = 104, q = 3 · 103</b> . .....	68
Figura 52. Effetto della variazione del parametro B sulla temperatura e sull'umidità di uscita dei solidi nella corrente 3. Al parametro B vengono assegnati tre valori <b>7 · 103, 104, 2 · 104</b> , mentre gli altri parametri rimangono fissati <b>m = 0.3, A = 5 · 104, q = 3 · 103</b> . .....	69
Figura 53. Effetto della variazione del parametro B sulla temperatura e sull'umidità di uscita dei gas nella corrente 4. Al parametro B vengono assegnati tre valori <b>7 · 103, 104, 2 · 104</b> , mentre gli altri parametri rimangono fissati <b>m = 0.3, A = 5 · 104, q = 3 · 103</b> . .....	70

---

Figura 54. Effetto della variazione di $q$ sulla temperatura e sull'umidità di uscita dei solidi nella corrente 3. Al parametro $q$ vengono assegnati tre valori <b>103, 3 · 103, 5 · 103</b> , mentre gli altri parametri rimangono fissati <b><math>m = 0.3</math>, <math>A = 5 · 104</math>, <math>B = 104</math></b> . .....	71
Figura 55. Effetto della variazione di $q$ sulla temperatura e sull'umidità di uscita dei gas nella corrente 4. Al parametro $q$ vengono assegnati tre valori ( <b>103, 3 · 103, 5 · 103</b> ), mentre gli altri parametri rimangono fissati ( <b><math>m = 0.3</math>, <math>A = 5 · 104</math>, <math>B = 104</math></b> ).....	72
Figura 56. Parity plot delle temperature e delle umidità di uscita, ottenute con i parametri ottimizzati per ogni singolo set.....	73
Figura 57. Parity plot del consumo di metano. ....	74
Figura 58. Variazione di $m$ per effetto di $T_2$ e $V_{5\_air}$ .....	76
Figura 59. Variazione di $A$ per effetto di $T_2$ e $V_{5\_air}$ . ....	77
Figura 60. Variazione del parametro $B$ per effetto di $T_2$ e $V_{5\_air}$ .....	78
Figura 61. Variazione del parametro $q$ per effetto di $T_2$ e $V_{5\_air}$ .....	79
Figura 62. Parity plot dei dati ottenuti implementando le equazioni dei piani 3D descrittive dei quattro parametri. ....	80
Figura 63. Parity plot predittivo.....	81

---

## Indice delle tabelle

Tabella 1. Tabella stechiometrica riferita ad una generica reazione del tipo (2.3) ...	26
Tabella 2. Parametri caratteristici del ventilatore .....	29
Tabella 3. Parametri noti del ventilatore forniti dall'azienda. La frequenza di lavoro e la pressione $p_p$ di lavoro sono dati variabili a seconda della produzione analizzata .....	30
Tabella 4. Leggi di affinità per le soffianti [11]. .....	30
Tabella 5. Proprietà dell'aria calcolate a T di film e numeri adimensionali.....	40
Tabella 6. Stima del valore del parametro A. ....	41
Tabella 7. Stima del valore del parametro B. ....	42
Tabella 8. Dimensioni caratteristiche delle pareti orizzontali e verticali per il calcolo del coefficiente di scambio. ....	45
Tabella 9. Parametri per la stima del coefficiente di scambio per le pareti orizzontali (superiore e inferiore) .....	46
Tabella 10. Parametri per la stima del coefficiente di scambio per le pareti verticali.....	47
Tabella 11. Stime degli ordini di grandezza dei parametri di processo. ....	47
Tabella 12. Valori dei parametri ottenuti dall'ottimizzazione per i singoli set di dati sperimentali. ....	74

---



# Abstract

The aim of this thesis is the development of a descriptive model of the industrial drying process of granular solids, a unit operation that is a fundamental step in wet granulation. In particular, the studied dryer is a cross-flow, in which a stream of hot gases hits the bed of solids perpendicularly, exchanging heat by convection. A macroscopic Input-Output approach was chosen, thus reconciling the use of a simplified modeling structure with the description of the main physical phenomena, in order to develop algorithms that are easy to execute and, at the same time, useful for plant management. The model consists of two basic parts: the burner, dedicated to the production of hot gases; the actual dryer, in which the wet solids are dried. In the first part, the burner was modeled using material and energy balances, and it allowed to estimate the flow rate of air sent to the dryer, based on experimental methane consumption; in fact, this data was not known by the company, which could vary it, but was not aware of its absolute value. In the second part of the model, concerning the dryer, once again through material and energy balances, it was possible to describe the output currents once the input ones were known. For this purpose, the modeling parameters, such as material and energy transport coefficients (in which geometrical parameters are also incorporated), equilibrium relationship and heat losses, have been optimized by comparing them with experimental data. The heat losses are caused by the non-adiabatic nature of the dryer, but they had never been considered by the company; despite they represented a fundamental term. The values of these parameters were not constant for each production set analyzed, and therefore their variation was related to the physical variables entering the dryer: temperature and gas flow rate, described by a 3D fitting plane. The use of these generalized parameters has still allowed a good description of the process, thanks to the comparison of the model

results with the experimental data. Moreover, through the comparison with new experimental data sets, the model showed a good predictive characteristic.

---

# Bibliografia

1. Foust, A. *et al.*, *I principi delle operazioni unitarie*, Casa editrice Ambrosiana, Milano, (Italy), (1992).
2. Perry's chemical engineers' handbook 8th edition, MacGraw-Hill.
3. Traub, D. A., The drying curve, *Process heating magazine* (2002).
4. Cairo, N., *et al.*, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Santiago de Compostela (Spain), 28th to 30th March, (2012).
5. Mujumdar, A. S., *Handbook of industrial drying*. CRC press (2006).
6. Mujumdar, A. S., Sakamon, D., *Fundamental principles of drying, Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying: Principles, Equipment and New Developments*, Exergex, Brossard (Canada) (2000).
7. Mujumdar, A. S., Huang, L. X., Global R&D Needs in Drying, in international journal of *Drying Technology* **25**, 4, 647-658, Taylor & Francis (2007)
8. <http://www.ferrariventilatori.eu> (consultato il 24/02/2019)
9. <http://www.lb-technology.it/wp-content/uploads/2015/03/EVF-1.pdf> (consultato il 28/02/2019)
10. <https://www.ilmeteo.it/portale/archivio-meteo> (consultato il 10/03/2019)
11. [https://www.engineeringtoolbox.com/affinity-laws-d\\_408.html](https://www.engineeringtoolbox.com/affinity-laws-d_408.html) (consultato il 10/03/2019)
12. Smith, J. M., H. Van Ness, and M. M. Abbott. *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, McGraw-Hill, NY, (2005) .



*Desidero ringraziare il prof. Gaetano Lamberti per avermi accolto nel suo gruppo di ricerca, permettendomi di svolgere questo percorso finale, uno step significativo per la mia formazione accademica e non solo. A tal proposito, vorrei ringraziare l'ing. Diego Caccavo per la sua infinita pazienza, per gli insegnamenti trasmessi, per la grande disponibilità, e per il supporto nei momenti difficili, durante questi mesi di apprendimento; un grazie non sarà mai abbastanza. Ringrazio anche Sara e Giovanni per aver rallegrato le ore spese in laboratorio, per tutte le interessanti scoperte condivise durante le pause ricreative, e soprattutto per aver saputo apprezzare ogni giorno le nostre strane pietanze a base di bulgur e curcuma!*

*Prima di tutti, vorrei dire grazie alla mia famiglia. A Serena, con cui ho condiviso questo percorso più di ogni altro, perché è stata e sarà la mia certezza in ogni scelta di vita. Ringrazio i miei genitori, a cui devo tutto, per aver sempre creduto in me e per avermi insegnato a guardare oltre qualsiasi confine, ma soprattutto grazie per la fiducia e per avermi spronata ad intraprendere questo percorso. Grazie ai miei fratelli, Dario e Salvatore, perché sono la mia forza, e capaci di dimostrarmi che si può lottare con determinazione per riuscire a superare anche le barriere invisibili: siete il mio esempio di vita. A mia sorella Alessandra, per avermi supportato, sopportato e incoraggiato a migliorarmi: grazie per essere stata sempre il mio punto di riferimento prezioso in ogni occasione e per avermi capita anche solo guardandomi. A mia nonna Lucia e mio nonno Carmine, per il loro amore infinito e per il loro entusiasmo: grazie per aver sempre celebrato con me ogni esame superato. Ai miei zii, Nunzio e Marcello, per essere stati presenti e premurosi, e per i consigli e gli insegnamenti dispensati. Vorrei ringraziare anche Mike, ormai membro acquisito, per tutti i momenti e le avventure vissute in sua compagnia. Ringrazio mio cugino Roberto, per aver sempre saputo cosa "dirmi" nei mille momenti no, a volte le parole non servono nemmeno.*

*Vorrei inoltre ringraziare le persone che sono state capaci di rendere in qualche modo, questi anni migliori. Ringrazio Paola, amica d'infanzia e di vita, per aver letteralmente preso parte a questo mio percorso dal principio, per avermi spronata a proseguire, ascoltata e supportata, anche a "distanza", e per aver condiviso con me i migliori discorsi filosofici. Ringrazio Dada, per essere stata la mia spalla nei momenti peggiori e non, un punto di riferimento fisso e una migliore amica unica, su cui poter contare sempre: se volessi*

---

*ringraziarti di ogni cosa, potrei scrivere un'altra tesi. Ringrazio Fabiana, per tutti i nostri momenti trascorsi, per la sua complicità, ma soprattutto per aver avuto fiducia in me, e per aver sempre tentato di trasmettermi la sua positività, per me ormai indispensabile.*

*Grazie a tutti i mitici ragazzi del gruppo IUPAC (che non nomino singolarmente per questioni logistiche). Grazie per aver reso questi anni così intensi, folli e "legendari", e soprattutto l'università un posto straordinariamente piacevole, dove tra infinite avventure-sventure ho potuto conoscere e vivere persone, che mi auguro continuino a far parte della mia vita fino alla fine dei tempi. Devo però ringraziare, in particolare, Simone, Anna, Antonella, Lois, Vincenzo, Roberta e Tonio, con cui ho condiviso esami, gioie, ansie, venerdì e sabato sera (e con alcuni anche tutti gli altri giorni della settimana o tutte le ore della giornata), soprattutto perché, sin dal primo momento, ho costruito con ognuno di loro un rapporto sincero, diverso e in qualche modo speciale, che vorrei rimanesse tale, in ricordo di questo percorso, in cui tutti voi siete stati fondamentali. Grazie davvero.*