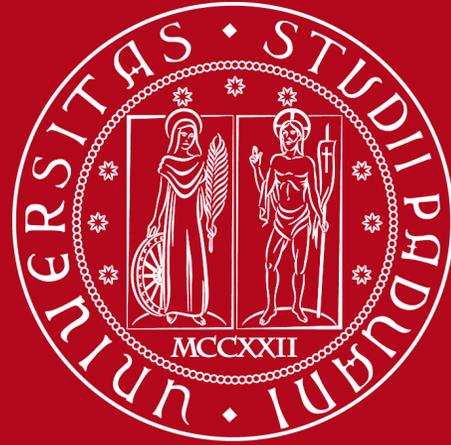


Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria Chimica e dei Materiali



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

## Relazione per la prova finale

***«Abbattimento di gas inquinanti su piccola scala:  
un caso studio»***

Tutor Universitario: Ing. Paolo Mocellin  
Co-Tutor: Ing. Silvia Pelucchi

Laureando: Giancarlo Muzzin  
Matricola n. 1226521



# 1.1 CASO STUDIO

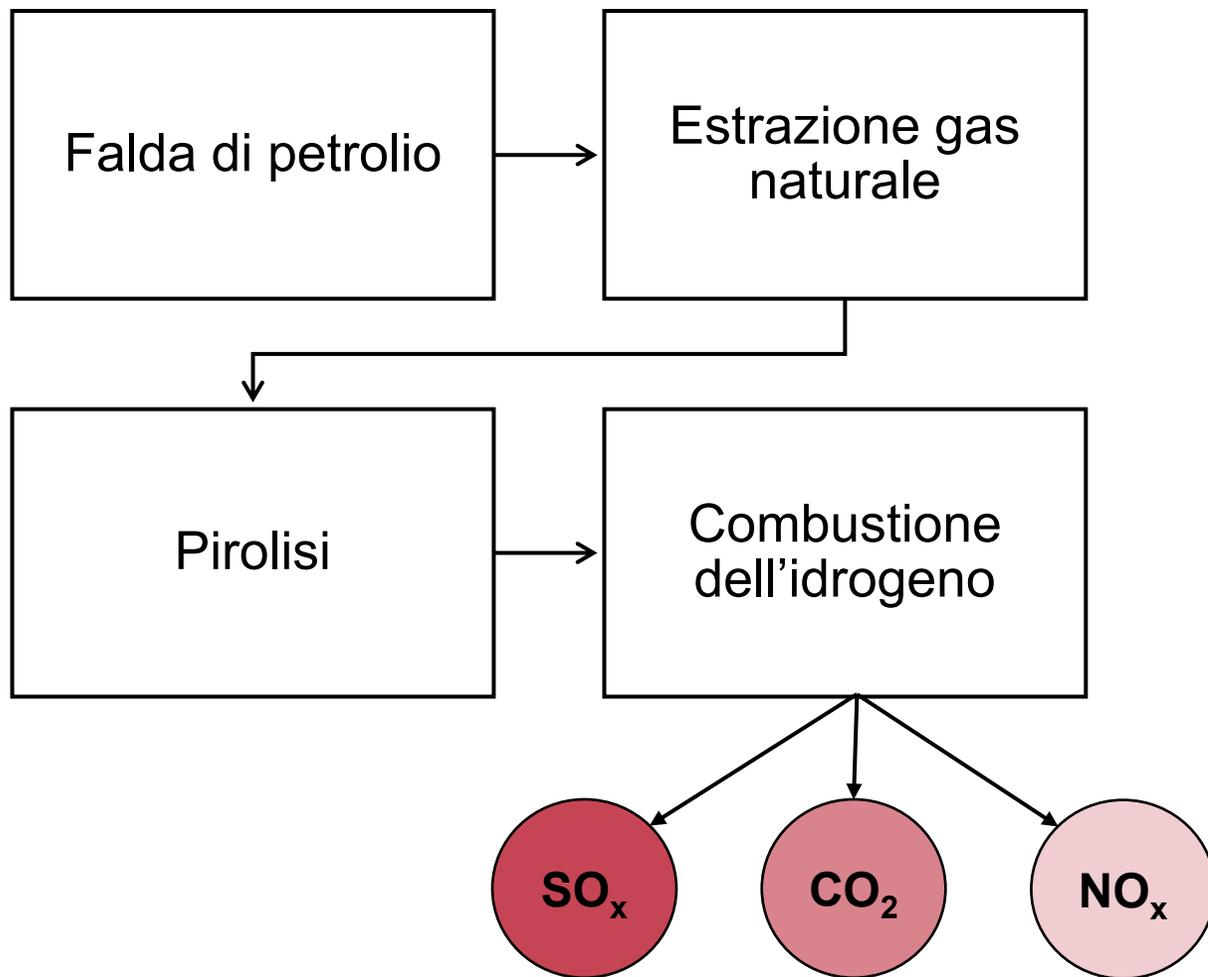


Tabella 1. Portate molari dei composti generati dall'impianto di combustione in Canada.

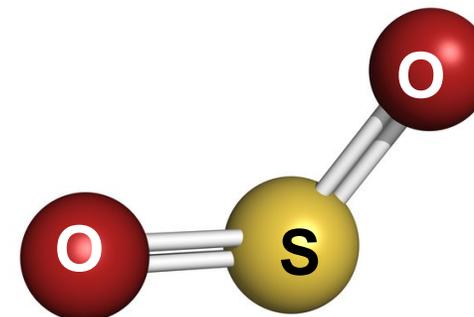
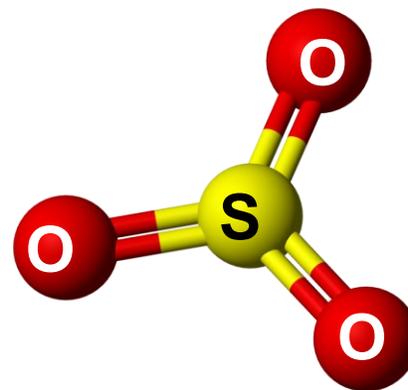
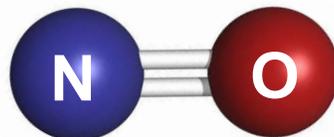
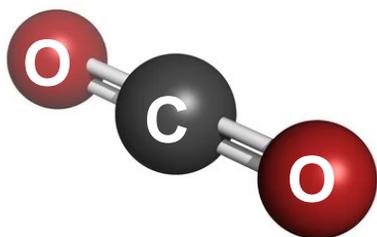
Composto	Portata molare (Kmol/h)
N <sub>2</sub>	210
H <sub>2</sub> O	66.2
O <sub>2</sub>	47.9
CO <sub>2</sub>	3.61
SO <sub>2</sub>	0.980
NO	0.456
SO <sub>3</sub>	9.71 10 <sup>-3</sup>
H <sub>2</sub>	8.34 10 <sup>-4</sup>
CO	1.30 10 <sup>-4</sup>

### CO<sub>2</sub>

- Non tossico o nocivo;
- Principale gas ad effetto serra.



Riscaldamento globale.



### SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub>

- Tossico se inalato;
- Provoca irritazioni cutanee e lesioni oculari;
- Nocivo per l'ambiente.



Principali responsabili delle piogge acide:

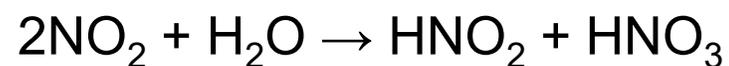




Tabella 2. Principali tecniche di abbattimento per ciascuna specie inquinante.

$\text{CO}_2$	$\text{SO}_x$	$\text{NO}_x$
Assorbimento	Desolforazione a umido (WFGD)	Riduzione catalitica selettiva (SCR)
Adsorbimento	Desolforazione a secco (DFGD)	Riduzione selettiva non catalitica (SNCR)
Separazione con membrane	Iniezione di sorbente a secco (DSI)	Riduzione plasma assistita
<i>Calcium looping</i>		



## 2.1 TECNICHE DI ABBATTIMENTO DEGLI NO<sub>x</sub>

Tabella 3. Principali tecniche di abbattimento degli NO<sub>x</sub>.

	T (°C)	P (atm)	Efficienza <sup>1</sup>	Tipo di processo	Utilities	Apparecchiature Principali
<b>Riduzione catalitica selettiva (SCR)</b>	300-500	1	70-90%	Secco o Umido	<ul style="list-style-type: none"><li>• Agente riducente</li><li>• Catalizzatore</li></ul>	Reattore a letto fisso
<b>Riduzione non catalitica selettiva (SNCR)</b>	800-1000	1	50-80%	Umido	<ul style="list-style-type: none"><li>• Agente riducente</li></ul>	Reattore a ciclone
<b>Riduzione plasma assistita</b>	150-380	1	80-90%	Secco o Umido	<ul style="list-style-type: none"><li>• Agente riducente</li><li>• Catalizzatore</li><li>• Plasma</li></ul>	Reattore con sistema al plasma

(W. B. Zhang et al., 2021; Lee et al., 2021; Mladenović et al., 2018; Chen et al., 2016; Svith et al., 2022; Asghar et al., 2021; Z. S. Zhang et al., 2015; Oskooei et al., 2019).

## 2.1 TECNICHE DI ABBATTIMENTO DEGLI NO<sub>x</sub>

### Principali problematiche

#### SCR (selective catalytic reduction)

- Costo capitale
- Formazione NO
- *Ammonia slip*

#### SNCR (selective non catalytic reduction)

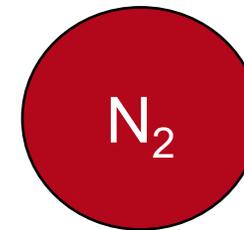
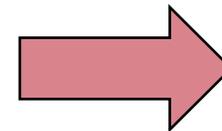
- Efficienza moderata
- Degradazione agente riducente
- *Ammonia slip*

#### Riduzione plasma assistita

- Generazione plasma
- Costo capitale

### Agenti riducenti più utilizzati:

- **Ammoniaca:**  $4\text{NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
- **Idrocarburi:**  $\text{NO} + \text{HC} + 4\text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
- **Urea:**  $2\text{NO} + \text{H}_2\text{NCONH}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow 2\text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$





## 2.2 TECNICHE DI ABBATTIMENTO DEGLI SO<sub>x</sub>

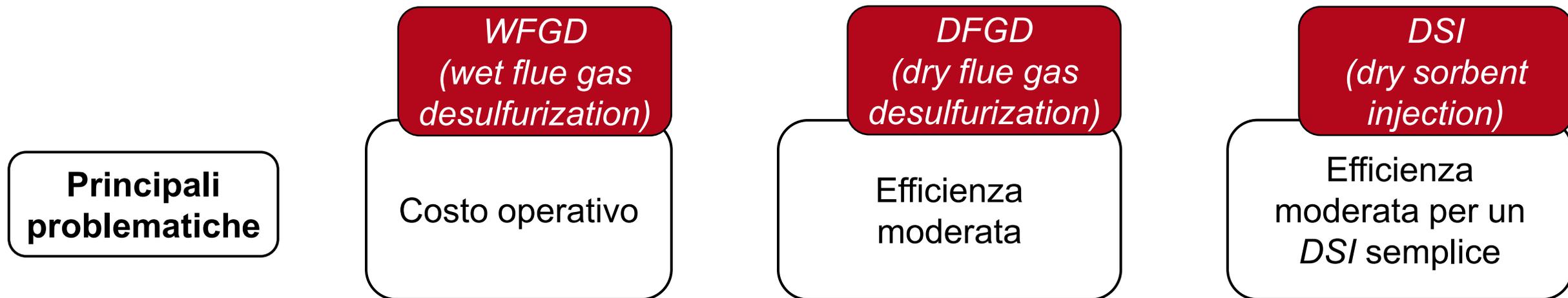
Tabella 4. Principali tecniche di abbattimento degli SO<sub>x</sub>.

	T (°C)	P (atm)	Efficienza	Tipo di processo	Utilities	Apparecchiature principali
<b>Desolforazione a umido (WFGD)</b>	50-150	1	≈ 90%	Umido	Solvente alcalino	<ul style="list-style-type: none"><li>• Torre di assorbimento spray / a piatti</li><li>• (torre di rigenerazione)</li></ul>
<b>Desolforazione a secco (DFGD)</b>	600-900	1	50-70%	Semi-secco	Solvente alcalino	<ul style="list-style-type: none"><li>• Reattore a essiccazione spray / a letto semi-secco / a letto fluido circolante</li><li>• (torre di rigenerazione)</li></ul>
<b>Iniezione di solvente a secco (DSI)</b>	50-900	1	50-90%	Secco	Solvente alcalino	<ul style="list-style-type: none"><li>• Condotta per desolforazione</li><li>• Elettrofiltro</li></ul>

(Kumar & Jana, 2022; Yang et al., 2021; Zou & Yuan, 2022; Suyadal et al., 2005; Li et al., 2022; Gutiérrez Ortiz & Ollero, 2001).

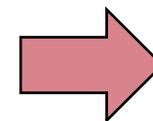


## 2.2 TECNICHE DI ABBATTIMENTO DEGLI SO<sub>x</sub>



### Solventi più utilizzati:

- **Ossido di calcio:**  $\text{SO}_2 + \text{CaO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4$
- **Carbonato di calcio:**  $\text{SO}_2 + \text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
- **Idrossido di Calcio:**  $\text{SO}_2 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$   
 $\text{CaSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$



## 2.3 TECNICHE DI ABBATTIMENTO DELLA CO<sub>2</sub>

Tabella 5. Principali tecniche di abbattimento della CO<sub>2</sub>.

	T (°C)	P (atm)	Efficienza	Tipo di processo	Utilities	Apparecchiature principali
<b>Assorbimento</b>	25-80	1	≈ 90%	Umido	Solvente (amminico)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Torre di assorbimento <i>bubble column</i> / con corpi di riempimento</li> <li>• Torre di desorbimento <i>stripper</i></li> </ul>
<b>Adsorbimento</b>	25-700	1-10	70-80%	Secco	Materiale adsorbente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colonna impaccata per adsorbimento</li> <li>• Torre di rigenerazione</li> </ul>
<b>Separazione con membrane</b>	25-50	3-10 (0.01-0.04)	> 90%	Secco o umido	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Membrana (solvente)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condotto con membrane (torre di rigenerazione)</li> </ul>
<b>Calcium looping (CaL)</b>	550-900	1	70-80%	Secco	Roccia calcarea CaCO <sub>3</sub> /CaO	Reattori a letto fisso / fluido: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Carbonatore</li> <li>• Calcinatore</li> </ul>

(Alhajaj et al., 2016; Mores et al., 2011; Ben-Mansour et al., 2016; Zhan et al., 2021; Fu et al., 2023; Pohlmann et al., 2016; M. Zhang et al., 2022; Abanades & Alvarez, 2003).



## 2.3 TECNICHE DI ABBATTIMENTO DELLA CO<sub>2</sub>

### Assorbimento

- Consumo di energia per rigenerazione solvente
- Degradazione composti amminici

### Separazione con membrane

- Facile degradazione membrane
- Costo capitale

### Principali problematiche

### Adsorbimento

- Efficienza moderata
- Diminuzione efficienza all'aumentare dei cicli di adsorbimento

### *Calcium looping*

- Diminuzione efficienza all'aumentare del numero di cicli di cattura
- Reattività con SO<sub>x</sub>

# 3 CALCIUM LOOPING RIMOZIONE SEQUENZIALE CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>

Tabella 6. Portate molari dei composti inquinanti generati dall'impianto di combustione in Canada.

Composto inquinante	Portata molare (Kmol/h)
CO <sub>2</sub>	3.61
SO <sub>2</sub>	0.980
NO	0.456
SO <sub>3</sub>	9.71 · 10 <sup>-3</sup>

## Considerazioni per la scelta del processo:

- Tecnicamente non complesso;
- Economicamente favorevole;
- Temperature simili al forno di combustione;
- Rimozione CO<sub>2</sub> e SO<sub>x</sub>.

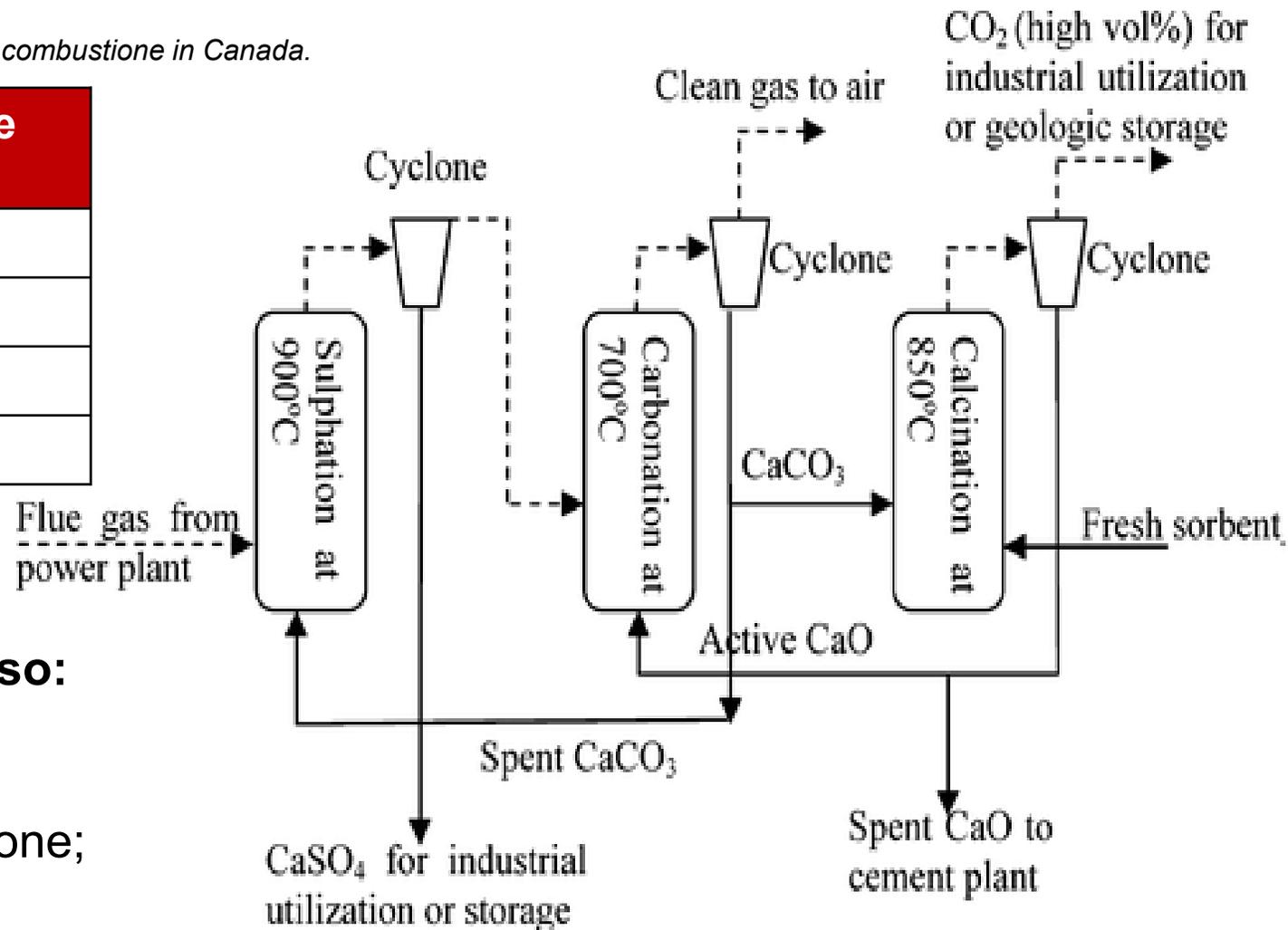


Figura 1. Schema di processo calcium looping per la rimozione sequenziale di CO<sub>2</sub> e SO<sub>x</sub>.

## Reazioni caratteristiche:

- **Carbonatazione:**  $\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \mathbf{Q}$
- **Calcinazione:**  $\text{CaCO}_3 + \mathbf{Q} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- **Desolforazione:**  $\text{CaCO}_3 + \text{SO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 + \text{CO}_2 + \mathbf{Q}$
- **Desolforazione:**  $\text{CaO} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 + \mathbf{Q}$

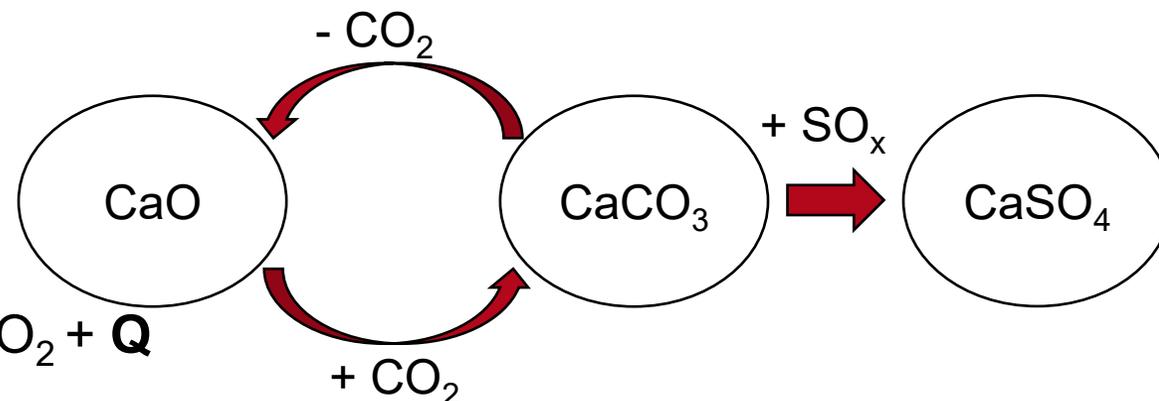


Tabella 7. Efficienze di rimozione di CO<sub>2</sub> e SO<sub>x</sub> in funzione del numero di cicli di cattura della CO<sub>2</sub>.

N° cicli cattura CO <sub>2</sub>	Efficienza CO <sub>2</sub>	Efficienza SO <sub>x</sub>
1	70%	50%
7	40%	40%
40	20%	40%

1% CO<sub>2</sub> nella corrente da trattare

## Adattabilità al caso studio:

No calcinazione:  
CaCO<sub>3</sub> direttamente  
per desolforazione

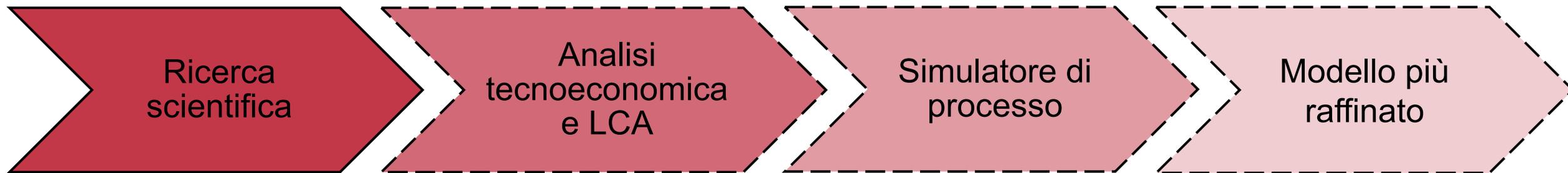
Carbonatazione a  
580-600°C  
(invece che 700°C)

(E. H. Baker. "The calcium oxide-carbon dioxide system in the pressure range 1-300 atmospheres". In: J. Chem. Soc. (0 1962), pp. 464-470)

## 4 CONCLUSIONI E CONSIDERAZIONI FINALI

Tabella 8. parametri principali del processo calcium looping per la rimozione sequenziale di CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>.

	T (°C)	P (atm)	Efficienza	Tipo di processo	Utilities	Apparecchiature principali
<b>Carbonatazione</b>	580-600	1	20-70%	Secco	Roccia calcarea CaO/CaCO <sub>3</sub>	Carbonatore (reattore a letto fluido / fisso)
<b>Calcinazione</b>	850-900	1				Calcinatore (reattore a letto fluido / fisso)
<b>Desolforazione</b>	900	1	40-50%			Desolforatore (reattore a letto fisso)

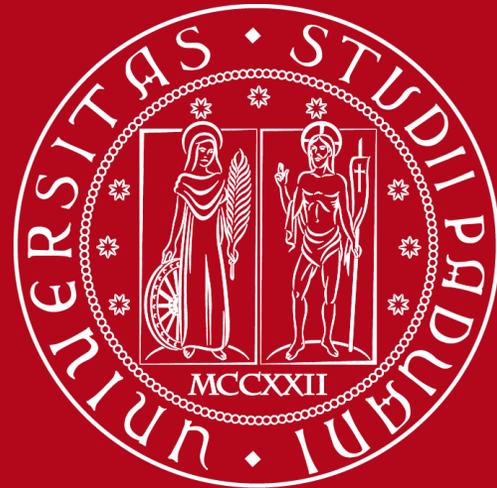


Reattori a letto fluido o fisso?



Processo continuo o semi-batch?

# *Grazie per l'attenzione*



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

Contatti

[giancarlo.muzzin@studenti.unipd.it](mailto:giancarlo.muzzin@studenti.unipd.it)