

STACKCALC

Manuale d'uso del programma



Marco Meloni
www.melonimarco.it

Indice

1. Introduzione	2
1.1. Disclaimer	2
2. Installazione del programma	2
3. Interfaccia principale	3
3.1. Process data.....	3
3.2. Stack and ambient data	4
3.3. Options	5
3.4. Debug window.....	6
3.5. File paths.....	6
3.6. Results	7
4. Importazione dei risultati in Microsoft Excel.....	8
4.1. Importazione del file di testo – primo metodo di importazione.....	8
4.2. Metodo alternativo di importazione	10
4.3. Salvare i risultati in formato nativo per Microsoft Excel	13
4.4. Graficare i risultati	14
5. Calcolo dell'effetto camino – modello utilizzato.....	16
6. Cenni di meteorologia e modelli utilizzati	17
6.1. Condizioni meteorologiche: temperatura	17
6.2. Classi di stabilità di Pasquill	21
6.3. Velocità del vento	21
6.4. Topografia.....	22
6.5. Innalzamento e forma del pennacchio.....	22
6.6. Modello gaussiano di Pasquill-Gifford.....	24
6.6.1. Equazione generale del modello.....	24
6.6.2. Parametri di dispersione	25
6.6.3. Limitazioni	25

1. Introduzione

La presente guida illustra il funzionamento di StackCalc, un piccolo programma che ho scritto nel tempo libero, in grado di calcolare l'effetto camino e successivamente fornire una stima della dispersione di un gas in atmosfera attraverso il modello gaussiano di Pasquill-Gifford.

Attualmente il programma è in grado di calcolare:

- Effetto camino, per tiraggio naturale, noto un diametro di primo tentativo del camino e altezza, con ottimizzazione del diametro minimo e del diametro del tip, se quest'ultimo è specificato;
- Calcolo delle dispersioni termiche del camino;
- Calcolo dell'innalzamento del pennacchio nota la classe di stabilità atmosferica secondo la categorizzazione di Pasquill;
- Calcolo del profilo di concentrazione a terra, nella direzione del vento, dei principali inquinanti, utilizzando un modello a dispersione di tipo gaussiano.

I risultati del programma possono inoltre essere importati in altri programmi, quali per esempio Microsoft Excel, in quanto StackCalc genera un file di testo comprendente il profilo di concentrazione di diversi inquinanti, in un raggio fino a 10 km dal punto di emissione. Il file di testo è preformattato con valori separati da virgola, in modo che sia importabile facilmente in Microsoft Excel o altri programmi che offrono funzionalità di importazione simili. Può inoltre creare direttamente un file in formato xlsx contenente già tutti i calcoli formattati.

Al capitolo 6 è possibile trovare dei cenni di meteorologia, essenziali per comprendere le opzioni e le possibilità del programma e che consiglio di leggere. Contiene inoltre informazioni utili circa i modelli di calcolo utilizzati.

Si sottolinea nuovamente che il programma fornisce solo una stima preliminare e non è destinato a sostituire un'analisi completa con altri tools dedicati.

1.1. Disclaimer

Questo software è fornito "così com'è", senza alcuna garanzia espressa o implicita. L'uso del software è a rischio esclusivo dell'utente. L'autore non si assume alcuna responsabilità per danni diretti, indiretti, incidentali, speciali o consequenziali derivanti dall'uso o dall'impossibilità di utilizzare il software.

È concessa a chiunque l'autorizzazione di usare questo software e i dati da esso generati per qualsiasi scopo, comprese applicazioni commerciali, e di ridistribuirlo, a condizione che l'origine di questo software non venga travisata; non puoi dichiarare di essere l'autore del software.

2. Installazione del programma

Se il programma non è stato scaricato da www.melonimarco.it, consiglio fortemente di scaricarlo, in quanto la versione che si sta utilizzando potrebbe non essere l'ultima.

Il programma richiede per funzionare Windows 7 o superiore, le librerie .NET 8.0 di Microsoft e un processore a 64 bit. Se le librerie non sono già installate nel sistema operativo, durante la fase di setup il programma chiederà automaticamente il permesso di scaricarle dal sito Microsoft.

La risoluzione minima richiesta è 1366 x 768, quella raccomandata è 1920x1080.

3. Interfaccia principale

Una volta avviato il programma, l'interfaccia che si presenta è la seguente:

Figura 1: Interfaccia principale di StackCalc (v.1.0)

L'interfaccia è divisa nelle seguenti sezioni:

- **Process data**, dove è possibile inserire i dati di processo del gas diretto al camino;
- **Stack e ambient data**, che permette di inserire le dimensioni del camino e i dati ambientali;
- **Options**, che consente la modifica di alcune opzioni di calcolo;
- **Debug Window**, che racchiude una finestra di debug in cui il programma inserisce i risultati dei calcoli;
- **File paths**, per specificare il percorso di salvataggio del file CSV contenente il profilo di concentrazione calcolato dal programma;
- **Results**, dove il programma riassume i dati calcolati.

3.1. Process data

La scheda Process data consente l'inserimento delle portate dei componenti del flue gas diretto al camino. Le portate vanno inserite in kg/h, il programma effettua automaticamente le conversioni in kmol/h.

È possibile inoltre inserire le portate di sei inquinanti. Tre di questi (SO₂, NO₂, H₂S) sono presenti già di default. Ulteriori tre possono essere aggiunti, se noto il peso molecolare del composto.

3.2. Stack and ambient data

Nella scheda “Stack data” è possibile inserire attualmente i dati del camino: Diametro interno del camino, diametro del tip, altezza del camino.

Mentre l’altezza del camino è un dato che il programma mantiene fisso durante i calcoli che fa, il dato del diametro interno viene mantenuto inalterato solo se l’effetto camino è sufficiente a vincere le perdite di carico di tutto il circuito. In caso contrario, sia il diametro interno, che quello del tip, vengono incrementati dal programma a batches di 10 mm per incremento, fino a quando il criterio di dimensionamento non è soddisfatto.

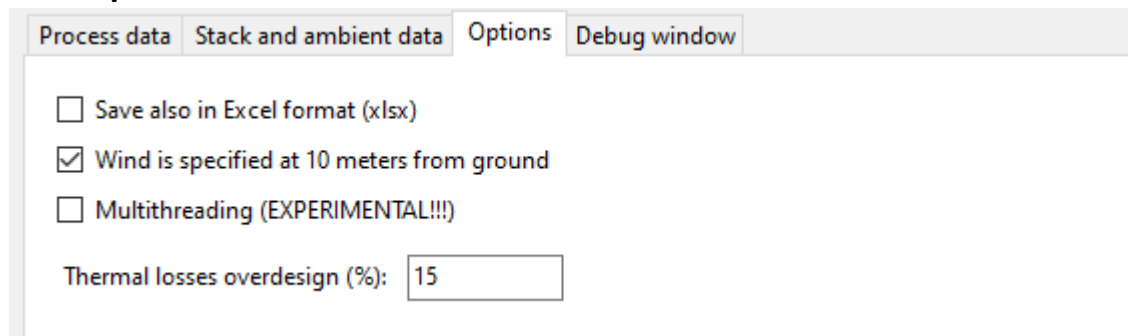
Nel caso si voglia simulare un camino senza tip, è sufficiente assegnare a quest’ultimo lo stesso valore del diametro interno. La restrizione dovuta al tip è attualmente simulata come un orifizio.

L’opzione “Control valve/ damper pressure drop” simula la presenza di una valvola di controllo o un damper durante il calcolo delle perdite di carico del camino.

Da questa scheda è possibile inoltre inserire i dati ambientali: Temperatura dell’aria esterna, pressione, velocità del vento e classi di stabilità. La velocità del vento è considerata di default calcolata a 10 metri dal suolo; tuttavia, agendo sull’opportuno campo presente nella scheda “Options”, è possibile far sì che il calcolo tenga conto della velocità del vento all’uscita dello stack.

Per una descrizione dettagliata delle classi di stabilità, si rimanda al capitolo apposito.

3.3. Options



La scheda “Options” consente la modifica di alcuni parametri utilizzati nel calcolo:

- **Save also in Excel format**: Attivando questa opzione, è possibile salvare i risultati dei calcoli non solo in formato testuale, ma anche nel formato nativo di Excel (xlsx).
- **Wind is specified at 10 meters from ground**: Togliendo il segno di spunta da questa opzione, la velocità del vento impostata in “Process data” sarà considerata dal programma come calcolata nel punto di uscita del camino. Se il segno di spunta è invece mantenuto, la velocità del vento nel punto di uscita dal camino sarà calcolata con la seguente formula:

$$u = u_{10} * \left(\frac{H}{10}\right)^{\alpha}$$

Dove:

u = velocità del vento nel punto di uscita del camino (m/s)

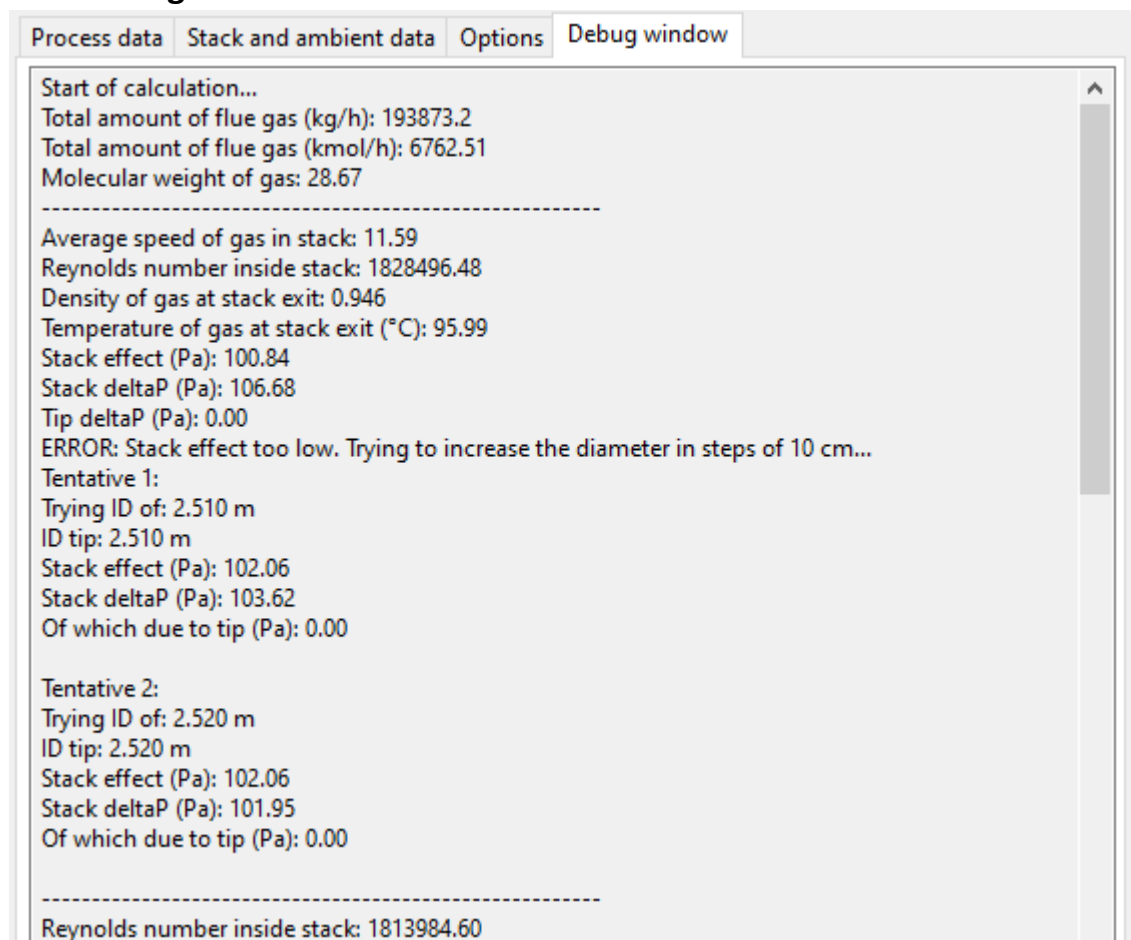
u_{10} = velocità del vento specificata a 10 metri dal suolo (m/s)

H = altezza del camino (m)

α = parametro dipendente dalla classe di stabilità atmosferica:

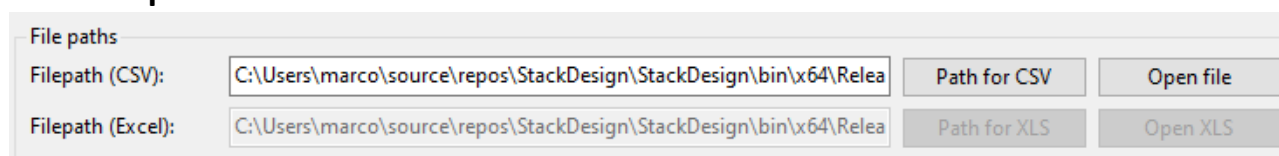
- 0.12 per classe A (fortemente instabile)
 - 0.16 per classe B (mediamente instabile)
 - 0.2 per classe C (debolmente instabile)
 - 0.25 per classe neutra D
 - 0.3 per classe E (debolmente stabile)
 - 0.4 per classe F (stabile)
-
- **Multithreading**: Consente il calcolo multi core. E’ una funzione sperimentale non ancora ottimizzata.
 - **Thermal losses overdesign**: Considera un margine di sicurezza sulle perdite termiche calcolate dal programma. Influenza il calcolo della temperatura del gas in uscita.

3.4. Debug window



Nella finestra di debug il programma scrive il risultato dei calcoli, o riassume quelli più importanti.

3.5. File paths



In questa scheda è possibile specificare il percorso dove salvare il file CSV che conterrà i dati di dispersione degli inquinanti calcolati dal programma. Utilizzare il pulsante "Patch for CSV" per specificare il percorso di salvataggio, e "Open file" per aprire con Notepad il file di testo generato.

3.6. Results

Results			
Fluegas (kg/h).....	193873.20	Fluegas (kmol/h).....	6762.51
Gas vel. at stack tip (m/s):	11.27	Temp. at top (°C).....	95.93
Gas vel. inside stack (m/s):	11.27	Wind speed at top (m/s)	4.24
Stack effect (Pa).....	102.06		
Total DeltaP (Pa).....	101.95	Due to tip (Pa).....	0.00
ID calculated (m).....	2.52	Tip ID (m).....	2.52
Plume rise (m).....	88.39	Effective rise (m).....	128.39

Una volta configurato il programma, cliccando sul pulsante “Start calculation”, il programma effettua i calcoli. I risultati sono mostrati, come accennato in precedenza, sia nella schermata “Results”, che nel file di testo specificato in “File paths”.

4. Importazione dei risultati in Microsoft Excel

Una volta ultimato il calcolo, il programma salva in un file di testo il profilo di concentrazione ottenuto. I dati possono essere importati in Excel in due modi:

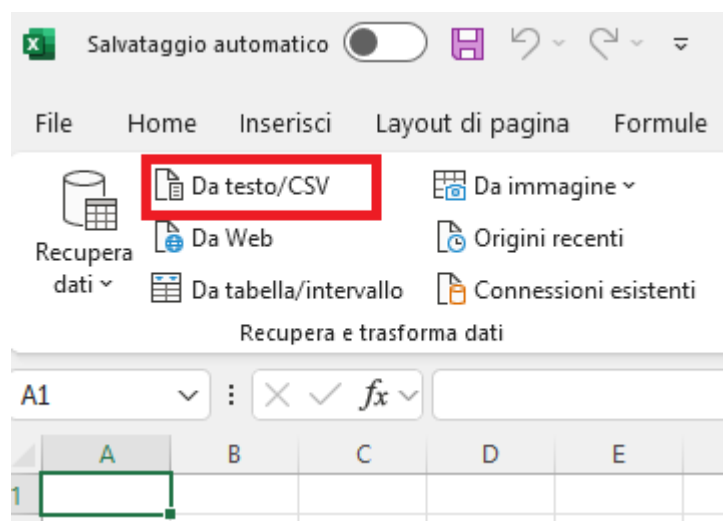
- Importazione del file di testo
- Salvataggio dei dati direttamente in formato Excel

4.1. Importazione del file di testo – primo metodo di importazione

I dati sono separati per virgola e iniziano alla riga 39 del file di testo:

```
output.txt - Blocco note di Windows
File Modifica Formato Visualizza ?
T at stack outlet (°C): 95.9196
Gas velocity inside stack (avg, m/s): 10.7895
Gas velocity at stack tip (m/s): 10.7895
Gas density at stack tip (kg/m3): 0.9584
-----
Stack internal diameter (m): 2.5750
Stack tip internal diameter (m): 2.5750
Stack height (m): 40.0000
Stack effect (Pa): 102.0445
DeltaP (Pa): 101.0150
Plume rise (m): 88.3800
Effective plume height (m): 128.3800
-----
Stack pollutant dispersion at ground in the direction of wind
distance (m),conc SO2,conc NO2, conc H2S, conc p1, conc p2, conc p3 (ug/m3)
1,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
2,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
3,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
4,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
5,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
6,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
7,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
8,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
9,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
10,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
```

Per importare il file in Excel, il metodo più immediato è aprire un nuovo foglio Excel e selezionare il menu “Dati->Da testo/CSV”:



Una volta selezionato il file di testo, Excel effettua una analisi del file. Selezionare “Rilevamento del tipo di dati” e scegliere “In base all’intero set di dati” per consentire ad Excel di effettuare correttamente il riconoscimento del file:

output.txt

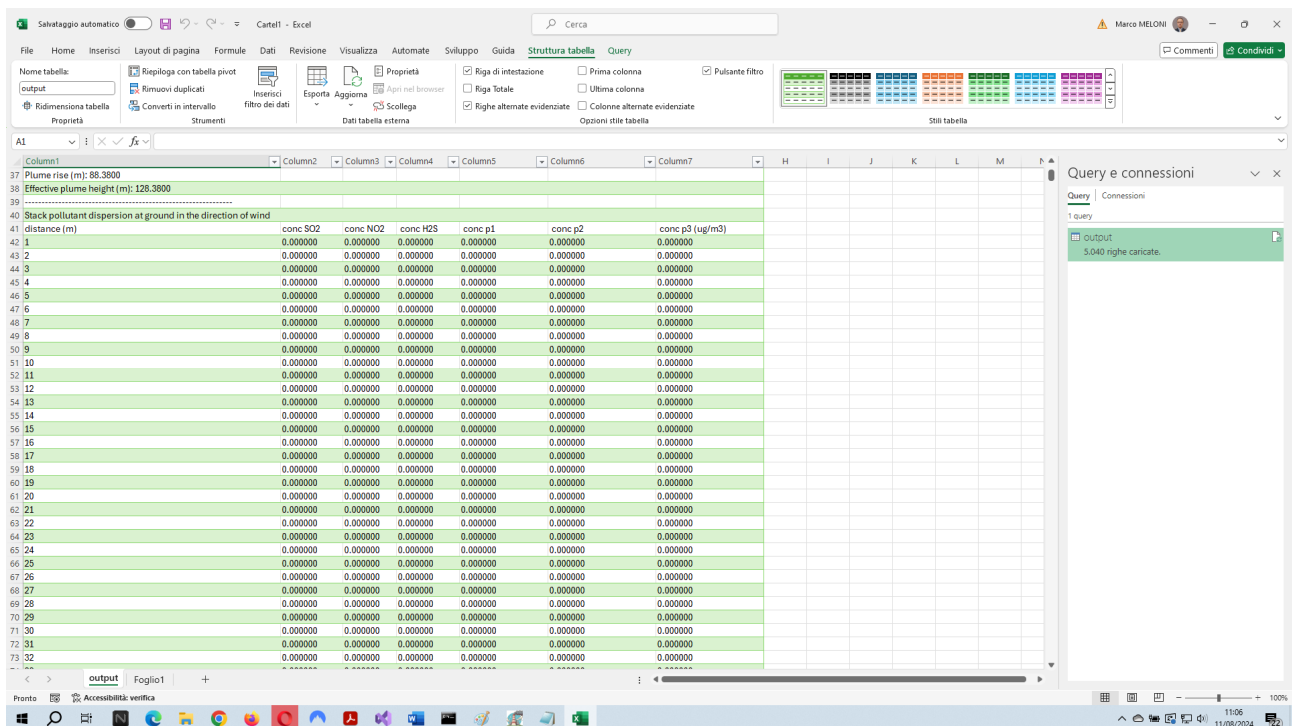
Origine file: 65001: Unicode (UTF-8) Delimitatore: Virgola Rilevamento del tipo di dati: In base all'intero set di dati

Stack height (m): 40.0000						
Stack effect (Pa): 102.0445						
DeltaP (Pa): 101.0150						
Plume rise (m): 88.3800						
Effective plume height (m): 128.3800						

Stack pollutant dispersion at ground in the direction of...						
distance (m)	conc SO2	conc NO2	conc H2S	conc p1	conc p2	conc p3
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
7	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
10	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
12	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
13	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
14	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Carica Trasforma dati Annulla

Infine, cliccare sul pulsante “Carica” per caricare i dati in un foglio Excel:



4.2. Metodo alternativo di importazione

In alternativa, nel caso Excel non riconosca correttamente gli intervalli (purtroppo con le ultime versioni accade spesso), è ancora più semplice procedere in questo modo:

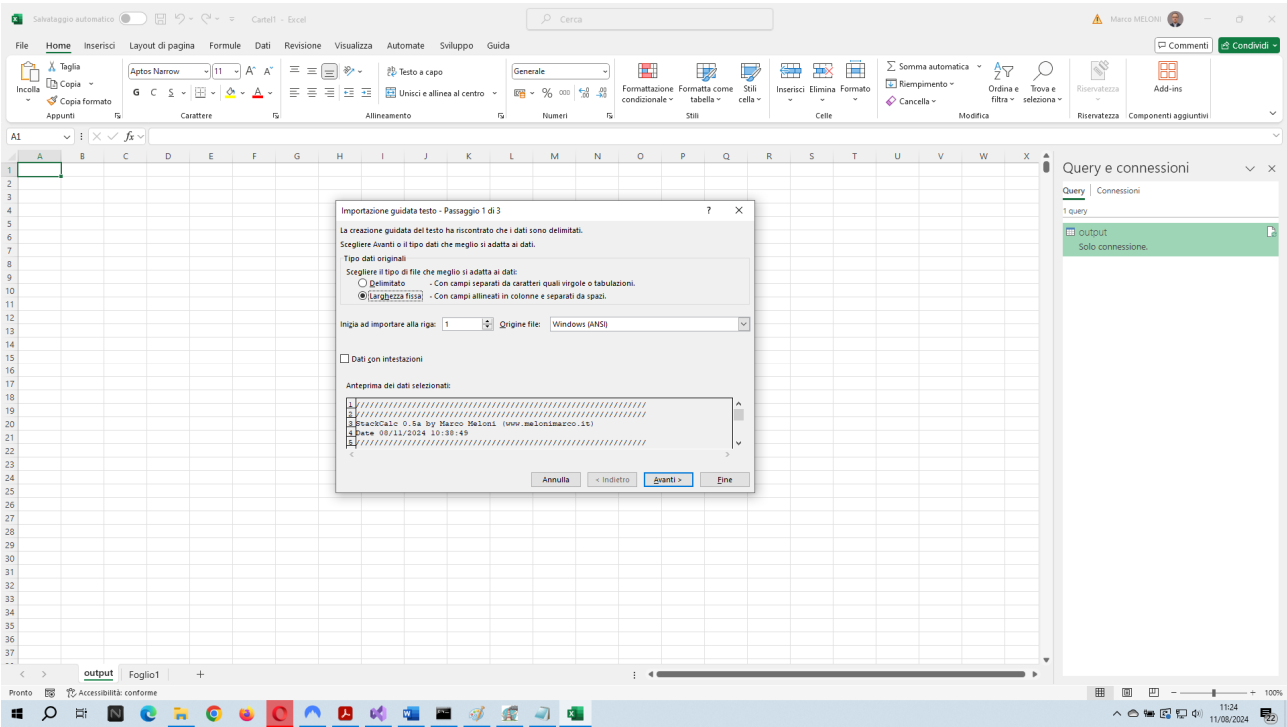
1. Aprire il file di output e selezionare tutti i dati in esso contenuti e copiarli in memoria (CTRL+A, seguito da CTRL+C):

output.txt - Blocco note di Windows

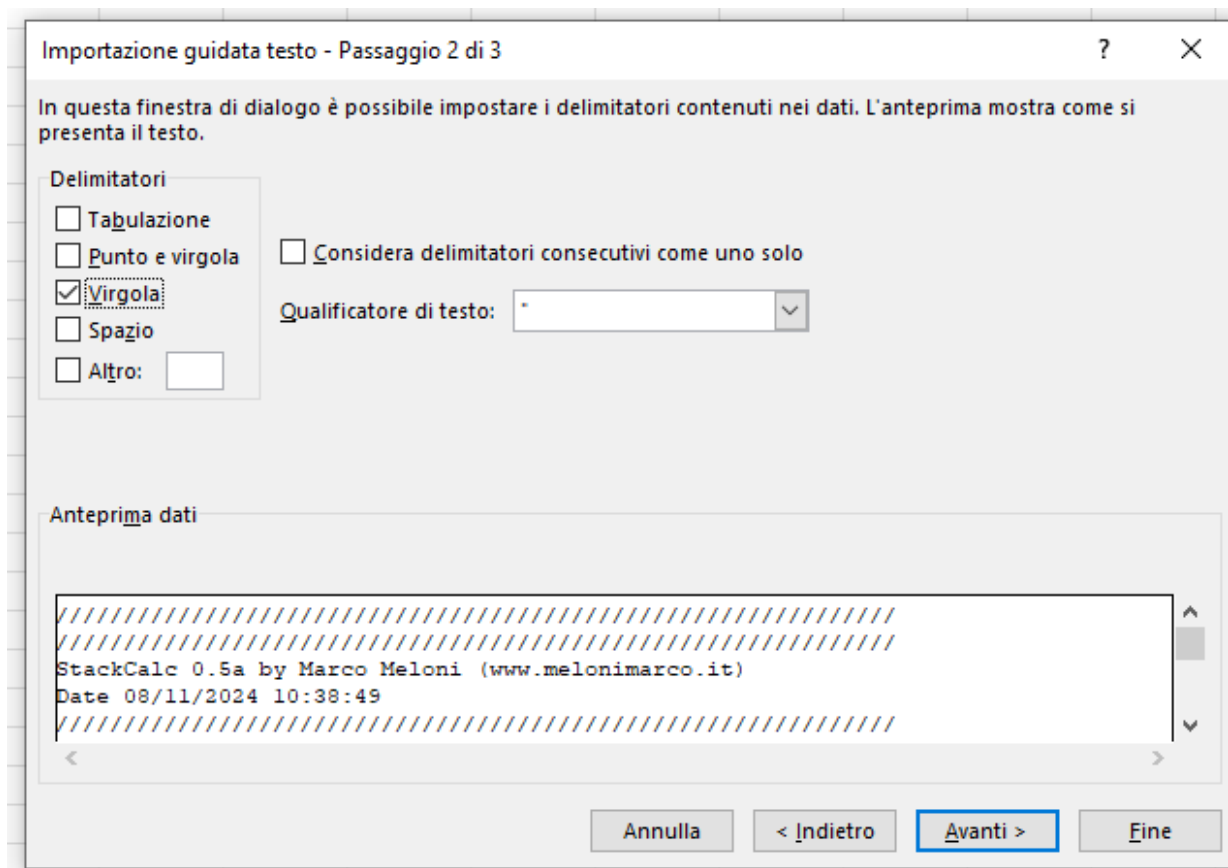
File Modifica Formato Visualizza ?

```
H2O (kg/h, kmol/h, %wt, %vol): 2000,111.04941699056079,0.010316020986913095,0.016421324677569564
SO2 (kg/h, kmol/h, %wt, %vol): 38.2,0.5962601067648987,0.00019703600085004013,8.81713841532456E-05
H2S (kg/h, kmol/h, %wt, %vol): 40,1.1736400445983217,0.0002063204197382619,0.00017355088166365112
Pollutant 1 (kg/h, kmol/h, %wt, %vol): 10,0.5882352941176471,5.1580104934565476E-05,8.698472277736113E-05
Pollutant 2 (kg/h, kmol/h, %wt, %vol): 15,0.6,7.737015740184821E-05,8.872441723290835E-05
Pollutant 3 (kg/h, kmol/h, %wt, %vol): 20,0.6666666666666666,0.00010316020986913095,9.858268581434261E-05
-----
T at stack inlet (°C): 100.0000
T at stack outlet (°C): 95.9196
Gas velocity inside stack (avg, m/s): 10.7895
Gas velocity at stack tip (m/s): 10.7895
Gas density at stack tip (kg/m3): 0.9584
-----
Stack internal diameter (m): 2.5750
Stack tip internal diameter (m): 2.5750
Stack height (m): 40.0000
Stack effect (Pa): 102.0445
DeltaP (Pa): 101.0150
Plume rise (m): 88.3800
Effective plume height (m): 128.3800
-----
Stack pollutant dispersion at ground in the direction of wind
distance (m),conc SO2,conc NO2, conc H2S, conc p1, conc p2, conc p3 (ug/m3)
1,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
2,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
3,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
4,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
5,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
6,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
7,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
8,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
9,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
10,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
11,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
```

2. Aprire un nuovo foglio di Excel e selezionare da “Home>Incolla>Importazione guidata testo”. Comparirà la seguente finestra:



3. Selezionare “Delimitato”, e nella schermata successiva “Virgola” e cliccare su “Avanti”:



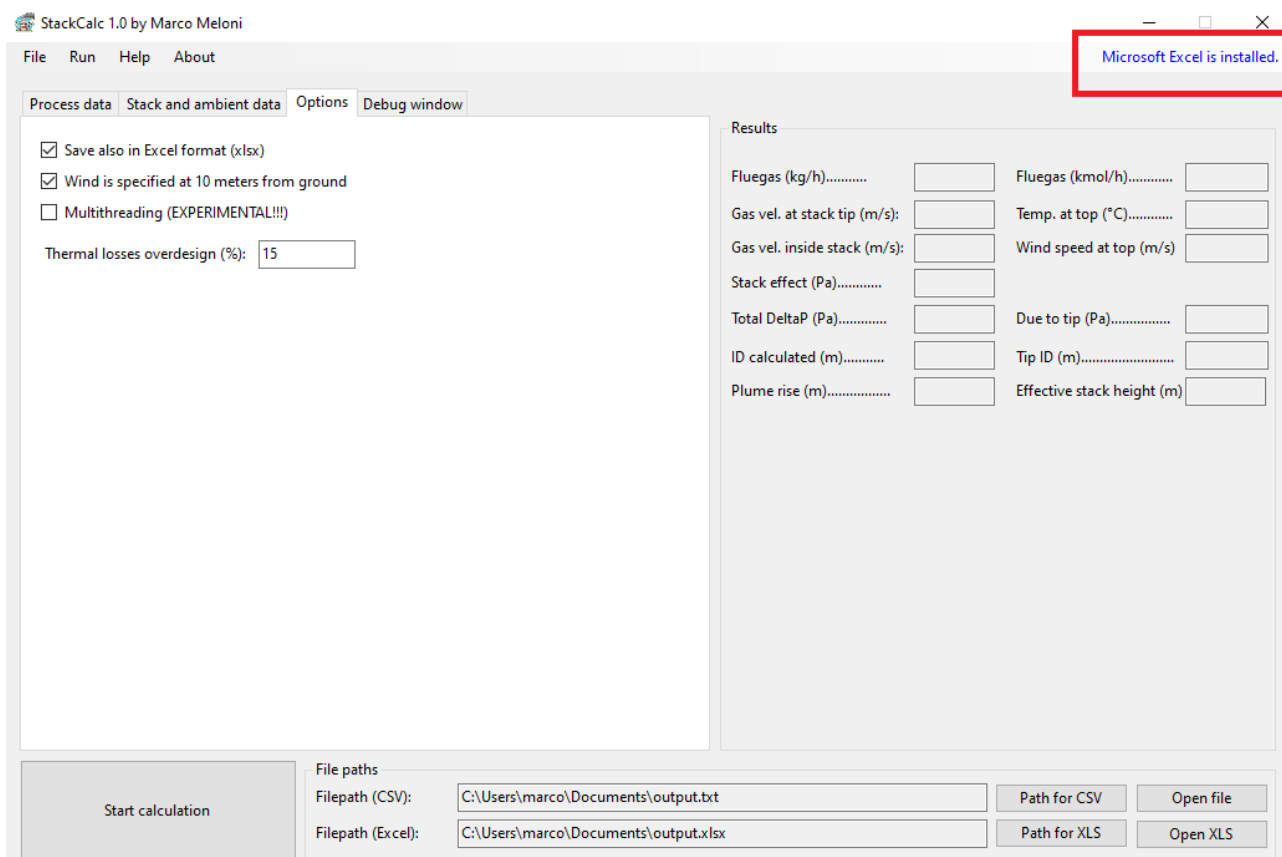
4. Infine, cliccare su “Avanti” o “Fine” per avere i dati perfettamente ordinati:

38	-----							
39	Stack pollutant dispersion at ground in the direction of wind							
40	distance (conc SO2	conc NO2	conc H2S	conc p1	conc p2	conc p3 (ug/m3)	
41	1	0	0	0	0	0	0	
42	2	0	0	0	0	0	0	
43	3	0	0	0	0	0	0	
44	4	0	0	0	0	0	0	
45	5	0	0	0	0	0	0	
46	6	0	0	0	0	0	0	
47	7	0	0	0	0	0	0	
48	8	0	0	0	0	0	0	
49	9	0	0	0	0	0	0	
50	10	0	0	0	0	0	0	
51	11	0	0	0	0	0	0	
52	12	0	0	0	0	0	0	
53	13	0	0	0	0	0	0	
54	14	0	0	0	0	0	0	
55	15	0	0	0	0	0	0	
56	16	0	0	0	0	0	0	
57	17	0	0	0	0	0	0	
58	18	0	0	0	0	0	0	
59	19	0	0	0	0	0	0	
60	20	0	0	0	0	0	0	
61	21	0	0	0	0	0	0	
62	22	0	0	0	0	0	0	
63	23	0	0	0	0	0	0	
64	24	0	0	0	0	0	0	
65	25	0	0	0	0	0	0	

4.3. Salvare i risultati in formato nativo per Microsoft Excel

A partire dalla versione 1.0 del programma, StackCalc è ora in grado di creare direttamente un file nativo in formato **xlsx** in cui sono salvati tutti i risultati calcolati dal programma. Affinchè ciò sia possibile, tuttavia, è necessario che sul PC sia installata una versione di Microsoft Excel.

StackCalc verifica automaticamente in fase di avvio se è presente una versione di Microsoft Excel nel proprio PC, ed in caso affermativo, lo indica in alto a destra nella finestra principale:



Se Microsoft Excel è installato, per poter salvare i risultati in formato XLSX, non occorre far altro che spuntare la casella “Save also in Excel format (xlsx)” situata all’interno del menu “Options”, selezionare il percorso di salvataggio del file cliccando sul pulsante “Path for XLSX”, e avviare il calcolo.

Nota: il salvataggio in formato Excel richiede più tempo del formato testuale. Qualche secondo di attesa in più è normale.

4.4. Graficare i risultati

Una volta importati i dati, è possibile mostrare immediatamente il grafico di concentrazione degli inquinanti selezionando tutto l’intervallo di interesse e scegliendo uno dei grafici a dispersione:

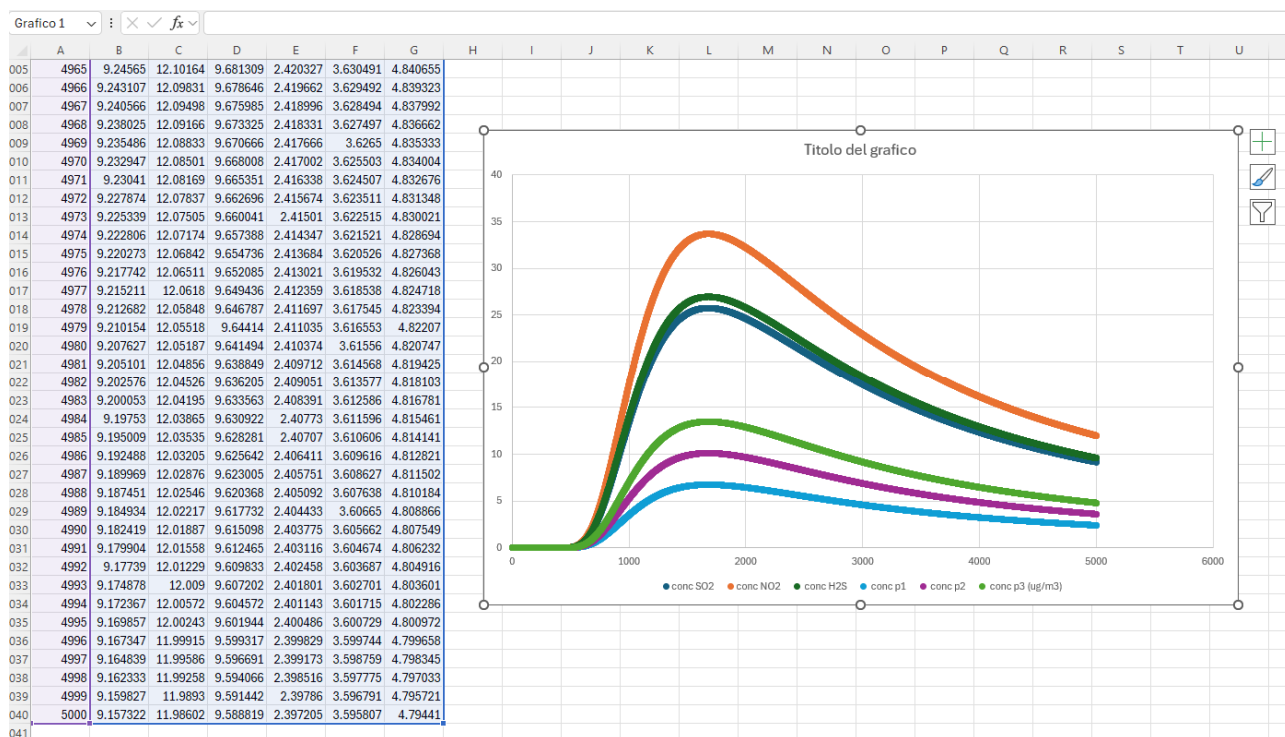


Figura 2: Distribuzione dei principali inquinanti al suolo, in base alla distanza dal punto di emissione

I valori di concentrazione sono espressi in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, la distanza è espressa in metri.

5. Calcolo dell'effetto camino – modello utilizzato

L'effetto camino è un fenomeno fisico legato al movimento dell'aria o di altri fluidi all'interno di un condotto verticale, come un camino o una torre. Esso si basa sulla dilatazione dei gas prodotta dal loro riscaldamento e dal conseguente stabilirsi di una differenza di densità e di pressione tra il punto più basso (in cui viene riscaldato il gas) e il punto più alto (in cui il gas fuoriesce all'esterno).

L'effetto camino è influenzato da vari parametri, tra cui l'altezza del condotto e la differenza di temperatura tra la base e la sommità. L'altezza del camino è particolarmente rilevante: maggiore è l'altezza, più significativo sarà il gradiente di pressione che si sviluppa, e quindi più forte sarà la corrente ascensionale dell'aria. La differenza di temperatura è l'altro fattore cruciale: quanto maggiore è la differenza tra la temperatura interna e quella esterna, tanto più marcata sarà la variazione di densità e, di conseguenza, più intenso sarà il flusso d'aria.

Affinchè il camino generi un tiraggio sufficiente, quest'ultimo deve essere in grado di vincere tutte le perdite di carico incontrate lungo il percorso, fino alla cima del camino.

StackCalc modella questo fenomeno tramite la seguente equazione:

$$H_S g (\rho_a - \rho_f) = \sum \Delta P_C + \sum \Delta P_D + \Delta P_{TIP} \quad (5.1)$$

Dove

- H_S è l'altezza del camino, in metri;
- g è l'accelerazione di gravità, in m/s^2
- $\rho_a - \rho_f$ è la differenza tra le densità rispettivamente dell'aria esterna, e del gas che scorre dentro il camino (kg/m^3). La densità è calcolata per entrambi i fluidi partendo dall'equazione di stato dei gas perfetti.
- $\sum \Delta P_C$ è pari alla sommatoria di tutte le perdite di carico concentrate lungo tutto il tratto di circuito considerato (Pa). Le perdite considerate dal programma sono attualmente:
 - Ingresso al camino
 - Uscita dal camino
 - Presenza o meno di valvola di regolazione o damper
- $\sum \Delta P_D$ è pari alla sommatoria delle perdite di carico distribuite lungo tutto il tratto di circuito considerato (Pa). Esse sono calcolate con l'equazione di Darcy-Weisbach, con il fattore di Darcy calcolato attraverso la formula di Colebrook-White. Si rimanda a testi di fluidodinamica per una descrizione dettagliata.
- Infine, ΔP_{TIP} è la perdita di carico presente nel caso si sia specificato un diametro della sezione di uscita inferiore al diametro del camino. Il programma simula questa restrizione approssimando il tip ad un orifizio concentrico. Il programma limita automaticamente il diametro del pit ad un valore minimo pari al 70% del diametro dello stack, nel caso il valore inserito in input sia inferiore a questo limite.

Nel caso il tiraggio naturale non sia sufficiente, il programma itera aumentando progressivamente il diametro dello stack e del pit (se presente) fino a quando i due valori non convergono.

6. Cenni di meteorologia e modelli utilizzati

La meteorologia è la scienza che studia l'atmosfera terrestre e i fenomeni che in essa si verificano. Analizza le condizioni atmosferiche come la temperatura, l'umidità, la pressione, il vento, le precipitazioni, e altri fattori che influenzano il clima e il tempo.

La dispersione in atmosfera degli effluenti gassosi uscenti da un camino rientra nel campo della meteorologia.

Questo fenomeno dipende da una serie di fattori che influenzano il comportamento degli inquinanti una volta immessi nell'atmosfera:

Tipologia degli Effluenti: Le proprietà fisiche e chimiche dei gas emessi, come la densità, la reattività chimica, e la solubilità in acqua, determinano come si disperdono e si depositano nell'ambiente.

Condizioni Meteorologiche: Il vento, la temperatura, l'umidità e la stabilità atmosferica sono determinanti principali. Il vento può trasportare gli effluenti su lunghe distanze, mentre la temperatura e l'umidità influenzano la densità e la velocità di dispersione.

Stabilità Atmosferica: La stabilità dell'atmosfera determina la capacità dell'aria di mescolarsi verticalmente. In condizioni di atmosfera stabile, la dispersione verticale è limitata, portando a una maggiore concentrazione degli inquinanti vicino alla sorgente. In condizioni di instabilità, invece, i gas tendono a disperdersi più rapidamente in verticale.

Altezza del Camino: L'altezza del camino influisce sulla distanza percorsa dagli effluenti prima di ricadere al suolo. Camini più alti tendono a disperdere gli inquinanti su un'area più ampia, riducendo le concentrazioni locali ma aumentando il potenziale impatto su aree più lontane.

Topografia: Anche la topografia del luogo influenza la dispersione degli effluenti. La presenza di grandi massi d'acqua (laghi, mari) e di edifici impatta fortemente su come gli inquinanti si distribuiscono nell'ambiente.

6.1. Condizioni meteorologiche: temperatura

Se si considera un elementino di volume gassoso uscente dal camino, questo entra nell'atmosfera con una propria temperatura diversa da quella atmosferica e un proprio volume. Esso andrà quindi incontro generalmente ad un raffreddamento e ad una espansione.

Le condizioni di uscita del gas dal camino, nonché le sue proprietà fisiche e chimiche, e le caratteristiche dell'aria atmosferica esterna, determinano se il gas sarà soggetto ad una spinta di galleggiamento positiva, neutra o negativa.

E' immediato constatare che la spinta di galleggiamento dipende dalla differenza tra la densità del gas e quella dell'aria che lo circonda ed in definitiva, se si considera entrambi come gas perfetti, al loro peso molecolare e alla loro temperatura.

Il peso molecolare del gas lo si può approssimare costante nel tempo, in quanto non stiamo considerando reazioni chimiche, ma non altrettanto si può dire della temperatura del gas, che potrà variare a causa della diluizione con l'aria circostante o a causa di fenomeni di evaporazione o condensazione originati dal rilascio.

Per quanto concerne invece la pressione, essa, come la temperatura, varierà con la quota.

Se si indica con z la quota a cui si trova l'elementino rispetto al suolo, è possibile scrivere la seguente equazione che esprime la variazione della pressione dell'aria con la quota:

$$dP = -\rho * g * dz \quad (6.1)$$

Applicando la legge dei gas perfetti e considerando, una legge di trasformazione isoentropica per la temperatura:

$$T = T_1 * \left(\frac{P}{P_1}\right)^{\frac{K-1}{K}} \quad (6.2)$$

Dove

- T e T1: Temperatura nelle condizioni di pressione considerate (K)
- P e P1: Pressione nei punti di misura considerati (Pa)
- K = coefficiente di trasformazione isoentropica (1.4 per aria)

Integrando l'equazione 6.1 e sostituendo al suo interno quanto ricavato dalla equazione 5.2, è possibile dimostrare che in condizioni adiabatiche, la variazione di temperatura varia con la quota con la seguente relazione:

$$\frac{dT}{dZ} = - \frac{(k-1)*g}{k*R*PM} \quad (6.3)$$

Dove

- g = costante di accelerazione gravitazionale
- R = costante dei gas perfetti,
- PM = peso molecolare dell'aria.

Tale equazione, consente di determinare immediatamente, che in condizioni adiabatiche, si ha una diminuzione di circa 0.01°C di temperatura ogni metro di innalzamento di quota. In queste condizioni l'elementino di volume di troverà in equilibrio con l'aria circostante ad ogni quota, non essendo quindi sollecitato a salire o scendere di quota, si troverà in condizioni neutre.

Questa condizione è tipica quando si ha cielo coperto, nuvoloso e con venti da moderati a forti.

Tuttavia, possono esistere altre condizioni dell'aria che determinano condizioni di galleggiamento del gas completamente differenti.

In condizioni di caduta subadiabatiche ($-0.01 \frac{^\circ C}{m} < \frac{dT}{dZ} < 0 \frac{^\circ C}{m}$), la velocità di caduta della temperatura è maggiore di quella adiabatica. In questo caso un elementino di gas che si trovasse ad una posizione Z₂, avrebbe una temperatura minore di quella della atmosfera che lo circonda alla stessa quota. L'elemento sarebbe quindi più pesante dell'aria che lo circonda e avere la tendenza a scendere fino ad una quota di equilibrio Z_{eq}. Se invece di trova ad una quota inferiore a Z_{eq}, poiché la temperatura dell'aria in questo punto è inferiore a quella del gas, il gas tenderà a salire fino al punto di equilibrio in Z_{eq}. In questo caso l'atmosfera si dice stabile.

Un caso particolare di stabilità si verifica quando $\frac{dT}{dZ} = 0 \frac{^\circ C}{m}$ (isotermia), nel qual caso l'atmosfera è molto stabile.

In condizioni di caduta superadiabatiche ($\frac{dT}{dZ} < -0.01 \frac{^\circ C}{m}$), il fenomeno appena descritto si inverte: un elementino di gas che si trovasse ad una quota Z₂, essendo più leggero dell'aria, continuerà a salire, mentre in un punto Z₁ al di sotto del punto Z_e di intersezione con la curva adiabatica, il gas, essendo più pesante, continuerà a scendere. In questi casi l'atmosfera si dice instabile. Queste condizioni sono tipiche in casi di forte irraggiamento o di passaggio di aria fredda su un terreno caldo.

Possono aversi infine casi in cui $\frac{dT}{dz} > 0$. Si parla in questi casi di inversioni termiche. Caso tipico è il passaggio dal giorno alla notte.

I grafici che seguono illustrano graficamente i concetti espressi poco sopra.

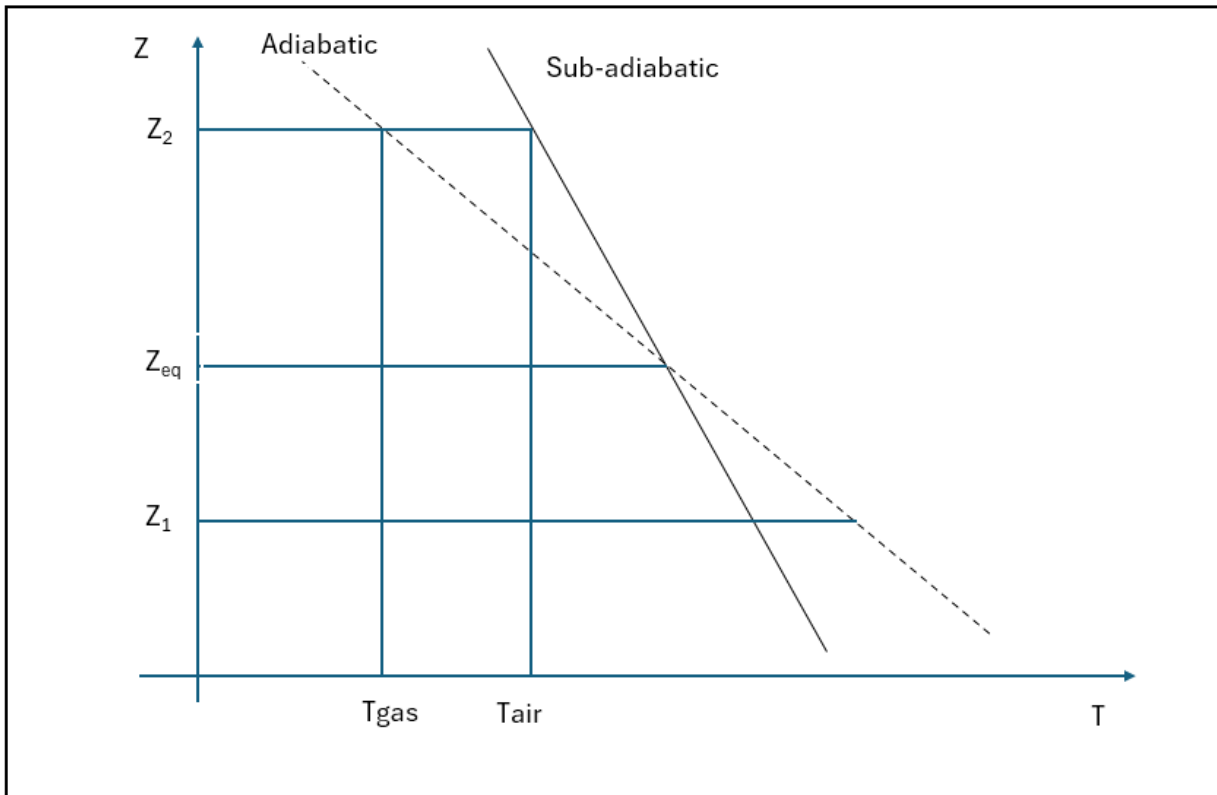


Figura 3: Condizione di caduta subadiabatica

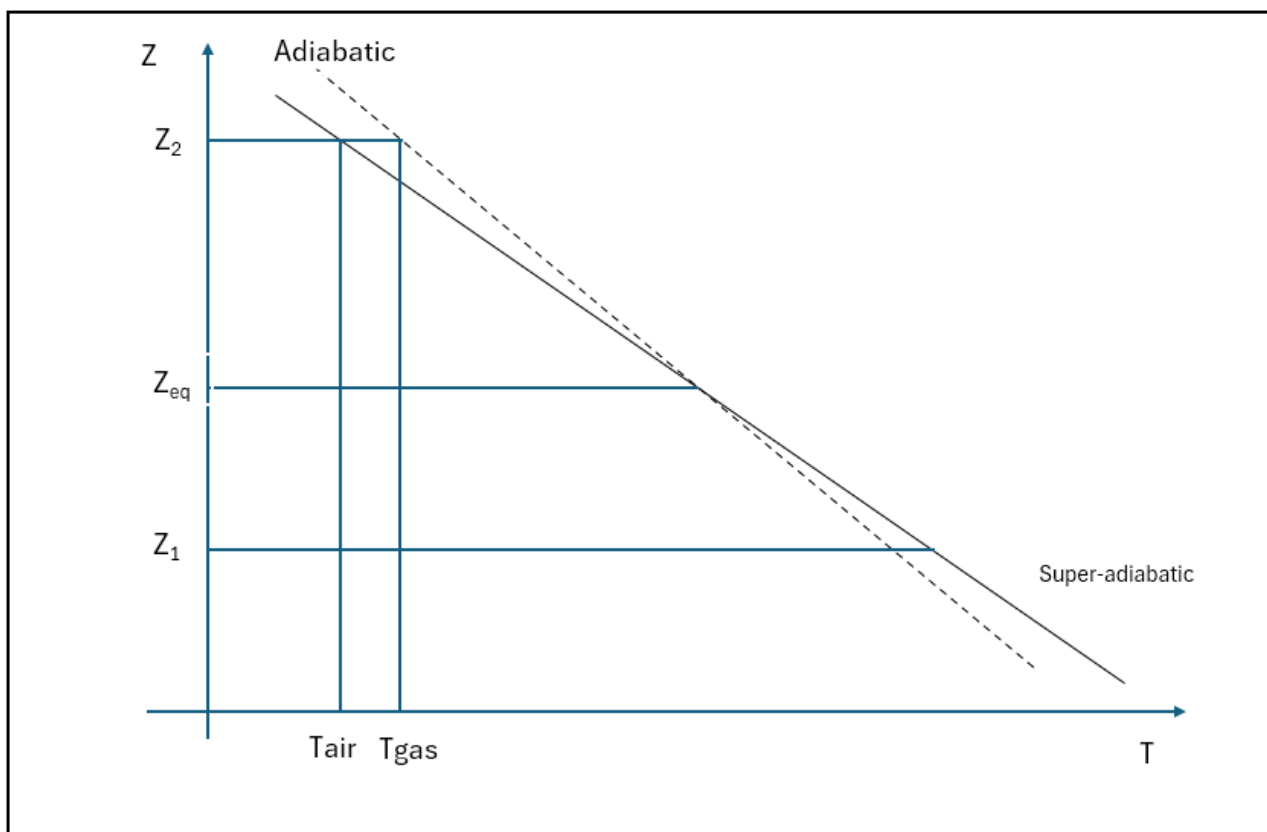


Figura 4: Condizione di caduta superadiabatica

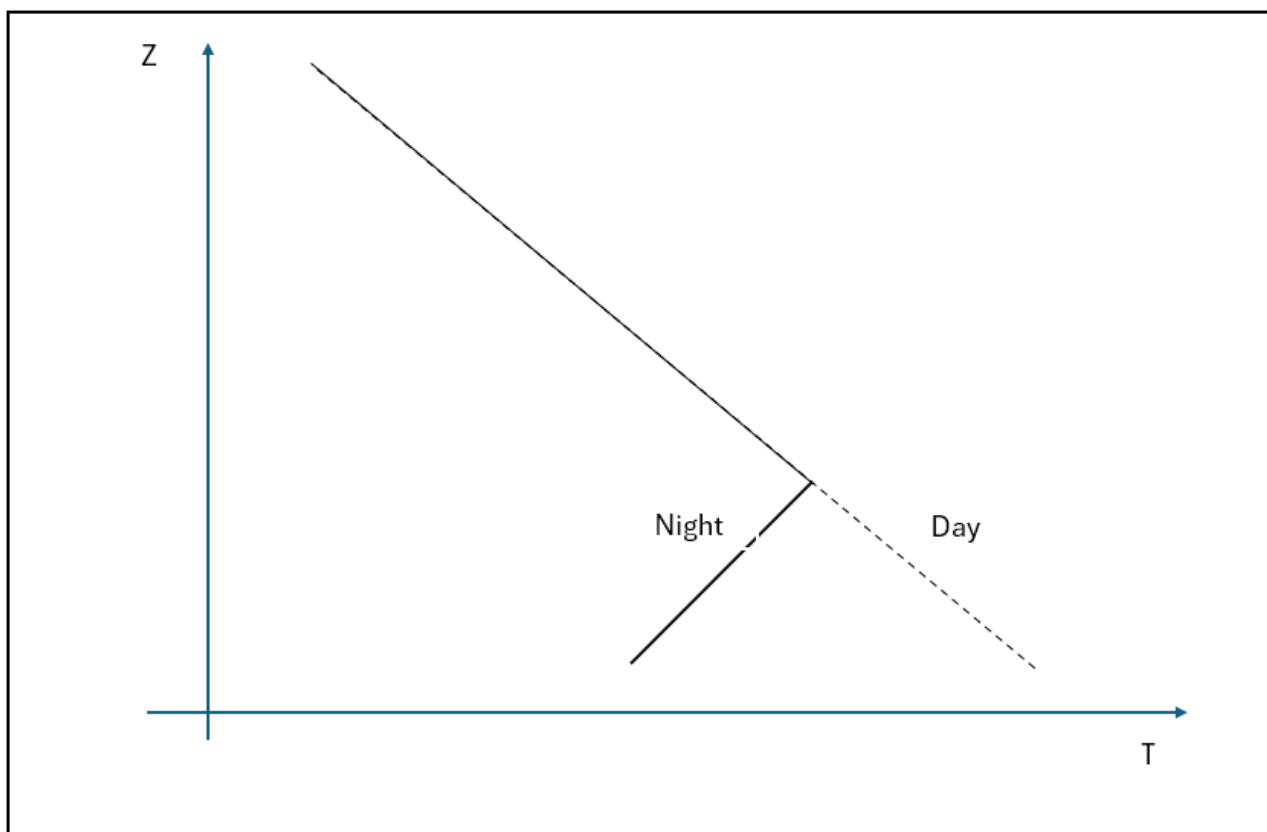


Figura 5: Condizione di inversione termica

6.2. Classi di stabilità di Pasquill

A fronte di quanto espresso nei paragrafi precedenti, sono stati proposti diversi metodi per qualificare la stabilità atmosferica. Nel 1961 Pasquill propose le seguenti classi di stabilità atmosferica:

Velocità del vento (m/s)	Giorno, insolazione			Notte	
	Forte	Media	Debole	>50% offuscamento	<50% offuscamento
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Esse comprendono tre classi per l'instabilità (A, B, C), una classe per la neutralità (D), e due classi per la stabilità (E ed F).

La selezione della classe, anche nel programma StackCalc, va effettuata in funzione della velocità del vento, dell'intensità della radiazione solare per il giorno, e della limpidezza del cielo durante la notte.

Tali classi sono ancora oggi utilizzate in modo esteso per classificare le condizioni meteo. In particolare, con esse è possibile determinare i coefficienti di dispersione atmosferica relativi al modello gaussiano utilizzato da StackCalc e descritto più avanti.

6.3. Velocità del vento

Un altro fattore fondamentale che influisce sulla dispersione degli effluenti è la velocità del vento. Il vento ha un comportamento dinamico che influisce pesantemente su forma e comportamento del pennacchio. Come già anticipato nel capitolo 3.3, la velocità del vento varia con la quota e poiché generalmente la misurazione della sua velocità viene fatta ad una quota di 10 m, è possibile stimare la velocità del vento ad una quota qualsiasi con la seguente relazione:

$$u = u_{10} * \left(\frac{H}{10}\right)^{\alpha} \quad (6.4)$$

Dove:

- u = velocità del vento nel punto di uscita del camino (m/s)
- u_{10} = velocità del vento specificata a 10 metri dal suolo (m/s)
- H = altezza del camino (m)
- α = parametro dipendente dalla classe di stabilità atmosferica:
 - 0.12 per classe A (fortemente instabile)
 - 0.16 per classe B (mediamente instabile)
 - 0.2 per classe C (debolmente instabile)
 - 0.25 per classe neutra D
 - 0.3 per classe E (debolmente stabile)

- 0.4 per classe F (stabile)

E' inoltre importante anche conoscere la direzione del vento, ovvero la distribuzione della forza nelle varie direzioni; per fare ciò ci si avvale di diagrammi polari che mostrano la probabilità di intensità dei venti nelle varie direzioni.

6.4. Topografia

Riveste infine importanza la morfologia del territorio, in quanto può influenzare pesantemente la dispersione degli effluenti: laghi e mari, presenza di centri abitati o ostacoli naturali (montagne o vallate), influenza sulla turbolenza dell'atmosfera e quindi sulla forma e comportamento del pennacchio.

Per esempio, la presenza di un edificio modifica la distribuzione delle velocità del vento, con formazione di vortici che influenzano la dispersione dell'effluente.

6.5. Innalzamento e forma del pennacchio

I gas uscenti dal camino, in una fase iniziale, tenderanno a muoversi verso l'alto, in virtù dei vari fattori elencati in precedenza. Ciò comporta essenzialmente un innalzamento apparente dell'altezza del camino, con un positivo effetto sulla dispersione degli effluenti.

Questo comportamento si spiega con la differenza di temperatura tra i gas emessi e l'aria circostante: i gas caldi, essendo meno densi, tendono a salire, creando un pennacchio che si innalza al di sopra del camino. Tale innalzamento aumenta la distanza verticale tra la sorgente di emissione e il livello del suolo, favorendo una maggiore diluizione degli inquinanti nell'atmosfera e riducendo, di conseguenza, il loro impatto al suolo. Inizialmente, i gas hanno una velocità di uscita con una componente diretta solo verticalmente; successivamente, essa si somma con la componente orizzontale dovuta al vento, con il risultato che la traiettoria del gas tende a curvare.

A causa dei fattori illustrati nei paragrafi precedenti, l'effettivo innalzamento del pennacchio può essere infine ulteriormente influenzato da altri fattori esterni, come le condizioni meteorologiche, la già descritta velocità del vento, la stabilità atmosferica e la topografia circostante. Ad esempio, in condizioni di forte vento o di inversione termica, l'innalzamento del pennacchio potrebbe essere limitato o addirittura annullato, con una conseguente minore dispersione degli inquinanti e un possibile incremento della loro concentrazione a livello del suolo. Pertanto, è essenziale considerare questi fattori nelle valutazioni di impatto ambientale e nelle strategie di gestione delle emissioni.

In ogni caso, la spinta verticale del gas può quindi essere di natura completamente meccanica, oppure dipendere dalla temperatura dei gas uscenti.

In linea generale, se la differenza di temperatura tra i gas uscenti dal camino e l'aria ambiente è inferiore a 50°C, si parla di emissioni fredde. In questo caso il fenomeno di risalita è di natura completamente meccanica, e l'innalzamento del pennacchio oltre il punto di emissione può essere stimato con la seguente formula:

$$\Delta H = D_u * \left(\frac{V_u}{u} \right)^{1.4} \quad (6.5)$$

Dove

- ΔH = innalzamento del pennacchio rispetto al punto di emissione del gas, in m
- D_u = Diametro della sezione di uscita del camino, in m
- V_u = velocità dei gas calcolata alla sezione di uscita del camino, m/s
- u = velocità del vento, calcolato alla quota corrispondente alla sezione di uscita dal camino, m/s

Se invece la differenza di temperatura è superiore a 50°C, occorre tenere conto delle condizioni atmosferiche. In condizioni di stabilità, l'innalzamento del pennacchio può essere stimato con la seguente formula:

$$\Delta H = 2.6 * \left(\frac{F}{s*u} \right)^{1/3} \quad (6.6)$$

Dove

$$F = g * V_u * \left(\frac{D_u}{2} \right)^2 \frac{T_u - T_a}{T_a} \quad (6.7)$$

- Con g = costante di accelerazione gravitazionale, m/s²
- T_u = Temperatura del gas nel punto di uscita, in K
- T_a = Temperatura dell'aria calcolata alla quota corrispondente al punto di uscita, in K

Infine, con s si indica il parametro di stabilità. Esso, come il nome lascia intuire, consente di determinare se l'atmosfera è stabile o meno. E' definito con la seguente equazione:

$$s = \frac{g}{T_a} \left(\frac{dT}{dZ} - \left(\frac{dT}{dZ} \right)_{ad} \right) \quad (6.8)$$

Con $\left(\frac{dT}{dZ} \right)_{ad}$ velocità di caduta adiabatica, pari a 0.01 K/m, come già descritto in precedenza.

Se s=0 si è in condizioni di atmosfera neutra, se s>0 l'atmosfera è stabile, mentre il contrario se s<0. In quest'ultimo caso, l'altezza del pennacchio può essere calcolata con la seguente equazione:

$$\Delta H = 1.6 * F^{1/3} * \left(\frac{3.5x_*}{u} \right)^{2/3} \quad (6.9)$$

Con $x_* = 14F^{5/8}$ se F<=55 e

$x_* = 34F^{2/5}$ se F>55.

Infine, si definisce come altezza effettiva del camino, la somma tra l'altezza del camino e quella del pennacchio:

$$H_E = H_{stack} + \Delta H \quad (6.10)$$

6.6. Modello gaussiano di Pasquill-Gifford

Per prevedere la concentrazione di inquinanti emessi nell'atmosfera, StackCalc utilizza il modello gaussiano di dispersione atmosferica di Pasquill-Gifford.

Il modello si basa sull'assunto che la distribuzione della concentrazione dell'inquinante segue una distribuzione gaussiana nello spazio, sia in direzione orizzontale che verticale. Questo implica che la concentrazione di un inquinante si disperde nell'atmosfera seguendo una campana gaussiana, con la massima concentrazione al centro della nube di dispersione (plume) e una diminuzione graduale della concentrazione allontanandosi dal centro.

Il modello verte su alcuni parametri principali:

- **Sorgente puntuale:** Si assume che la sorgente dell'inquinante sia puntuale, come appunto accade per un camino. Tuttavia il modello è valido anche per ogni altra emissione concentrata in un punto specifico.
- **Vento medio:** La dispersione si assume influenzata dalla velocità e direzione del vento, che trasporta l'inquinante lungo la direzione del vento prevalente.
- **Parametri di dispersione:** Questi parametri descrivono la larghezza della nube di dispersione in direzione orizzontale e verticale. Essendo un modello gaussiano, ciò equivale a rappresentarli tramite le deviazioni standard σ_y e σ_z , che variano in funzione della distanza dalla sorgente e delle condizioni atmosferiche.
- **Categorie di stabilità atmosferica:** Come descritto nei paragrafi precedenti, Pasquill ha introdotto una classificazione delle condizioni atmosferiche in sei classi di stabilità (A a F), le quali influenzano σ_y e σ_z .
- **Altezza di rilascio.** L'altezza alla quale l'inquinante è emesso rispetto al suolo è fondamentale per determinare la distribuzione verticale della concentrazione.

6.6.1. Equazione generale del modello

La concentrazione $C(x,y,z)$ a una certa distanza dalla sorgente, può essere espressa dall'equazione:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H_E)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H_E)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (6.11)$$

Dove

- $C(x, y, z)$ è la concentrazione dell'inquinante in funzione delle coordinate x, y, z ;
- Q è la portata in massa di inquinante emesso nel tempo;
- u è la velocità media del vento lungo la direzione x ;
- σ_y e σ_z sono le deviazioni standard in direzione laterale (y) e verticale (z), che descrivono la dispersione della plume;
- $H_E = H_{stack} + \Delta H$ è l'altezza effettiva del camino.

A partire dall'equazione 6.11, è possibile ricavare tutti i casi particolari di interesse. Attualmente, StackCalc permette di calcolare la concentrazione nei punti $C(x, 0, 0)$, i quali corrispondono al profilo di concentrazione a terra in direzione del vento.

6.6.2. Parametri di dispersione

StackCalc calcola i parametri di dispersione σ_y e σ_z in funzione della classe di stabilità di Pasquill considerata, con le seguenti espressioni:

Classe atmosferica	σ_y	σ_z
A	$\sigma_y = \frac{0.22x}{1 + 0.0001x}$	$\sigma_z = 0.2x$
B	$\sigma_y = \frac{0.16x}{1 + 0.0001x}$	$\sigma_z = 0.12x$
C	$\sigma_y = \frac{0.11x}{1 + 0.0001x}$	$\sigma_z = \frac{0.08x}{1 + 0.0002x}$
D	$\sigma_y = \frac{0.08x}{1 + 0.0001x}$	$\sigma_z = \frac{0.06x}{1 + 0.00015x}$
E	$\sigma_y = \frac{0.06x}{1 + 0.0001x}$	$\sigma_z = \frac{0.03x}{1 + 0.0003x}$
F	$\sigma_y = \frac{0.04x}{1 + 0.0001x}$	$\sigma_z = \frac{0.016x}{1 + 0.0001x}$

6.6.3. Limitazioni

Il modello ha le seguenti limitazioni:

- **Condizioni di vento costante.** Il modello assume che la velocità del vento nella direzione considerata sia sempre costante;
- **Assenza di reazioni chimiche.** Il modello non considera reazioni chimiche durante la dispersione degli inquinanti.
- **Terreni pianeggianti.** Il modello implementato in StackCalc non considera la presenza di terreni complessi (presenza di edifici molto alti, montagne o depressioni considerevoli).