

COMMENTI ALLE TRASPARENZE DEL CORSO IMPATTO AMBIENTALE DEI MOTORI AERONAUTICI

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Aeronautica
Facoltà di Ingegneria
Università degli Studi di Roma “La Sapienza”
a.a. 2005/06

D. Lentini¹

1. INTRODUZIONE

1.1 ...

1.2 Le emissioni da parte di un aereo possono classificarsi in emissione chimiche e di rumore. Le emissioni chimiche constano di inquinanti (sostanze che hanno un effetto dannoso) e contaminanti (che non hanno un effetto dannoso diretto, ma possono alterare il clima). Tra i primi annoveriamo gli ossidi di azoto (monossido NO, biossido NO₂, protossido N₂O) indicati complessivamente come NO_x, gli ossidi di zolfo (anidride solforosa SO₂, anidride solforica SO₃) indicati complessivamente come SO_x, il *soot* (particolato), che sono particelle sostanzialmente composte di carbonio (con qualche piccolo contributo di H, ed ancor più piccolo di O) con dimensione dell'ordine del micron, che si generano nella combustione di tutti gli idrocarburi, poi il monossido di carbonio CO e gli idrocarburi incombusti (*UHC*). I contaminanti invece sono l'anidride carbonica e l'acqua (emessa allo stato di gas dai motori). Va osservato che gli aerei incidono solo per il 3,5% circa sui consumi globali di combustibile (questa percentuale è comunque in crescita), tuttavia le loro emissioni possono comunque risultare importanti sotto alcuni aspetti in quanto essi operano in quota (tipico problema, l'impoverimento dello strato d'ozono stratosferico). Per quanto riguarda le emissioni di rumore, queste provengono dai motori (che certamente sono la fonte principale al decollo) ma anche dal velivolo stesso (p. es. dal carrello d'atterraggio, dai flaps; in fase di atterraggio i contributi dovuti ai motori ed al velivolo di un aereo moderno sono approssimativamente uguali).

1.3 Le emissioni sono oggetto di norme dapprima emesse separatamente dalla FAA (*Federal Aviation Agency*) negli USA, che ha stabilito le FAR (*Federal Aviation Regulations*), e dalla JAA

¹Dipartimento di Meccanica e Aeronautica, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Via Eudossiana 18, 00184 Roma RM, tel. 0644585281, fax 06483729, e-mail diego.lentini@uniroma1.it

(*Joint Aviation Authorities*) in Europa, che ha istituito i JAR (*Joint Airworthiness Requirements*). Successivamente le normative sono state unificate a livello mondiale dall'ICAO (*International Civil Aviation Organization*), ed in particolare sono specificate nell'Annex 16 delle relative norme. A queste norme, globalmente valide, possono aggiungersi limitazioni imposte dai singoli aeroporti (p. es. l'aeroporto di Heathrow a Londra ha recentemente imposte norme sul rumore ancora più restrittive di quelle dell'ICAO; questo ha comportato tra l'altro una variazione del progetto delle gondole dei motori dell'Airbus 380, per poter rispettare i nuovi limiti). Le norme sulle emissioni, con il passare degli anni, sono divenute via via più stringenti, ed attualmente stanno diventando l'obiettivo più costrittivo nello sviluppo di nuovi motori e nuovi aerei (situazioni simili si erano in realtà già verificate in passato, quando le norme introdotte sul rumore hanno portato al ritiro dal servizio di aerei come il Boeing 707, il Douglas DC8, il De Havilland Trident, ed il Caravelle della Sud Aviation; ai tempi dell'introduzione in servizio del Concorde, manifestazioni contro il *boom* emesso dai supersonici hanno portato a limitare il servizio di tale aereo a voli sopra l'oceano). L'interesse per la riduzione delle emissioni ha comunque anche un'importante ricaduta economica; per esempio in alcuni aeroporti l'orario di apertura è limitato per evitare disturbo alla popolazione circostante nelle ore notturne. Aerei più silenziosi permetterebbero p. es. di anticipare di un'ora l'orario di apertura dell'aeroporto, e di posticiparne la chiusura di un'ora, sì che p. es. un aereo potrebbe effettuare un volo in più al giorno, con evidente maggior ritorno economico. Inoltre, alcuni aeroporti applicano tasse di atterraggio più alte per velivoli rumorosi; simili provvedimenti sono stati presi da Svizzera e Svezia in relazione alle emissioni di NO_x e UHC.

1.4 Come esempio di normativa stabilita dall'ICAO, consideriamo quella relativa alle emissioni di rumore. Vengono definiti alcuni punti standard per la misurazione del rumore emesso dall'aereo all'atterraggio (in questo caso si considera un punto 2 chilometri a monte dell'inizio della pista) ed al decollo (si considera un punto 6,5 chilometri a valle dell'inizio della pista); si considera inoltre un punto di misura laterale alla pista, ad una distanza di 450 m dal suo asse. Le norme stabiliscono che, per aerei di massa al decollo inferiore a 34000 kg, il rumore al decollo non possa superare i 98 dB, in fase di atterraggio i 102 dB; anche per la posizione laterale si fissa un limite di 102 dB. Per aerei di massa al decollo superiore ai 272000 kg, il limite è fissato a 108 dB per tutte e tre le condizioni. Per aerei di massa al decollo compresa tra i 34000 ed i 272000 kg, si procede ad una interpolazione lineare per individuare il limite di rumore. La motivazione che giustifica la concessione di limiti più alti ad aerei di massa maggiore è che tali aerei trasportano un numero maggiore di passeggeri (od un carico più alto), e quindi consentono di effettuare un numero minore di voli.

1.5 Le emissioni, sia di inquinanti che di rumore, degli aerei si sono grandemente ridotte con il passare degli anni. La figura riporta la riduzione del consumo specifico in funzione della data di certificazione; il riferimento iniziale è il primo aereo da trasporto civile a getto, il de Havilland Comet, entrato in servizio nel 1952 (per quanto qui venga considerata la versione Comet IV, entrata in servizio successivamente dopo che una serie di incidenti avevano portato al ritiro dal servizio di questo aereo). Si può vedere che il consumo specifico dei motori (*TSFC*, consumo per unità di spinta) si è ridotto di circa il 40% rispetto ai primi aerei, e continua tendenzialmente a ridursi. Se però si considera il consumo per passeggero-km, si può vedere che il miglioramento è stato alquanto

più sensibile, prossimo al 70%; questo è dovuto evidentemente al fatto che, grazie a miglioramenti nell'aerodinamica, nei materiali e nelle strutture (con conseguente riduzione di peso), si è ridotta la spinta richiesta. È ovvio che a questa riduzione di consumi corrisponde anche una riduzione delle quantità di inquinanti emesse.

1.6 Anche le emissioni di rumore si sono grandemente ridotte, in particolare per l'effetto dell'introduzione del turbofan, che grazie alla minore velocità di uscita del getto risulta molto meno rumoroso. La recente introduzione di turbofan ad alto rapporto di *by-pass* ha ulteriormente migliorato la situazione.

1.7 L'ACARE (*Advisory Council for Aerospace Research in Europe*) ha recentemente pubblicato un documento che impegna a conseguire obiettivi molto ambiziosi entro il 2020. Tra questi, i primi quattro prevedono una riduzione delle emissioni di CO₂ del 50% (quindi sostanzialmente una pari riduzione dei consumi, essendo la CO₂ una dei due prodotti di combustione degli idrocarburi, l'altro essendo l'H₂O), una riduzione delle emissioni di NO_x dell'80%, poi una riduzione a metà del rumore emesso, e la sua totale eliminazione al di fuori degli aeroporti.

1.8 Obiettivi così impegnativi di riduzione delle emissioni richiedono uno sforzo di ricerca e sviluppo (*Research & Development*) multidisciplinare. Per esempio, si pensa di poter arrivare a ridurre del 50% le emissioni di CO₂ diminuendo di circa il 20% il consumo specifico dei motori, poi migliorando l'aerodinamica dei velivoli (migliorandone l'efficienza aerodinamica), ed infine attraverso una migliore gestione del traffico aereo (p. es., definendo aerovie cosiddette quadridimensionali, cioè i cui confini si spostano al variare delle condizioni meteo nel tempo, in modo che l'aereo possa sempre seguire la rotta che assicura il minor consumo, per effetto della temperatura ambiente e dei venti). Un contributo potrà venire anche dalla riduzione della massa dell'aereo (a parità di carico utile) per effetto di sviluppi nei campi dei materiali e delle strutture, riducendo così la spinta richiesta. È chiaro che un simile sforzo multidisciplinare richiede alle aziende produttrici di motori e di aerei un enorme impegno in termini economici, fattore che ha portato alla progressiva riduzione del numero di soggetti sul mercato (sostanzialmente solo due, Boeing e Airbus, per aerei a lungo raggio, e tre/quattro per i motori, General Electric, Rolls Royce, Pratt & Whitney, CFM – partnership tra GE e Snecma). Per quanto la riduzione del 50% delle emissioni di CO₂ appaia come un obiettivo soddisfacente, bisogna però osservare che si prevede che il volume del traffico aereo triplicherà entro il 2020, per cui in realtà le emissioni globali di CO₂ dagli aerei aumenteranno.

1.9 Mentre risulta relativamente facile conseguire i *singoli* obiettivi di riduzione delle emissioni, occorre osservare che il problema è che questi vanno conseguiti *tutti* simultaneamente. Si pone quindi un problema di ottimizzazione, che va inserito in quadro più ampio di ottimizzazione del disegno dell'aereo e dei motori. Questa ottimizzazione però non si presenta semplice. In primo luogo, sussistono incertezze su *cosa* ottimizzare: si può per esempio pensare di cercare di ottimizzare i DOC (*Direct Operating Costs*, costi operativi diretti, cioè sostanzialmente il costo per passeggero-km, legato evidentemente a consumo, costo dell'aereo, numero dei membri dell'equipaggio e loro stipendi, etc.), oppure di massimizzare il ritorno sull'investimento. Ambedue gli obiettivi sono poi strettamente legati ad un fattore molto aleatorio, come l'andamento del prezzo del combustibile durante i 15 – 20 anni di vita operativa dell'aereo. L'ottimizzazione del progetto dell'aereo deve

poi rispettare numerosissimi vincoli (p. es., funzionamento in caso di avaria ad un motore, etc.), per cui più propriamente si può parlare di un'ottimizzazione con vincoli; il numero di vincoli può essere talmente elevato da avvicinarsi o addirittura superare il numero delle variabili di progetto. Anche le norme sulle emissioni possono essere considerate come un vincolo, occorre tuttavia notare che può non essere conveniente semplicemente limitarsi a soddisfare strettamente i requisiti imposti dalle norme sulle emissioni. Per esempio, può essere conveniente progettare un aereo in modo che risulti ancora meno rumoroso di quanto imposto dalle norme, in modo da permettergli di operare in orari notturni (negli aeroporti dove vigono simili restrizioni), o comunque di non essere posto fuori mercato dalla possibile futura imposizione di norme ancora più restrittive.

1.10 La figura mostra indicativamente come si potrebbero conseguire *singoli* obiettivi di progetto.

1.11 Si potrebbe pensare di utilizzare configurazioni non convenzionali per conseguire gli obiettivi di riduzione delle emissioni. La configurazione *Over Wing Nacelle* presenta motori montati al di sopra delle ali, con l'obiettivo di ridurre il rumore percepito al suolo, il quale viene appunto schermato dalle ali. Questa configurazione però presenta i suoi inconvenienti: la manutenzione dei motori potrebbe risultare meno facile (ma forse questo punto non è poi dirimente, in quanto alcuni aerei trigetto presentano motori montati addirittura sopra la fusoliera, ed hanno avuto un vasto successo), e soprattutto il rumore percepito dai passeggeri sarebbe più intenso. La configurazione *Rear Fuselage Nacelle* consentirebbe di superare quest'ultimo inconveniente, pur mantenendo il rumore emesso dai motori schermato dai piani di coda. Tuttavia, montare i motori in coda anziché sulle ali comporta un incremento di peso delle ali stesse, poiché in volo (che è la condizione alla quale corrispondono i massimi sforzi nelle ali, in quanto esse devono sostenere tutto il peso dell'aereo) la presenza dei motori montati sulle ali contribuisce a diminuire il momento flettente che queste devono sopportare. Inoltre, la struttura della coda dell'aereo va rinforzata per poter ospitare i motori; naturalmente c'è anche un miglioramento dell'aerodinamica dell'ala, ma va anche valutata l'interazione aerodinamica tra i motori e la fusoliera.

1.12 Si può addirittura pensare a configurazioni ancora meno convenzionali, come quella qui illustrata, in cui l'apertura alare è suddivisa in tre adottando una doppia fusoliera. Poiché lo sforzo di flessione sopportato da un trave è proporzionale al quadrato della sua lunghezza, spezzare in tre parti l'ala (anziché in due) consentirebbe di avere una struttura meno sollecitata e perciò più leggera, con conseguente riduzione della spinta richiesta, e delle conseguenti emissioni di inquinanti e di rumore, nonché ovviamente del consumo. Per contro, questa configurazione comporta un qualche aumento della resistenza aerodinamica (perché aumenta la superficie bagnata), e soprattutto incertezze sulla resistenza a torsione del troncone di ala centrale per effetto di moti di beccheggio delle due fusoliere non in fase tra loro; anche l'atterraggio con un motore fuori uso, quindi con un certo angolo di imbardata, porrebbe problemi ai piloti (per scarsa visibilità, se essi si trovano nella fusoliera che per effetto dell'imbardata resta indietro).

1.13 Lo sviluppo di un aereo comporta elevatissimi investimenti iniziali; solo dopo parecchi anni dall'inizio del progetto l'azienda costruttrice comincia a ricevere denaro per opzioni di acquisto degli aerei (cioè per riservarsi un posto nella tabella di produzione dell'aereo), e poi, in maniera più

consistente, quando gli aerei cominciano ad essere venduti. Quindi l'azienda va in pari solo dopo circa otto anni dall'inizio del progetto, dopodiché esso comincia ad essere remunerativo, ma questo dipende dal numero di aerei venduti. L'investimento iniziale può essere elevatissimo (10,5 G\$ per l'Airbus 380), e i tempi di sviluppo ancora più lunghi di quelli citati (il progetto dell'Airbus 380 è iniziato nel 1995, e si prevede che entrerà in servizio nel 2006), e questo induce a cercare di ridurre al massimo i rischi insiti nel progetto, cioè gli elementi diciamo 'rivoluzionari' che potrebbero comportare costi di sviluppo non prevedibili, od un rifiuto all'acquisto da parte delle compagnie aeree. La situazione è ovviamente diversa per lo sviluppo di aerei militari, dove chi paga sono i governi, per cui il rischio è minimo.

1.14 In conclusione, la configurazione generale degli aerei civili attuali non si discosta granché da quella dei primi aerei di linea a getto, come il Boeing 707 (primo volo nel 1958, entrata in servizio nel 1959), anche se a guardare bene sono state introdotte diversi accorgimenti i quali, pur non rivoluzionari, hanno consentito di ottenere migliori prestazioni (ad esempio, un ala più allungata, che risulta in un'efficienza aerodinamica più elevata).

1.15 ...

2. INQUINANTI E CONTAMINANTI

2.1 L'inquinamento può rappresentare un problema a livello locale (p. es. le emissioni da autoveicoli in una città, o da un impianto industriale nell'area circostante), oppure a livello globale (intero pianeta) come riscaldamento globale (effetto serra) e distruzione dello strato d'ozono stratosferico. Le piogge acide sono caratterizzate da una scala intermedia (regionale). Chiamiamo inquinanti le emissioni che danno effetto negativo diretto o indiretto (quest'ultimo per trasformazioni chimiche di inquinanti primari emessi direttamente in atmosfera, che danno luogo ad inquinanti cosiddetti secondari), mentre chiamiamo contaminanti specie chimiche che non hanno effetto sulla salute, ma possono alterare il clima, come CO_2 .

2.2 Le fonti di emissione immettono inquinanti nell'atmosfera, dove essi subiscono processi di trasporto, diluizione ed eventuali reazioni secondarie; essi possono anche essere parzialmente rimossi da meccanismi naturali. In ultimo, gli inquinanti raggiungono i recettori (uomini, piante, animali) sui quali esercitano i loro effetti nocivi, come pure su clima, ozono, piogge acide.

2.3 Per una miscela gassosa, la concentrazione di una specie chimica (denotata dall'indice i) è normalmente espressa come frazione molare (rapporto tra il numero di moli della specie i contenute in un dato volume, ed il numero totale di moli entro tale volume). Per la legge di stato dei gas perfetti si può vedere che X_i coincide con il rapporto tra il volume ipotetico V_i che la specie i occuperebbe se si trovasse da sola alla pressione e temperatura date, ed il volume V [basta dividere membro a membro le relazioni $pV_i = n_i R^0 T$ e $pV = n R^0 T$, essendo $R^0 = 8314 \text{ J}/(\text{kmol K})$ la costante universale dei

gas]. La massa molare (nome che adesso si usa di preferenza rispetto al vecchio appellativo di peso molecolare) di una miscela gassosa si ottiene considerando che una mole di miscela contiene X_i moli della specie i di massa molare \mathcal{M}_i , di massa perciò $X_i \mathcal{M}_i$, e sommando quindi su tutte le N specie chimiche che compongono la miscela. Si definisce invece frazione di massa Y_i della specie i il rapporto tra la massa della specie i contenuta in un dato volume, e la massa totale di miscela nel volume. Per ottenere le frazioni di massa conoscendo le frazioni molarie, si osserva che in una mole di miscela (di massa \mathcal{M}) la massa della specie i è $X_i \mathcal{M}_i$. Talvolta la concentrazione di un inquinante (gassoso, liquido o solido) in atmosfera viene espresso in termini di massa dell'inquinante per unità di volume di miscela (p. es., in $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Per miscele liquide o solide, la concentrazione è invece sempre data in massa.

2.4 Le emissioni per unità di combustibile bruciato sono quantificate dall'indice di emissione (*Emission Index*), p. es. per NO_x , SO_x , CO, UHC (Unburned HydroCarbons – idrocarburi incombusti). Per autoveicoli, si adotta un indice di emissione per unità di percorrenza, misurato quindi p. es. in g/km ; per aerei, si adotta p. es. un indice in termini di kg di NO_x emesso per ciclo di atterraggio e decollo (*Landing /Take-Off*).

2.5 Utilizziamo unità del sistema SI. Per la temperatura, facciamo in genere (sempre nelle formule) riferimento alla temperatura assoluta, misurata a partire dallo zero assoluto ($-273,15$ C). Riportiamo i fattori di conversione per altre unità ancora in uso. Per l'unità molare si adotta la chilomole (kmol), per cui la massa molare \mathcal{M} si esprime in kg/kmol (che coincide evidentemente con g/mol).

2.6 Gli inquinanti che destano maggiore preoccupazione sono il particolato (particelle solide o liquide, di vari diametri, ma comunque valutabili in μm ; possono essere particelle primarie – emesse direttamente dall'impianto, oppure secondarie, risultato di successive reazioni in atmosfera), i composti organici volatili (*Volatile Organic Compounds*) e gli idrocarburi incombusti (i quali promuovono la formazione di particolato secondario, ozono e smog; possono anche essere tossici), l'ozono (che a livello del suolo è un irritante), gli ossidi di azoto (irritanti, causa di piogge acide, agenti di serra e distruttori dello strato di ozono stratosferico), gli ossidi di zolfo (irritanti, causa di piogge acide), il monossido di carbonio (tossico), l'anidride carbonica (in effetti un contaminante, gas di serra), il metano (gas di serra). Anche il vapore acqueo è un gas di serra, ma in realtà le attività umane influenzano ben poco il suo bilancio globale. Altri inquinanti derivano dalle benzine (contenenti tetraetilato di piombo come antidetonante, adottato nei motori di non più recente concezione).

2.7.1 ...

2.7.2 Gli effetti sull'uomo sono valutati mediante studi epidemiologici (che correlano aumenti di mortalità con la concentrazione di inquinante, vedi oltre), studi su animali (che possono essere sottoposti a forti dosi, ma la cui risposta può non essere la stessa dell'uomo), esperimenti su volontari (in tal caso bisogna limitarsi ad indurre effetti reversibili), nonché colture di cellule. In alcuni casi si riscontra la presenza di una soglia (cioè l'inquinante non risulta dannoso al disotto di una certa concentrazione), mentre in altri si trova comunque un effetto per quanto piccola sia la concentrazione; spesso l'esistenza o meno di una soglia risulta difficile da accertare.

2.7.3 Un importante effetto sulla microfauna/flora marina (plancton) può aversi per effetto dell'irraggiamento

ultravioletto, a causa del ridotto filtraggio dovuto alla diminuzione della concentrazione di ozono stratosferico.

2.7.4 Alcune specie risultano particolarmente sensibili. In generale, l'effetto dipende dalla *dose* (prodotto della concentrazione per la durata dell'esposizione).

2.7.5 L'ozono troposferico induce fessurazione dei pneumatici, mentre la SO_2 (che si ossida a SO_3 e poi si trasforma in acido solforico a contatto con l'umidità atmosferica) è corrosiva (un pannello di metallo perde progressivamente peso per effetto della corrosione e successiva asportazione del materiale).

2.7.6 Le particelle di diametro prossimo alle lunghezze d'onda della luce (λ da 0,4 a 0,7 μm circa) diffondono la luce visibile, per cui per esempio la luce di un faro apparirà circondata da un alone, oppure un oggetto distante risulterà appannato. Gli ossidi di zolfo ed azoto, in contatto con l'umidità atmosferica, danno acidi solforici e nitrici, corrosivi e, quando cadono al suolo sotto forma di piogge, dannosi per le piante. Le specie CO_2 , CH_4 , N_2O ed altre contribuiscono all'effetto serra, mentre gli ossidi di azoto contribuiscono alla distruzione dell'ozono stratosferico (per quanti i maggiori responsabili siano i CFC – clorofluorocarburi, ora banditi – utilizzati in passato nelle macchine frigorifere, nei condizionatori, nelle bombole spray).

2.7.7 Vediamo ora l'effetto dei singoli inquinanti. Le particelle di piccolo diametro possono essere respirate in profondità nei polmoni e causare danni. A Londra, nel 1952, si verificò una particolare situazione meteorologica per cui si ebbe una forte concentrazione di particolato per diversi giorni, alla quale fece seguito un forte incremento nel numero di morti giornaliere (tipico esempio di studio epidemiologico). Si ha anche un effetto sulla visibilità.

2.7.8 Gli ossidi di zolfo sono responsabili per circa 2/3 delle piogge acide, sono irritanti (si trasformano in acido solforico a contatto con l'umidità nei polmoni), danneggiano le piante, portano alla formazione di particolato secondario. Tuttavia, la SO_2 aumenta la riflettività delle nubi, riducendo quindi la quantità di energia che colpisce la Terra, contrastando perciò in qualche misura l'effetto serra.

2.7.9 Gli ossidi di azoto sono l'altro principale contribuente alle piogge acide, sono irritanti respiratori, promuovono la formazione di ozono troposferico (irritante dei polmoni e degli occhi) e di particolato secondario, promuovono la distruzione dell'ozono stratosferico, ed il protossido d'azoto N_2O è un gas di serra.

2.7.10 Il monossido di carbonio, nonostante la bassissima concentrazione atmosferica di fondo (cioè misurata lontano da fonti di inquinamento), porta a concentrazioni di carbossiemoglobina (incapace di trasportare ossigeno, a differenza dell'emoglobina) nel sangue non trascurabili. La tabella riporta gli effetti sulla salute del monossido di carbonio, espressi in termini di percentuale di emoglobina (Hb) convertita a carbossiemoglobina (COHb). La concentrazione di CO è più alta nell'emisfero nord, ove si hanno la maggior parte delle emissioni, a causa della vita media relativamente breve (intorno a 0,2 anni, per cui questo composto viene in gran parte distrutto da processi naturali prima che la sua concentrazione possa essere diventata uniforme in tutta l'atmosfera). La concentrazione

in città ed in ambienti chiusi può essere maggiore e perciò risultare pericolosa.

2.7.11 Se la concentrazione di equilibrio X_{eq} di una specie chimica nell'atmosfera viene alterata fino ad un valore X^* , essa tende a ritornare al valore originario con una vita media τ , essendo la variazione di concentrazione dX , dovuta ai meccanismi naturali, proporzionale allo scostamento, con segno cambiato, ed all'intervallo di tempo considerato, per cui $d(X - X_{eq}) \propto -(X - X_{eq})dt = -(X - X_{eq}) dt/\tau$ (avendo indicato con $1/\tau$ la costante di proporzionalità), quindi dopo un tempo t la concentrazione $X(t)$ è data dalla $[X(t) - X_{eq}] = [X^* - X_{eq}] \exp(-t/\tau)$. Dopo un tempo τ , lo scostamento della concentrazione dal valore di equilibrio si è quindi ridotta ad $1/e$ del valore originario (essendo e il numero di Nepero). La tabella indica anche la frazione della variazione di concentrazione di una specie chimica nell'atmosfera che è da attribuirsi alla combustione.

2.8 La concentrazione di molte specie inquinanti è fortemente cresciuta dagli inizi dell'era industriale, e nella maggior parte dei casi continua a crescere. Per il metano il contributo della combustione è tuttavia piuttosto ridotto, essendo la maggior parte dell'incremento dovuto a fonti biologiche (agricoltura, allevamento).

2.9 Per gli effetti locali degli inquinanti, assumono ovviamente importanza i fattori che contribuiscono alla loro dispersione atmosferica.

2.10.1 I principali gas che contribuiscono all'effetto serra, o agenti di serra, sono l'anidride carbonica (che contribuisce circa per il 60%), il metano, il protossido d'azoto, l'acqua (sotto forma di vapore o gas). Questi provocano il riscaldamento globale del pianeta con conseguenti effetti negativi, tra i quali annoveriamo: la distruzione di ecosistemi particolarmente sensibili alla temperatura, con associata riduzione della biodiversità; l'estensione dei deserti; una maggiore frequenza di eventi meteorologici estremi; lo scioglimento delle calotte polari (si osservi tra l'altro che l'aumento di temperatura sarà più sensibile ai poli che all'equatore) e dei ghiacciai; il conseguente aumento del livello del mare, che porterà alla perdita di fasce di terra costiere; la possibile alterazione della corrente del Golfo (il cui cammino verso il nord Europa potrebbe essere ostacolato dalla corrente d'acqua verso sud generata dallo scioglimento della calotta artica), e di altri fenomeni climatici per l'alterazione del riscaldamento degli oceani. La figura mostra la correlazione tra la crescita della concentrazione di CO_2 e l'aumento della temperatura media terrestre.

2.10.2 La distribuzione del numero dei giorni in funzione della temperatura, per una data località, è tipicamente data da una gaussiana. Si può vedere per esempio che la probabilità di avere condizioni di temperatura molto elevata risulta molto limitata, poiché tale eventualità corrisponde alla coda (destra) della distribuzione. Se però per effetto di un sia pur piccolo aumento della temperatura media la gaussiana si sposta verso destra, allora la probabilità di giornate a temperatura molto elevata aumenta grandemente. Inoltre, l'aumentata temperatura porta ad una maggiore evaporazione, e quindi a piogge più abbondanti.

2.10.3 Pur essendo l' H_2O un potente gas di serra, l'impatto delle attività umane sulla sua concentrazione a livello globale risulta trascurabile in virtù della grande quantità presente nell'atmosfera (la sua concentrazione, pur estremamente variabile, può arrivare sino a pochi percento, contro lo 0,037% della CO_2). Tuttavia, l'acqua emessa dai motori degli aerei sotto forma di gas ad alta quota condensa

ben presto e forma cristalli di ghiaccio, dando luogo alle scie di condensazione (*condensation trails*, o *contrails*), che quali bloccano parte della radiazione ultravioletta, la quale invece serve ad attivare la reazione che porta alla formazione di ozono stratosferico.

2.10.4 Ogni corpo emette radiazione elettromagnetica su uno spettro di lunghezze d'onda (o frequenze, essendo λ e ν legate dalla relazione $\lambda = c/\nu$, dove c è la velocità di propagazione della luce). Per un radiatore ideale (corpo nero, al quale possiamo in prima approssimazione assimilare un generico corpo) la lunghezza d'onda alla quale si ha la massima emissione di radiazione è data dalla legge di Wien. Essendo la temperatura superficiale del Sole intorno ai 6000 K, esso irradia su uno spettro che ha un massimo in corrispondenza della luce visibile (che abbiamo detto ha λ tra i 0,4 ed i 0,7 μm), mentre la Terra irradia anch'essa, ma a causa della sua temperatura superficiale mediamente identificabile come 288 K (15 C), la massima emissione si verifica nel campo dell'infrarosso. Il bilancio energetico globale della Terra dipende dalla trasparenza o meno dell'atmosfera alla radiazione di queste diverse lunghezze d'onda.

2.10.5 La figura in basso riporta lo spettro di emissione del Sole e della Terra in funzione della lunghezza d'onda della radiazione (nota: le scale verticali utilizzate per la radiazione del Sole e della Terra sono diverse, essendo in realtà la potenza irradiata dal Sole enormemente più grande di quella irradiata dalla Terra). La figura in alto riporta invece, sempre in funzione della lunghezza d'onda, il coefficiente di assorbimento della radiazione per diversi gas presenti nell'atmosfera (il valore zero significa che il gas è perfettamente trasparente, il valore uno che esso assorbe completamente la radiazione), nonché il coefficiente di assorbimento complessivo dell'aria atmosferica. Si vede innanzitutto che O_2 ed in particolare O_3 assorbono tutta la radiazione ultravioletta di lunghezza d'onda inferiore a circa 0,3 μm , mentre la CO_2 assorbe tutta la radiazione infrarossa oltre i 15 μm circa. Nell'intervallo tra 0,3 e 15 μm si notano picchi di assorbimento nell'infrarosso di CH_4 , N_2O , O_2 , CO_2 stessa ed H_2O . Resta completamente aperto l'intervallo corrispondente alla luce visibile (quindi in particolare la parte più importante della radiazione emessa dal Sole), mentre la radiazione infrarossa emessa dalla Terra può essere irraggiata verso lo spazio solo in corrispondenza ad alcune 'finestre', delle quali le più importanti si trovano tra gli 8 ed i 12 μm . Vediamo quindi che mentre buona parte della radiazione del Sole riesce ad arrivare fino alla superficie terrestre, solo una parte della radiazione irradiata dalla Terra riesce a sfuggire attraverso l'atmosfera, essendo la parte restante assorbita dai 'gas di serra' CH_4 , N_2O , CO_2 ed H_2O . Ciò fa sì che la temperatura terrestre sia più alta di quanto non sarebbe in assenza di atmosfera (si può calcolare che in tal caso la temperatura media della Terra sarebbe di 5 C = 278 K). Le emissioni di gas di serra derivanti da attività umane aumentano la concentrazione di queste specie nell'atmosfera, diminuendo quindi ulteriormente la quantità di energia irradiata dalla Terra che riesce a sfuggire verso lo spazio, ed elevando in tal modo la temperatura della Terra.

2.10.6 La figura riporta molto schematicamente le principali interazioni nel processo di riscaldamento globale della Terra. Si può vedere che una parte della radiazione solare incidente sulla Terra viene riflessa nello spazio a causa dell'albedo (potere riflettente) della Terra stessa, che a sua volta circa il 15% della radiazione infrarossa (IR) emessa dalla Terra viene riflessa dall'atmosfera sulla Terra stessa, che l'aumento della temperatura degli oceani causa da un lato una maggiore evaporazione e quindi formazione di nubi, aumentando l'albedo ma assorbendo ulteriormente la radiazione infrarossa,

dall'altra lo scoglimento delle calotte polari e dei ghiacciai, diminuendo l'albedo, etc. Le attività umane intevengono nel bilancio perché contribuiscono a chiudere la finestra infrarossa.

2.10.7 Il principale gas di serra è il vapore acqueo, che si ritiene contribuisca per circa il 65% ad impedire la fuoriuscita della radiazione infrarossa. Tuttavia, la quantità di vapore acqueo nell'atmosfera derivante da processi naturali è talmente grande in confronto a quella derivante da attività umane (e dalla combustione di idrocarburi in particolare) che quest'ultime hanno un ben piccolo impatto sulla sua concentrazione atmosferica. Ci limitiamo perciò a considerare i contributi dei rimanenti gas di serra, sui quali le attività umane hanno un consistente effetto diretto. Si vede che il maggior contribuente è l'anidride carbonica CO_2 ; tra gli altri prodotti di combustione, ha una certa importanza il protossido d'azoto N_2O . Degli altri gas di serra, i CFC (clorofluorocarburi) sono (o meglio, erano, essendo stati banditi dal protocollo di Montreal) utilizzati per macchine frigorifere e come propellenti di bombole spray, mentre le emissioni di metano, pur essendo per oltre il 75% ascrivibili ad attività umane, in realtà derivano solo per il 20% dalla combustione, mentre per il 17% dai ruminanti, 12% da coltivazioni di riso, 8% da combustione di biomasse, 8% da discariche, etc.

2.10.8 La figura illustra i principali flussi di carbonio nell'ambiente; si noti il peso delle attività umane (combustione e deforestazione). Attenzione: il dato sulle emissioni dovute alla combustione è errato. Infatti, ogni anno si bruciano globalmente quasi 4 Gt (miliardi di tonnellate) di carbone (composto per circa l'80% di carbonio) e quasi una 1 Gt di lignite (circa il 55%), 3,5 Gt di petrolio (composto per circa l'85% di carbonio), e quasi 2 Gt di gas naturale (circa il 70% di carbonio), per cui il flusso di carbonio nell'atmosfera risulta essere in realtà intorno alle 7 – 8 Gt/anno (non 1,5 come indicato). Altri contributi derivano dalla legna utilizzata come combustibile. Risulta quindi che i flussi in entrata nell'atmosfera sono superiori a quelli che ne escono, e danno di conseguenza luogo ad un progressivo aumento della concentrazione atmosferica di CO_2 .

2.10.9 L'efficacia di una specie chimica gassosa come gas di serra è quantificata attraverso il GWP, che esprime il rapporto tra l'effetto del gas in questione e quello della CO_2 , assunta come riferimento. In realtà il GWP dipende anche dall'orizzonte temporale considerato, per cui si può individuare un GWP a 20 anni, 100 anni, 500 anni. Si vede dalla tabella che alcune specie, che pure sono presenti nell'atmosfera in concentrazioni estremamente basse, hanno però una loro importanza come gas di serra a causa del loro elevato GWP. La tabella indica anche, per alcune specie, il tasso annuo di incremento della concentrazione atmosferica (per i CFC è nullo perché sostanzialmente non se ne producono più; la loro lunga vita media rende tuttavia il loro tasso di decadimento molto basso).

2.11.1 Mentre a quote basse (troposfera) l'ozono è un inquinante, a quote alte (stratosfera) risulta prezioso per bloccare la radiazione solare ultravioletta (UV), essendo l'unico gas in grado di assorbire la radiazione con $\lambda < 0,28 \mu\text{m}$, vedi 2.10.5. Questa radiazione, se raggiungesse la superficie terrestre, causerebbe tumori alla pelle, danni alle colture ed ucciderebbe il plancton. Alcuni gas come i CFC e gli ossidi di azoto sono in grado di distruggere le molecole di ozono stratosferico.

2.11.2 Lo strato d'ozono stratosferico si forma per effetto dell'irraggiamento UV con $0,18 < \lambda < 0,23 \mu\text{m}$. Poiché a sua volta l'ozono assorbe radiazione UV, questo processo è inibito negli strati sottostanti dell'atmosfera, per cui si osserva un picco nella concentrazione di O_3 intorno ai 25 km di quota. La

figura riporta la concentrazione molecolare di ozono (espressa cioè in numero di molecole per unità di volume) al variare dell'altezza, ad una latitudine media, evidenziando gli andamenti tipici estivo ed invernale (al primo corrisponde una maggiore concentrazione di ozono per il maggiore irraggiamento per unità di superficie terrestre).

2.11.3 I gas che distruggono l'ozono sono specie chimiche di lunga vita media (cioè sostanzialmente inerti), che hanno quindi la possibilità di diffondere dal livello del suolo, ove sono emessi, fino alla stratosfera, attraverso lenti processi di diffusione molecolare (la diffusione turbolenta non è efficace oltre la cosiddetta altezza di miscelamento, che può variare dai 200 ai 4000 m). Si tratta di CFC ed N_2O . A questi si aggiungono specie che sono invece direttamente immesse nella stratosfera dalla combustione nei motori degli aerei, in particolare gli ossidi di azoto, tra questi anche il monossido d'azoto NO , pur di vita media relativamente breve (in questo caso la vita media non risulta influente perché emesso direttamente nella stratosfera).

2.11.4 I CFC sono estremamente efficaci nel distruggere l'ozono, perché nelle due reazioni successive indicate non si ha consumo dell'atomo di cloro, per cui il processo può ripetersi finché un qualche altro diverso processo non lo cattura. I CFC sono stati sostituiti da cloridrofluorocarburi, nei quali la presenza dell'atomo di idrogeno contribuisce a diminuirne la vita media nell'atmosfera, per cui essi vengono distrutti da processi naturali prima di avere il tempo di diffondere fino alla stratosfera.

2.11.5 I motori a getto degli aerei emettono ossidi di azoto, i quali sono anch'essi efficaci nel distruggere l'ozono, p. es. attraverso la reazione indicata. Tuttavia, una molecola di monossido di azoto distrugge una singola molecola di ozono, per cui essi sono molto meno efficaci dei CFC come ODG. Va detto però che, mentre per i CFC sono state prese iniziative, è difficile al momento individuare una strategia per ridurre sostanzialmente le emissioni di NO_x dai motori degli aerei.

3. CAMERE DI COMBUSTIONE

3.1.1 Sono indicati i principali vincoli sul progetto di una camera di combustione. Si noti che ogni peso in più comporta un associato aumento del peso al decollo ben più alto, per via dell'aumentato peso delle strutture e dell'aumento della quantità di combustibile da stivare a bordo. Una caduta di pressione troppo alta in camera di combustione comporta poi un ridotto salto entalpico sfruttabile. Per quanto riguarda i desiderata, si osservi che gli obiettivi devono essere conseguiti su tutto il campo operativo dell'aereo, che comprende quindi portate di combustibile che possono variare di un fattore 1:50, etc. Di particolare importanza l'uniformità della temperatura di uscita dalla camera (in quanto va ad investire le palette della turbina). Ad alta quota, durante il funzionamento del motore può verificarsi un *flameout* (fuoriuscita della fiamma dal combustore), dopo il quale il motore deve essere in grado di riaccendersi. La tendenza ad aumentare il rapporto di compressione globale del motore e la temperatura di ammissione in turbina rende questi obiettivi più difficili da conseguire (eccetto la riaccensione, che è favorita da un aumento di T_4).

3.1.2 Si potrebbe pensare (a) di iniettare il combustibile nell'aria così come essa arriva dal compressore, ma poiché questa ha una velocità assiale di circa 150 m/s (altrimenti per smaltire la portata d'aria occorrerebbero sezioni di passaggio del compressore molto grandi, quindi pale lunghe, con conseguente maggior diametro del motore, ossia maggiore resistenza aerodinamica, e peso, e maggiori sforzi sulle palette per forza centrifuga), ciò porterebbe a cadute di pressione (proporzionali al quadrato del numero di Mach del flusso) molto elevate. Occorre quindi rallentare il flusso che arriva dal compressore mediante un diffusore (b), cioè un condotto divergente che riduce la velocità intorno ai 30 m/s; all'uscita del combustore va poi posto un condotto convergente per riportare la velocità ai valori elevati richiesti dalla turbina (per motivazioni analoghe a quelle elencate per il compressore). Il combustibile tuttavia deve poter restare in contatto con l'aria entro la camera per un certo tempo, per poter completare i vari processi (riduzione in goccioline, evaporazione, miscelamento, accensione, combustione completa) richiesti. Occorre allora allungare i tempi di permanenza entro la camera introducendo una ricircolazione del flusso (c), generata p. es. a valle di un *bluff body* (corpo non aerodinamico), oppure mediante *swirl* (moto elicoidale). Tuttavia, poiché per limitare la temperatura a valori accettabili della turbina occorre limitare il valore globale del fattore di diluizione $f = \dot{m}_f/\dot{m}_a$ a valori al di sotto del 2%, concentrazione al di fuori dei limiti di infiammabilità, vedi 3.2.4, si rende necessario dividere il flusso d'aria in ingresso nella camera in modo tale da formare (d) una zona primaria ove la combustione è circa stechiometrica, e diluire successivamente i prodotti caldi di combustione con l'aria rimanente.

3.1.3 Per sottolineare l'importanza di contenere le dimensioni della camera di combustione, osserviamo che un aumento della sua lunghezza comporta un parallelo aumento della massa di altri componenti, nonché aumento della resistenza aerodinamica esterna.

3.1.4 Sviluppiamo come esempio un elementare calcolo sull'aumento di massa dell'albero del motore (supposto pieno, di materiale di densità δ). Facciamo per semplicità riferimento ad un turbogetto ideale a punto fisso, caratterizzato da un rapporto di compressione β_c (con $\tau_c = \beta^{(\gamma-1)/\gamma}$) e da un rapporto $\tau = T_4/T_a$. Assumendo una spinta di circa 500 kN (valore corrispondente ai turbogetti più potenti finora sviluppati) ed una velocità di rotazione di 1000 rad/s (poco meno di 10000 giri al minuto), si trova che la coppia che l'albero deve trasmettere è indicativamente di tre ordini di grandezza superiore a quello dell'albero motore di un'auto media. Questo fa intuire quale incremento di pesi comporti un allungamento di tale albero. Comunque, il dimensionamento dell'asse deve anche tener conto, oltre che dei carichi torsionali, di quelli a flessione e dei problemi in termini di vibrazioni.

3.1.5 I primi turbogetti utilizzavano da 7 a 16 camere di combustione tubolari (b), disposte intorno all'asse del motore. Questa configurazione, pur essendo semplice e facilmente ispezionabile (p. es. se un combustore è difettoso si può sostituirlo; è anche possibile condurre prove al banco utilizzando una sola camera, quindi utilizzando ridotte portate) risulta pesante, per cui è stata abbandonata (se non per piccoli motori, per i quali può aversi anche un solo combustore). Si hanno anche problemi di interconnessione delle camere e di accensione (la fiamma deve propagarsi da un combustore a tutti gli altri in senso circonferenziale). All'altro estremo, le camere anulari (d) sono leggere, consentono basse cadute di pressione per effetto della loro aerodinamica pulita, nonché, vedi 4.8.7, basse emissioni di inquinanti grazie al basso rapporto (superficie pareti/volume); sono tuttavia difficili da realizzare

(per le piccole tolleranze richieste) e quindi costose, ed inoltre la manutenzione e le prove richiedono un intervento sull'intera camera. Sono inoltre molto sensibili ad una distorsione del profilo di velocità in ingresso. Sono attualmente le più diffuse sui motori di grande potenza. Nelle camere tuboanulari (c) la fiamma è confinata entro *liners* perforati cilindrici; le perforazioni servono a far passare l'aria di diluizione e raffreddamento. Si può ancora provare una sola camera al banco, ma ritornano i problemi di interconnessione delle camere e di accensione.

3.1.6 Le camere di combustione constano quindi di un diffusore che riduce la velocità dell'aria proveniente dal compressore, di zone di combustione primaria, intermedia e di diluizione, degli iniettori e di un sistema di raffreddamento. Si osservi, attorno all'ugello che inietta il combustibile, la presenza di un condotto che immette l'aria primaria con un moto di *swirl* (quindi con una componente ortogonale al piano del foglio), condizione indicata con una '×'. Si notino anche il *liner* perforato, e lo *snout* (muso).

3.1.7 Analizziamo ora brevemente i vari componenti. Nel diffusore si hanno perdite di pressione sia per attrito (Δp_{cold}) che per rilascio di calore (Δp_{hot}), come evidenziato dal termine forzante dell'equazione per dp/p . Come si evince facilmente, queste perdite aumentano con il numero di Mach e la temperatura.

3.1.8 Il diffusore può essere conico, nel qual caso l'angolo di semiapertura va contenuto ($7 - 12^\circ$) per evitare la separazione del flusso dalle pareti, per cui risultano relativamente lunghi, oppure *dump*, più corto, ma che dà luogo a maggiore caduta di pressione.

3.1.9 Nella zona primaria combustibile ed ossidante sono miscelati in proporzioni circa stechiometriche per assicurare l'infiammabilità della miscela; ciò porta a temperature localmente molto elevate, ed alla presenza di una importante quantità di prodotti di dissociazione. L'aria primaria viene immessa attraverso condotti palettati che le imprimono un moto di *swirl*, oppure attraverso getti. Usare getti di grande diametro porta a condizioni più prossime a combustione nonpremiscelata, vedi 3.2.1, e quindi ad una maggiore stabilità della fiamma (ossia il combustore opera in modo soddisfacente su un ampio campo dei parametri operativi), mentre usare getti di piccolo diametro porta ad una combustione in condizioni più uniformi (più vicina a combustione premiscelata), con conseguenti minori emissioni di inquinanti, ma stabilità più ristretta.

3.1.10 Successivamente alla combustione circa stechiometrica, occorre immettere aria per abbassare la temperatura fino a valori accettabili dalla turbina. Se però quest'aria venisse immessa tutta insieme, il repentino abbassamento della temperatura 'congelerebbe' le reazioni chimiche, con la conseguenza che i prodotti di dissociazione non potrebbero riconvertirsi in prodotti di reazione. Di qui l'esigenza di introdurre una zona intermedia, ove la temperatura si mantiene ad un livello tale (p. es. 1800 K) da consentire la ricombinazione dei prodotti di dissociazione. Nel volo ad alta quota, poiché la pressione ambiente è bassa ed il tasso di produzione delle specie chimiche è proporzionale alla pressione elevata un coefficiente che vale circa 1,75 - 1,8, il volume della zona primaria può non essere sufficiente a completare le reazioni primarie; in tal caso la zona di diluizione serve anche come un'estensione della zona primaria. Si cerca di contenere la lunghezza della zona intermedia per i soliti problemi di peso, ad ogni modo si utilizzano camere più lunghe per motori di aerei a lungo raggio,

per i quali il consumo è più importante, per cui si ricerca una combustione quanto più possibile completa, anche a prezzo di un certo incremento di peso.

3.1.11 Nella zona secondaria viene immessa la rimanente aria di diluizione. Essa ha l'importante compito di stabilire una distribuzione di temperature in uscita quanto più possibile piatta, o meglio ancora caratterizzata da temperatura relativamente ridotta in prossimità della radice delle pale (che devono sopportare l'intero sforzo centrifugo sulla pala) come pure della sua sommità (dove si trovano le tenute a labirinto necessarie per evitare che il flusso sfugga sopra l'estremità delle pale senza compiere lavoro; esse sono fatte di materiale sottile, quindi molto sensibile alla temperatura). La distribuzione di temperatura diventa più uniforme all'aumentare della lunghezza della zona di diluizione, tuttavia oltre un certo limite non c'è più vantaggio sensibile.

3.1.12 Gli iniettori devono assicurare un'efficace atomizzazione (cioè riduzione in goccioline di piccolo diametro) del combustibile, e questo per un ampio campo dei parametri operativi. Descriviamo di seguito i tipi principali.

3.1.13 In questi iniettori il getto di combustibile viene iniettato ad alta velocità per effetto della pressione. Indicando con l'indice 1 le condizioni a monte dell'iniettore, e con 2 quelle a valle, e con ρ la densità del combustibile, l'equazione di Bernoulli dà (in assenza di perdite) $p_1 + \rho u_1^2 = p_2 + \rho u_2^2$, dalla quale, supponendo di poter trascurare u_1 in confronto a u_2 , si ha $u_2 = (2 \Delta p / \rho)^{1/2}$, e per la portata in massa attraverso un foro di diametro D , $\dot{m} = \pi D^2 (2 \rho \Delta p)^{1/2} / 4$. Per realizzare una camera di combustione corta, si cerca di immettere lo *spray* di combustibile in modo che formi un cono di apertura prossima a 90° ; per far questo il getto di combustibile viene trascinato da aria con un moto di *swirl*, e fatto uscire attraverso un condotto a forma tronco-conica convergente. Con un solo getto di combustibile (configurazione *simplex*) risulta però difficile soddisfare le esigenze legate ad una portata \dot{m}_f che varia di cinquanta volte (questo comporterebbe una pressione di alimentazione che varia di 2500 volte). Si può allora ricorrere alla configurazione *duplex*, nella quale si hanno due getti di combustibile, uno più piccolo che copre le condizioni di minimo consumo, ed uno più grande che si apre solo quando è richiesta una portata importante. Presentano svantaggi legati alla possibilità che i sottili passaggi del combustibile si ostruiscano per effetto di impurità; inoltre, per effetto dell'apertura del cono dello *spray*, il combustibile può arrivare sulle pareti del *liner*, dove tende a formare depositi carboniosi (*coking*) che impediscono lo scambio termico (quindi il raffreddamento), e tende anche a formare *soot* a pressioni elevate (quando l'evaporazione delle goccioline risulta più difficile). Per tali motivi sono oggi sostanzialmente abbandonati.

3.1.14 Negli atomizzatori *airblast* il combustibile viene iniettato come un sottile film, il quale viene poi 'stirato' da ambo i lati da correnti d'aria ad alta velocità, che tendono quindi a stracciarlo e ridurlo in goccioline. Il fatto che il combustibile si trovi tra due correnti d'aria ne impedisce il contatto con le pareti, evitando così fenomeni di *coking*. Formano poi poco *soot* (riducendo quindi anche lo scambio termico dalla fiamma alle pareti per radiazione), grazie alla migliore atomizzazione del combustibile, la quale però è accompagnata da una minore stabilità della fiamma, e da difficoltà di accensione a causa della bassa velocità dell'aria allo *start-up*. Questi inconvenienti possono essere risolti introducendo un pilota, cioè un atomizzatore del tipo *pressure-swirl* (non soggetto a questi

inconvenienti) il quale, quando il motore è in avviamento o comunque funziona a basso carico, elabora la maggior parte della portata di combustibile, mentre l'opposto avviene a pieno carico.

3.1.15 Negli atomizzatori *vaporizer* il combustibile, insieme ad una percentuale dell'aria calda che esce dal compressore, viene inviato in condotti che passano entro la camera, per cui si riscalda oltre il punto di vaporizzazione. In realtà tale evaporazione non è completa. Presentano una bassa tendenza alla formazione di *soot*, ma corrono il rischio di danneggiamento dei tubi per effetto dell'elevata temperatura alla quale sono esposti.

3.1.16 Negli iniettori *premix-vaporizer* il combustibile viene finemente atomizzato e miscelato con aria prima di essere inviato in camera di combustione. Le condizioni di combustione più uniformi portano ad una minore formazione di inquinanti. Si hanno problemi di *flashback* (la fiamma può risalire entro la miscela) ed allo *start-up*, che possono ancora essere risolti introducendo un pilota.

3.1.17 La temperatura della miscela reagente in camera è sempre di diverse centinaia di gradi K al di sopra della temperatura di fusione dei materiali delle pareti, le quali perciò devono essere adeguatamente raffreddate; l'aria di raffreddamento può arrivare al 30% o addirittura al 50% della portata d'aria immessa nel combustore. La tendenza ad aumentare il rapporto di compressione del ciclo porta a valori alti della temperatura T_3 dell'aria in ingresso del combustore, con due conseguenze: l'aria calda è meno efficace per raffreddare, e la temperatura T_4 , a parità di valore del rapporto di diluizione f , è più elevata. Diverse tecniche sono disponibili per raffreddare le pareti. Nel *film cooling* l'aria viene iniettata lungo le pareti a formare un film protettivo, relativamente freddo, sul lato interno del *liner*. Nel *convection-film cooling* si sfrutta anche un effetto convettivo sul lato esterno del *liner*, stimolato adottando pareti rugose che aumentano pertanto la superficie di scambio, prima di immettere il flusso lungo la parete interna del *liner* per raffreddarla come nel caso precedente. Nell'*impingement-film cooling* il flusso d'aria di raffreddamento, attraverso una serie di fori, viene diretto normalmente alla parete esterna del *liner*, per poi formare il solito film protettivo sulla parete interna. Infine, nel *transpiration cooling*, si adottano pareti porose raffreddate dall'aria che filtra attraverso di esse. La figura mostra come le diverse tecniche citate permettono di ridurre progressivamente la portata d'aria destinata al raffreddamento.

3.1.18 Questo combustore adotta atomizzatori *airblast*. È visibile anche la candela per il *light-up*.

3.1.19 Anche questo combustore adotta atomizzatori *airblast*; sono ben visibili i condotti attorno all'iniettore attraverso i quali l'aria primaria viene immessa in camera con un moto di *swirl*.

3.1.20 In questa figura è ben visibile la configurazione anulare del combustore, e la localizzazione degli iniettori *airblast*, dei fori dell'aria primaria e di diluizione.

3.1.21 Per poter lavorare su un ampio campo di valori di \dot{m}_f , alcuni combustori operano con due stadi, uno dei quali fa da pilota, l'altro entra in azione quando sono richieste grosse spinte. Questa configurazione offre in linea di principio anche la possibilità di contenere le emissioni di inquinanti, poiché il motore può attivare uno o due combustori per poter operare in condizioni sempre prossime a quelle che danno le minime emissioni. Un'altra opportunità per ridurre le emissioni è quella di utilizzare combustori catalitici, che permettono di effettuare una combustione con miscela molto povera,

al di fuori dei limiti di infiammabilità. Devono però ancora essere risolti i problemi di avvelenamento ed erosione del catalizzatore, e delle cadute di pressione.

3.2.1 La combustione può avvenire in regime nonpremiscelato (detta anche combustione diffusiva) se combustibile ed ossidante sono immessi in camera di combustione in due flussi separati, oppure premiscelato, se combustibile ed ossidante sono premiscelati prima di essere iniettati in camera di combustione. Nel primo caso il rapporto di equivalenza in camera φ spazia l'intero campo tra 0 (nel flusso di ossidante in ingresso) ed ∞ (nel flusso di combustibile), e la fiamma si stabilisce intorno ai punti in cui combustibile ed ossidante, diffondendo uno verso l'altro, raggiungono una composizione più o meno stechiometrica (situazione tipica di molte turbine a gas, ed in prima approssimazione dei motori diesel); questo permette di ancorare stabilmente la fiamma. Nel secondo caso φ è uniforme in camera, e la fiamma non ha un punto di ancoraggio preferenziale (la combustione può avvenire indifferentemente in qualsiasi punto, per effetto dell'accensione per contatto con i prodotti caldi) per cui è più difficile da controllare in condizioni stazionarie (nei motori alternativi a benzina, in cui la fiamma comunque *non* è stazionaria, l'accensione è comandata dalla scintilla della candela). Per ancorare con sicurezza una fiamma premiscelata in regime stazionario, si utilizza in alcune turbine a gas un ulteriore getto di combustibile che forma una fiamma pilota; in questo caso si parla di combustione parzialmente premiscelata. Poiché la fiamma premiscelata primaria opera sempre con eccesso di aria ($\varphi < 1$), i suoi prodotti di combustione contengono ancora ossidante, che alimenta quindi la fiamma del getto di combustibile iniettato dal pilota. La combustione nelle turbine a gas avviene sempre in regime turbolento, infatti una rozza stima del numero di Reynolds, assumendo densità $\sim 2 \text{ kg/m}^3$, velocità $\sim 30 \text{ m/s}$, dimensioni del combustore $\sim 0,1 \text{ m}$, viscosità dinamica $\sim 6 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$, porta a valori dell'ordine di 10^5 .

3.2.2 I fattori che limitano il rilascio di calore in camera di combustione sono sia chimici che fisici. La velocità con la quale avvengono le reazioni chimiche limita infatti il tasso di reazione (ossia la massa di combustibile che brucia nell'unità di tempo, per unità di volume). Tuttavia, prima che possa avvenire la combustione, occorre che siano completati alcuni processi fisici, come evaporazione delle goccioline di combustibile e miscelamento tra combustibile ed aria, dovuto principalmente alla turbolenza, ed in particolare la diffusione tra combustibile ed aria in fiamme nonpremiscelate. Inoltre, lo scambio di calore tra gas caldi e pareti del combustore limita la quantità di calore che viene trasferita al fluido operativo.

3.2.3 Il combustibile per motori a getto è in realtà una miscela di migliaia di specie chimiche; volendo darne una rappresentazione semplificata, esso può essere approssimato come una miscela di *n*-decano e toluene. Consideriamo ad esempio la combustione di *n*-decano ed aria, al fine di determinare in particolare quale deve essere la concentrazione del combustibile nell'aria per avere combustione stechiometrica. L'aria, trascurando alcuni componenti presenti in concentrazione molto bassa, può essere approssimata come una miscela di 21% di ossigeno, e 79% di azoto; si hanno quindi $79/21 \simeq 3,76$ molecole di azoto N_2 per ogni molecola di O_2 . La massa molare dell'aria risulta quindi prossima a 29 kg/kmol . Nella combustione stechiometrica del decano, ogni atomo di carbonio si ossida a CO_2 (richiedendo quindi una molecola di O_2), mentre due atomi di idrogeno si ossidano per dare H_2O (richiedendo per questo mezza molecola di O_2). Per bruciare completamente una molecola di

n -decano occorrono quindi 10 molecole di O_2 per ossidare i 10 atomi di carbonio, e 5,5 molecole di O_2 per ossidare i 22 atomi di idrogeno (cioè le 11 coppie di atomi di idrogeno), per un totale di 15,5 molecole; ad ogni molecola di O_2 sono poi associate 3,76 molecole di N_2 . La reazione stechiometrica richiede quindi, per ogni molecola di n -decano, 15,5 molecole di O_2 e $15,5 \cdot 3,76 = 58,28$ molecole di N_2 ; da questo si ricava facilmente la frazione molare di n -decano in una miscela stechiometrica. L'analoga frazione di massa può facilmente essere ricavata considerando le masse molari delle singole specie; la massa della singola chilomole di n -decano è 142,287 kg, quella delle 15,5 chilomoli di O_2 risulta $15,5 \cdot 31,9988 \simeq 496$ kg, etc.

3.2.4 La combustione di una miscela di combustibile ed aria può avvenire solo se il rapporto di equivalenza della miscela è compreso entro i cosiddetti *limiti di infiammabilità*; sono riportati i valori per combustione di n -decano ed aria a pressione atmosferica. In realtà i limiti di infiammabilità dipendono anche dalla pressione, come si può vedere dalla figura in basso (nella quale peraltro tali limiti sono riportati in funzione del rapporto di diluizione f , legato al rapporto di equivalenza a meno di una costante, essendo $\varphi = f/f_{st}$). Poiché nella combustione nonpremiscelata φ come detto spazia l'intero campo tra zero ed infinito, esistono sicuramente zone ove le condizioni di infiammabilità sono rispettate (purché ovviamente la pressione sia al disopra del minimo dell'involuppo di infiammabilità). In combustione premiscelata invece la combustione avviene solo se la composizione della miscela è entro i limiti di infiammabilità, condizione questa che contribuisce a rendere questo regime di combustione meno stabile (per effetto di possibili fluttuazioni di φ quando la composizione di miscela è prossima ai limiti di infiammabilità). Incidentalmente, se i limiti di infiammabilità sono specificati in termini di frazione molare, si possono facilmente ricavare gli analoghi valori in termini di rapporto di equivalenza.

3.2.5 La pressione di vapore di un liquido (quindi in particolare del combustibile) è una funzione crescente della temperatura. Se quindi si ha combustibile in un serbatoio chiuso non completamente pieno, al crescere di T cresce anche la concentrazione dei vapori di combustibile nell'aria al disopra del combustibile. La temperatura alla quale tale concentrazione raggiunge il limite inferiore di infiammabilità (alla pressione atmosferica) individua il cosiddetto *flash point*. Il campo di infiammabilità si restringe se nell'aria contenuta nei serbatoi viene iniettato un gas inerte, come si può vedere (per un fissato valore della pressione) dalla figura di sinistra. Questa operazione viene effettuata negli aerei militari per diminuire il rischio di esplosioni accidentali (poiché essi possono volare ad alta quota z , ove la pressione $p(z)$ è molto bassa, la frazione molare di combustibile nei vapori $p_{vap}(T)/p(z)$ può diventare importante). Si sta attualmente pensando di iniettare azoto (o meglio, aria arricchita in azoto) anche nei serbatoi degli aerei civili.

3.2.6 Le reazioni chimiche comportano in genere un rilascio (in senso algebrico) di calore, che in chimica viene preso come positivo se il calore è effettivamente rilasciato (reazione esotermica) e negativo se esso è assorbito (reazione endotermica); si osservi però che in termodinamica il calore viene assunto positivo se assorbito dal sistema reagente, per cui l'entalpia di reazione risulta $\Delta h_R = -Q_R$. Una notazione generale per una reazione comporta l'identificazione delle specie chimiche, indicate genericamente come M_i , che intervengono (tanto come reagenti che come prodotti, con $i = 1, 2, \dots, N$, essendo quindi N il numero totale di specie chimiche presenti nel sistema), e dei rispettivi coefficienti

stechiometrici come reagenti, indicati come ν'_i , e come prodotti, ν''_i (presumibilmente molti di questi coefficienti saranno nulli). Per esempio, per la reazione indicata, posto $M_1 = C_{10}H_{22}$, $M_2 = O_2$, $M_3 = CO_2$, $M_4 = H_2O$, si ha $\nu'_1 = 1$, $\nu'_2 = 15,5$, $\nu'_3 = 0$, $\nu'_4 = 0$, $\nu''_1 = 0$, $\nu''_2 = 0$, $\nu''_3 = 10$, $\nu''_4 = 11$. La situazione sopra delineata contempla solo la trasformazione di reagenti in prodotti, ma in realtà ciascuna reazione avviene nei due sensi, è cioè reversibile. Quando (come sempre avviene) in un sistema si hanno molte reazioni contemporaneamente, si possono o contare separatamente i passi di reazioni in avanti (*forward*) ed all'indietro (*backward*), nel qual caso si adotta la notazione con la freccia che va da sinistra verso destra, oppure si possono intendere inclusi per ciascuna reazione tanto il passo *forward* che quello *backward*, nel qual caso si adottano le frecce in entrambi i sensi (è ovvio che in questo secondo caso il numero totale di reazioni risulta essere la metà rispetto al caso precedente).

Si possono adottare tre livelli di descrizione della chimica; procedendo dal più rozzo al più dettagliato, essi sono “*mixed is burnt*” (dizione con la quale si intende che tutto il combustibile che si mescola con l'ossidante brucia), chimica in equilibrio, e chimica a velocità finita.

3.2.7 Come esempio di schematizzazione della combustione secondo il modello *mixed is burnt*, riportiamo il caso di combustione di cherosene (approssimato come una miscela di 89% *n*-decano, 11% toluolo – percentuali in massa, da indicare quindi come $Y_{C_{10}H_{22}}$ e $Y_{C_7H_8}$) in aria. In un kg di cherosene ci saranno pertanto $n_{C_{10}H_{22}} = Y_{C_{10}H_{22}}/\mathcal{M}_{C_{10}H_{22}}$ kmol di *n*-decano e $n_{C_7H_8} = Y_{C_7H_8}/\mathcal{M}_{C_7H_8}$ kmol di toluene; si può facilmente trovare che il rapporto tra numero di moli di *n*-decano e toluolo vale 5,24. Facendo riferimento alla combustione di una kmol di toluolo e delle 5,24 kmol di *n*-decano ad esse associate, si trova che per combustione stechiometrica sono necessarie $7 + 5,24 \cdot 10 = 59,4$ kmol di O_2 per ossidare completamente il carbonio, e $8/4 + 5,24 \cdot 22/4 = 30,82$ kmol di O_2 per ossidare completamente l'idrogeno (si ricordi che ogni atomo di idrogeno richiede mezzo atomo di ossigeno, quindi un quarto di molecola di O_2), per un totale di 90,22 kmol di O_2 , alle quali nell'aria sono associate $3,76 \cdot 90,22 = 339,23$ kmol di N_2 . Se invece la combustione non è stechiometrica, *fissata la quantità di combustibile* (1 kmol di toluolo e 5,24 di *n*-decano nel caso considerato), la quantità di ossidante sarà inversamente proporzionale a φ , essendo, per la definizione di questa grandezza, $F/O = \varphi (F/O)_{st}$, quindi $O = F/[\varphi \cdot (F/O)_{st}]$. Se la combustione è ricca, rimarrà quindi combustibile incombusto; per ogni kmol di combustibile, si ha infatti a disposizione $1/\varphi$ (< 1) volte il quantitativo di aria necessario, per cui solo $1/\varphi$ kmol di combustibile bruciano, mentre le rimanenti $(1-1/\varphi)$ rimangono incombuste. Se la combustione è povera, il combustibile brucia tutto, ma i prodotti contengono l'ossigeno (e l'azoto) in eccesso; poiché l'ossidante è $1/\varphi$ (> 1) volte quello necessario, una quantità di esso $(1/\varphi - 1)$ volte quella stechiometrica non prende parte alla reazione.

3.2.8 In equilibrio chimico, per ogni composto possiamo scrivere una *reazione di formazione* che porta alla formazione del composto stesso a partire dagli elementi che lo costituiscono. Per questa reazione di formazione esiste poi una *costante di equilibrio* che lega le pressioni parziali di reagenti e prodotti (ciascuna elevata il suo coefficiente stechiometrico) quando il sistema ha raggiunto l'equilibrio chimico; essa risulta essere una funzione della sola temperatura (vedi 3.2.11). Le pressioni parziali di ciascuna specie sono poi legate alla sua concentrazione in termini di frazione molare dalla legge di Dalton, la quale si ricava immediatamente dall'espressione dell'equazione di stato dei gas perfetti,

che per la miscela si scrive $pV = n\mathcal{R}T$, e per l' i -esima specie, la cui pressione parziale è p_i , come $p_iV = n_i\mathcal{R}T$; dividendo quest'ultima per la precedente si ottiene l'espressione cercata. Si noti che nella costante di equilibrio le pressioni vanno espresse in unità del valore di riferimento p_0 (1 atm, oppure 100 kPa, come si preferisce attualmente). La legge di Dalton consente di esplicitare nelle relazioni di equilibrio le frazioni molari delle singole specie; la costante di equilibrio in termini delle frazioni molari sarà però in generale una funzione sia della temperatura che della pressione, cioè una $K_{X,i}(T, p)$. Se quindi in un sistema reagente si hanno N specie chimiche, nelle quali figurano L elementi, si possono scrivere $N - L$ costanti di equilibrio di formazione (relazioni nonlineari) per i composti, ed L relazioni (lineari) di conservazione del numero degli atomi. Per esempio, per la reazione di formazione citata la conservazione degli atomi di idrogeno si scrive (adottiamo qui le frazioni di massa, che però sono legate alle frazioni molari, vedi 2.3) $Y_{H_2} = (\mathcal{M}_{H_2}/\mathcal{M}_{H_2O}) Y_{H_2O}$, dove la quantità tra parentesi rappresenta la frazione della massa della molecola di H_2O che è costituita da atomi di idrogeno; un'analogia relazione potrà scriversi per l'elemento ossigeno. Il sistema da risolvere risulta quindi chiuso, ma fortemente nonlineare, specie nel caso in cui N sia molto elevato, e richiede quindi codici di calcolo specializzati, come p. es. STANJAN, disponibile in rete, di facile utilizzo (vedi oltre).

3.2.9 Il livello più completo di descrizione della chimica contempla l'introduzione di un'equazione di conservazione per la frazione di massa di ciascuna specie chimica, nella quale la variazione della massa della specie contenuta nell'unità di volume, nell'unità di tempo (primo termine a primo membro), risulta dovuta ad un termine convettivo (secondo termine a primo membro, dovuto al moto ordinato delle molecole attraverso le pareti del volume di controllo considerato), un termine diffusivo (primo termine a secondo membro, in cui D_i rappresenta il coefficiente di diffusione delle specie i , il quale è dovuto ai moti di agitazione termica delle molecole, che è un moto disordinato), ed infine ad un termine di produzione per reazioni chimiche; queste equazioni hanno quindi la struttura tipica delle equazioni di Navier–Stokes. Il tasso di produzione si ottiene moltiplicando per il numero di molecole delle specie i che si formano in ciascuna reazione, per la massa molare, e per il tasso di reazione, in cui il numero di reazioni che avvengono per unità di volume e tempo è espresso in multipli del numero di Avogadro N_0 . Tale tasso di reazione è dato dalla legge d'azione di massa in termini della costante di reazione in avanti (*forward*), in realtà una funzione delle temperatura – vedi sotto, e della concentrazione di ciascuna specie reagente, elevata il proprio coefficiente stechiometrico. La concentrazione qui considerata è espressa come numero di moli per unità di volume, ed è semplicemente indicata con parentesi quadre attorno al simbolo della specie i , e può essere facilmente espressa in termini di frazioni di massa e densità. La 'costante' di reazione assume la forma indicata, in cui si deve notare l'importante dipendenza dalla temperatura dovuta in particolare al termine esponenziale, il quale tiene conto della frazione di molecole presenti nel gas (le quali hanno una distribuzione di velocità maxwelliana) le quali hanno energia sufficiente a far avvenire la reazione. Quindi nell'espressione della 'costante' di ciascuna reazione compaiono tre costanti, indicate come B , α e E . Indicata con m la molecolarità della reazione, sommatoria dei coefficienti stechiometrici di tutti i reagenti (uguale quindi al numero di molecole che devono incontrarsi per far avvenire la reazione), si arriva alla forma indicata per il tasso di produzione della specie i (tutto questo in presenza di una *singola* reazione

chimica).

3.2.10 In presenza di un numero generico M di reazioni chimiche (con indice k), ognuna delle quali sarà caratterizzata dai suoi coefficienti stechiometrici delle specie come reagenti ($\nu'_{i,k}$) e come prodotti ($\nu''_{i,k}$), quindi da una molarità m_k , e dalle sue specifiche costanti del tasso di reazione, occorre perciò introdurre una sommatoria su tutte le reazioni per arrivare al tasso di produzione delle specie, ottenendo in tal modo la cosiddetta espressione di Arrhenius. A volte invece della energia di attivazione E_k della reazione k si specifica la temperatura di attivazione $T_k = E_k/\mathcal{R}$. In chimica i valori delle costanti del tasso di reazione sono invariabilmente dati in unità cm, g, s, cosa di cui occorre ovviamente tener conto quando si adottano altri sistemi di unità di grandezza. Il termine ‘chimica in nonequilibrio’, frequentemente usato in luogo di ‘chimica a velocità finita’, è da evitare (perché, p. es., anche reazioni ‘congelate’ sono in nonequilibrio).

3.2.11 Il valore della costante di equilibrio della generica reazione può essere ricavato imponendo che all’equilibrio il valore della funzione di Gibbs (intesa come grandezza estensiva, indicata con la lettera maiuscola) dei prodotti della reazione è uguale a quella dei reagenti. Questa eguaglianza può essere scritta introducendo la funzione di Gibbs specifica (quindi grandezza intensiva, indicata con la lettera minuscola e l’accento circonflesso se riferita all’unità molare, mentre si adotta la semplice lettera minuscola se riferita all’unità di massa) ed eguagliando quindi i termini relativi ai reagenti ed ai prodotti, $\sum_i \Delta \nu'_i \hat{g}_i = \sum_i \Delta \nu''_i \hat{g}_i$, oppure, come indicato, sottraendo il primo membro al secondo. In questa espressione \hat{h}_i è una funzione tabulata della temperatura, mentre l’entropia deve essere valutata a partire dal dato tabulato in funzione della temperatura, che è l’entropia $s_{0,i}(T)$ della specie i alla pressione di riferimento p_0 , e questo comporta termini nel logaritmo della pressione parziale della specie i , diviso p_0 . Prendendo l’esponenziale di ambo i membri, ed isolando i termini nei quali compaiono le pressioni parziali, si arriva ad esprimere la costante di equilibrio della reazione considerata in funzione di termini che dipendono solo dalla temperatura. Si noti che nella costante di equilibrio le pressioni parziali sono perciò riferite al valore p_0 .

3.2.12 L’entalpia della specie i che compare nelle espressioni precedenti è l’entalpia assoluta, somma del termine di formazione e del termine sensibile. Si definisce calore di formazione il calore rilasciato nella formazione di un’unità molare della specie i a partire dagli elementi che costituiscono la molecola, calore preso positivo se rilasciato nella formazione. Per la differente convenzione dei segni in termodinamica, si definisce invece come entalpia di formazione la stessa grandezza, con segno però opposto. Essa quindi misura l’energia che è stata spesa per formare la specie in questione (nella condizioni di T e p di riferimento) a partire dagli elementi. Per gli elementi, si assume per convenzione entalpia di formazione nulla se essi si trovano nel loro stato di aggregazione standard nella condizioni di riferimento $T_0 = 25\text{ C} = 298,15\text{ K}$ e $p_0 = 100\text{ kPa}$, p. es. stato gassoso per idrogeno ed ossigeno, solido per il carbonio, liquido per il mercurio, etc. Si passa poi dal valore per unità molare a quello per unità di massa dividendo per la massa molare della specie. L’entalpia assoluta (specifica) di una miscela si ottiene quindi come una media pesata delle entalpie assolute dei singoli componenti, pesata con l’opportuna concentrazione.

3.2.13 Nel caso in cui le reazioni siano contabilizzate come reazioni reversibili, per cui la generica

reazione k -esima comprende tanto il passo *forward* che quello *backward*, il tasso di tale generica reazione va determinato come differenza tra i tassi in avanti ed all'indietro, come indicato. Nel caso (puramente ipotetico, perché richiede un tempo infinito, anche se la condizione può essere approssimata molto da vicino in tempi finiti) che il sistema sia in equilibrio chimico, il tasso di produzione della generica specie i si annulla, per cui devono annullarsi anche le grandezze tra parentesi quadre. Sviluppando la risultante espressione per il rapporto delle 'costanti' di reazione *forward* e *backward*, e tenuto conto che la concentrazione molare $[M_j]$ (numero di moli per unità di volume) può essere sviluppata come indicato grazie all'equazione di stato dei gas ideali, si ottiene che essa è direttamente legata alla costante di equilibrio della reazione. Ponendo quindi in evidenza il tasso della reazione in avanti, si arriva alle forme indicate.

3.2.14 Esplicitando l'espressione del tasso di reazione in avanti nelle forme appena ricavate, si arriva ad un'espressione nella quale il termine tra parentesi, in condizioni di equilibrio chimico, risulta nullo. Come è stato detto, il raggiungimento delle condizioni di equilibrio richiede un tempo infinito, a meno di non supporre che le costanti di reazione siano infinite (basterebbe che questo fosse vero per la sola costante *forward*, essendo quella *backward* ricavabile da essa). Sotto questa ipotesi limite, l'espressione del tasso di reazione assume quindi una forma del tipo $\infty \cdot 0$, risultando perciò indeterminata; questo vuol dire che in equilibrio non si può ricavare il tasso di reazione dall'espressione di Arrhenius. Supponendo di conoscere il campo di moto e quello scalare, si potrebbe pensare di ricavare il termine di produzione delle specie dall'equazione di conservazione della stessa, come indicato; da questa espressione si osserva che in particolare w_i può risultare nullo solo se il sistema è spazialmente omogeneo (per cui tutte le derivate spaziali si annullano) e a stazionario. Come detto, la condizione di equilibrio, anche se virtualmente raggiungibile solo asintoticamente (cioè in un tempo infinito), può in molti casi essere approssimata molto da vicino in tempi più o meno lunghi, a secondo del sistema chimico considerato. Se infatti il tempo di residenza in camera risulta molto maggiore del tempo caratteristico chimico delle reazioni (cioè del tempo che le reazioni impiegano per avvenire), il sistema sarà praticamente (anche se, a rigore, non esattamente) in equilibrio.

3.2.15 Le reazioni chimiche possono essere classificate in reazioni di scambio binario, nelle quali non si ha variazione del numero di moli delle specie, e reazioni di dissociazione-ricombinazione, nelle quali invece il numero di moli dei prodotti è diverso da quello dei reagenti. Queste ultime reazioni richiedono in generale l'intervento di un *terzo corpo*, cioè di una molecola la cui presenza è necessaria per far avvenire la reazione, pur non prendendovi essa parte direttamente. Infatti, nell'esempio citato, supponendo di assumere un riferimento in cui la molecola di O_2 prima della reazione è ferma, per cui tanto la quantità di moto che l'energia cinetica sono nulle, si avrà che dopo la scissione della molecola in due atomi di O , i quali pertanto si allontaneranno l'uno dall'altro in direzioni opposte, mentre è possibile soddisfare la conservazione della quantità di moto (se i due atomi si allontanano in direzione opposta con uguale velocità – in modulo), non risulta invece soddisfatta l'equazione dell'energia (perché l'energia cinetica dei due atomi di O è comunque positiva). Si impone quindi la necessità di un urto con un terzo corpo il quale fornisca l'energia necessaria a soddisfare i bilanci in questione. Nell'espressione di Arrhenius deve comparire quindi anche la concentrazione del terzo corpo. Per quanto qualsiasi molecola possa assolvere questo compito (per cui il termine Y_i/M_i

va esteso a tutte le N specie), differenti molecole possono presentare una diversa efficacia, per cui introduce un'efficienza di terzo corpo ϵ_i con la quale pesare la concentrazione di ciascuna specie i nell'espressione di Arrhenius.

3.2.16 Quando si utilizza la descrizione della chimica a velocità finita, occorre specificare il *meccanismo di cinetica chimica*, cioè l'insieme di reazioni che avvengono (o si suppone avvengano) nel sistema, e le relative costanti di reazione (B_k , α_k , E_k per ciascuna delle M reazioni). Si può tentare di descrivere in dettaglio quanto avviene nel sistema considerato, ma poiché la chimica della combustione degli idrocarburi è *estremamente* complessa, questo può richiedere di considerare p. es. $N = 100 - 200$ specie chimiche ed $M = 500 - 4000$ reazioni. Tuttavia, anche tale descrizione non sarà che un'approssimazione di quanto avviene in realtà. La difficoltà nella risoluzione di tale sistema va valutata considerando che in sistema inerte (non reagente) basta risolvere solo le equazioni di conservazione di massa, quantità di moto, energia, per un totale di 5 equazioni; per un sistema reagente occorre invece risolverne $5 + N$, dove come detto N può essere molto elevato. Inoltre, le equazioni di conservazione delle specie presentano particolarità (il fatto che in prossimità delle condizioni di equilibrio il termine sorgente si avvicina ad una forma $\infty \cdot 0$) che ne rendono molto onerosa la soluzione numerica. Si tenta quindi di contenere l'onerosità della soluzione cercando di identificare quali siano le reazioni più significative, e trascurando invece quelle marginali; questi meccanismi *semplificati* possono per esempio comprendere qualcosa come, p. es., $N = 50$ specie e $M = 300$ reazioni. Di simile onerosità sono i meccanismi *ridotti* nei quali p. es. per alcune specie si adotta l'ipotesi di equilibrio parziale, per cui la relativa concentrazione può essere ricavata, anziché risolvendo un'equazione (differenziale) di conservazione, da una relazione (algebraica) di equilibrio. All'altro estremo, potremmo pensare di portare la semplificazione all'estremo e considerare quindi un unico passo di reazione, che porti perciò dai reagenti (combustibile ed aria) direttamente ai prodotti, saltando quindi tutte le specie intermedie (CO, OH, H, O, HO₂, CHO, ...) che pur in realtà intervengono nelle reazioni. In tale semplificazione estrema (meccanismo *globale*) i coefficienti dell'espressione del tasso di produzione sono ricavati per via empirica, ed in particolare gli esponenti delle concentrazioni che meglio approssimano i dati sperimentali risultano essere numeri non interi. Una semplificazione intermedia è quella dei cosiddetti meccanismi *semi-globali*, nei quali si assume un passo globale che porta alla formazione di alcune specie intermedie, in particolare CO; la successiva ossidazione di CO a CO₂ (la quale è piuttosto lenta, per cui risulta controllare il rilascio di calore) è poi descritta da un meccanismo succinto (p. es. 10 - 20 reazioni).

3.2.17 Quando tutto il calore sviluppato nella combustione è utilizzato per innalzare la temperatura dei prodotti, si parla di *combustione adiabatica*; tale situazione approssima abbastanza da vicino quanto avviene nelle camere di combustione dei motori, ove le perdite di calore attraverso le pareti rappresentano al più qualcosa come l'1% del calore generato. In queste condizioni quindi il sistema reagente non scambia calore con l'esterno, per cui $\Delta Q = 0$, e di conseguenza anche $\Delta h = 0$ per l'equazione dell'energia $\Delta h_0 = \Delta Q + \Delta L$, dove il lavoro in camera di combustione è evidentemente nullo, ed $h_0 \simeq h$ a causa delle basse velocità in gioco. Nel caso la combustione possa essere approssimata come un processo in equilibrio, poiché le condizioni di equilibrio possono essere calcolate una volta specificati i valori di due grandezze di stato, nonché le quantità relative dei reagenti, vedi

3.2.18–19, conviene quindi assumere come coppia di variabili di stato assegnata la pressione operativa e l'entalpia assoluta, in quanto esse non variano nel processo di combustione. La risultante temperatura dei prodotti viene indicata come *temperatura adiabatica di fiamma*.

3.2.18 Per effettuare un calcolo di equilibrio chimico occorre quindi specificare, oltre ai valori di una coppia di variabili di stato (in linea di principio qualsiasi), le proporzioni delle specie chimiche reagenti, per esempio la concentrazione (in frazioni molari o di massa) dei differenti reagenti, od il loro numero di moli. Può anche essere sufficiente assegnare il numero di moli dei diversi atomi contenuti nei reagenti (che, tra l'altro, si conserva nella reazione, in quanto gli atomi non vengono né creati né distrutti da essa), come si vedrà dall'esempio seguente.

3.2.19 Considerando la reazione di combustione cherosene/aria (dove il primo è al solito approssimato come una miscela di 89% *n*-decano e 11% toluolo – in massa), si calcola facilmente il numero di moli dei singoli elementi che partecipano alla reazione, in funzione del rapporto di equivalenza. (Tra l'altro, si determina facilmente il valore del rapporto combustibile/aria stechiometrico). Specificare il numero di moli di *atomi* è sufficiente (tranne casi particolari, di scarso interesse pratico) a risalire alla composizione dei reagenti in termini di numero di moli delle diverse *specie chimiche*. Considerando ad esempio tra i possibili reagenti anche eptano ed ottano, il bilancio degli atomi di carbonio ed idrogeno si scrive come indicato, dove, assunta una mole di toluolo, il numero di moli degli altri combustibili ipoteticamente presenti, per ora incognito, è stato indicato con α , β , γ . La soluzione del sistema porta a $\alpha = \beta = 0$, quindi l'unica altra specie combustibile presente, oltre al toluolo, può essere lo *n*-decano. Questa evenienza è evidentemente legata al fatto che ogni idrocarburo è caratterizzato da un suo valore del rapporto tra atomi di idrogeno e carbonio, H/C. Un'indeterminazione si potrebbe avere nel caso in cui fosse presente una specie con lo stesso rapporto H/C di una delle specie ipotizzate, ad es. un ipotetico C₅H₁₁ (stesso H/C dello *n*-decano), che però non esiste in realtà. Una situazione simile potrebbe aversi per l'ossidante; specificare il solo numero di moli dell'elemento ossigeno non permette di accertare se l'ossidante è ossigeno molecolare O₂, ossigeno atomico O, oppure ozono O₃. Tuttavia, un semplice calcolo di equilibrio permette di accertare che le concentrazioni di O e O₃ sono assolutamente insignificanti alle temperature di interesse.

3.2.20 Sviluppiamo ora un esempio relativo alla combustione (supposta in equilibrio) di cherosene ed aria nelle condizioni del motore CF6–50 al decollo, sotto l'ipotesi che il rapporto *A/F* globale del combustore valga 50 (la zona primaria deve ovviamente essere più ricca), che corrisponde ad un rapporto di equivalenza di poco inferiore a 0,3. Dovendo individuare i valori della coppia di stato (*p*, *h*), della quale solo prima grandezza è al momento nota, occorre calcolare l'entalpia in funzione della composizione della miscela reagente (che si ricava subito dal valore di *A/F*) e delle entalpie di combustibile ed ossidante alle loro relative temperature. Avendo determinato il numero di moli di atomi in corrispondenza al valore di φ considerato, si possono calcolare tali entalpie mediante il codice di equilibrio chimico STANJAN; successivamente adotteremmo lo stesso codice per ricavare le condizioni di combustione adiabatica.

3.2.21 Cominciamo a determinare l'entalpia del combustibile, alla sua temperatura *T_f* di iniezione in camera. All'avvio il codice STANJAN chiede se si vogliono ricevere istruzioni; la risposta negativa

può essere data semplicemente premendo il tasto <enter/invio>. Il codice chiede poi il nome di un file che contenga i dati termochimici delle specie considerate, che nel caso in questione è jetaair.dat (scaricabile da <http://dma.ing.uniroma1.it/STAFF/lentini/lentini.html>); segue quindi la lettura dei dati per queste specie ($N = 16$ nell'esempio citato).

3.2.22 Il codice chiede quindi conferma della correttezza del file dati specificato (rispondere <y>), e quindi quale opzione utilizzare. Di queste ne esistono due, una (<r>) che prevede di specificare il numero di moli delle *specie chimiche* reagenti, ed un'altra (<p>) che prevede di specificare il numero di moli degli *elementi*, o atomi, (uguali per reagenti e prodotti, come già osservato); scegliamo quest'ultima opzione. A questo punto il codice riporta tutte le specie delle quali sono stati caricati i dati termochimici, e chiede di specificare quali sono attualmente presenti nella miscela allo studio; nel nostro caso (ricordiamo che intendiamo determinare l'entalpia del combustibile) indichiamo perciò toluolo ed *n*-decano. Successivamente il codice riporta nuovamente le specie disponibili, e chiede di specificare se alcune di queste sono presenti in un'altra fase, che non è il nostro caso, per cui diamo risposta negativa. Il codice chiede quindi il numero di moli di ciascuno elemento.

3.2.23 STANJAN quindi ricapitola i dati forniti, e chiede di specificare una coppia di variabili di stato per effettuare il calcolo di equilibrio.

3.2.24 Nel nostro caso vogliamo determinare l'entalpia del combustibile, che è funzione della sola temperatura, per cui possiamo scegliere una qualsiasi opzione in cui è presente la T (l'altra variabile è ininfluente). Scegliamo p. es. l'opzione 1 (T, p specificate). Occorre quindi specificare la temperatura, per la quale diamo appunto la T_f ipotizzata, e la pressione, che però abbiamo detto essere ininfluente; specifichiamo il valore della pressione in camera (ma un qualsiasi altro valore porterebbe alla stessa entalpia). Il codice STANJAN formula quindi una serie di domande alle quali si può dare risposta negativa, ed infine riporta il risultato del suo calcolo.

3.2.25 Di esso in questo caso ci interessa solo il valore dell'entalpia del combustibile (miscela toluolo/*n*-decano), -1,4954 MJ/kg. Si noti che il valore negativo è dovuto evidentemente al fatto che le entalpie di formazione di toluolo ed *n*-decano sono negative, ovvero sia che queste specie si formano a partire dagli elementi idrogeno e carbonio con *rilascio* di calore, vedi 3.2.12.

3.2.26 Riportiamo ora (tralasciando le parti inessenziali) l'analogo calcolo per la determinazione dell'entalpia dell'ossidante. Occorrerà quindi specificare come specie presenti l'ossigeno e l'azoto molecolari.

3.2.27 Occorre poi specificare il numero di moli degli elementi, e la temperatura dell'ossidante T_o , come indicato per il motore CF6-50 al decollo.

3.2.28 Il risultato del calcolo indica un'entalpia dell'ossidante di 585,12 kJ/kg, evidentemente positiva perchè i termini di formazione sono ovviamente nulli per O_2 ed N_2 , mentre il termine sensibile è sicuramente positivo (essendo la temperatura più alta del valore di riferimento, 298,15 K). Inserendo i valori di h_f ed h_o così determinati nell'espressione dell'entalpia della miscela, vedi 3.2.20, questa viene quindi individuata.

3.2.29 Possiamo ora procedere al calcolo delle condizioni di combustione adiabatica in equilibrio. In

questo caso, quando STANJAN chiede di specificare le specie da considerare nel sistema reagente, possiamo includere tutte le specie chimiche i cui dati termochimici sono riportati nel file dati; per far questo basta rispondere con un'asterisco <*>. Bisogna poi ovviamente specificare le moli di tutti gli elementi presenti

3.2.30 Per effettuare un calcolo di combustione adiabatica, occorre come detto effettuare un calcolo a (p, h) assegnate, e perciò scegliere l'opzione 5, e successivamente specificarne i valori; in particolare il valore dell'entalpia è calcolato secondo la procedura indicata sopra. Il codice chiede anche una prima stima della temperatura finale raggiunta; tale valore non influenza affatto il risultato finale, ma serve semplicemente come primo valore dal quale far partire una procedura iterativa che arriva infine al valore di T_{af} . Per quanto appunto ininfluenza, è bene però scegliere un valore ragionevole; qui diamo 2000 K, ma si sarebbero potuti indifferentemente specificare p. es. 1000 K oppure 3000 K (ma magari non 300 K o 6000 K).

3.2.31 Il codice a questo punto produce la sua uscita; per ogni specie sono riportate nelle quattro colonne di dati le seguenti grandezze: 1) frazione molare delle specie nella fase considerata (gassosa), 2) frazione molare della specie nella miscela (che differisce dalla precedente se c'è anche una fase condensata – cioè solida o liquida, ma non è questo il nostro caso), 3) la frazione di massa della specie nella miscela, 4) il numero di moli delle varie specie corrispondenti al numero di moli di elementi specificate nell'input. Sono anche riportate massa molare, temperatura adiabatica di fiamma, volume specifico (la densità è il suo inverso), energia interna, entalpia (che ovviamente è uguale a quella data in input), ed entropia della miscela.

3.2.32 Dall'uscita del caso appena calcolato si può vedere che tra i prodotti di combustione sono presenti alcune specie che possiamo classificare come incombusti, la cui somma delle concentrazioni (in termini di frazioni di massa) risulta però estremamente bassa. Se si ripetesse lo stesso calcolo per combustione stechiometrica (che si ha per $A/F = 14,8$), alla quale corrisponde ovviamente una temperatura adiabatica di fiamma sensibilmente più alta, si troverebbe che la concentrazione di incombusti è molto più alta (oltre mille volte). I calcoli considerati sono in equilibrio; in realtà, per effetto della chimica a velocità finita, le concentrazioni di incombusti sono sicuramente maggiori. Quello che tuttavia è il caso di sottolineare è che la percentuale di incombusti è elevata per reazione stechiometrica (cioè nella zona primaria del combustore), e che la successiva diluizione dei prodotti nelle zone intermedia e di diluizione del combustore permette di abbassare notevolmente il contenuto di incombusti, migliorando in tal modo il rendimento di combustione η_b .

3.2.33 Nel precedente calcolo in equilibrio delle condizioni di combustione adiabatiche in camera abbiamo supposto che l'azoto si comportasse come un inerte. Volendo invece includere la chimica dell'azoto (sempre in equilibrio), occorre aggiungere alle specie chimiche sin qui considerate anche quelle derivanti da reazioni che coinvolgono l'azoto, come in particolare azoto atomico N, monossido d'azoto NO, biossido d'azoto NO₂, protossido d'azoto N₂O; un file dati per STANJAN che include tali specie è quello denominato jetaairn.dat. Tale file riporta i dati per 20 specie, occorre quindi utilizzare la versione *large* di STANJAN, denominata STANJANL. Ripetendo il calcolo precedente, sempre per $A/F = 50$, occorre allora specificare il file dati citato.

3.2.34 Occorre poi nuovamente specificare tutte le specie di interesse (basta ancora un $\langle * \rangle$), le moli di atomi, e l'opzione 5 (P , h assegnate).

3.2.35 L'output del codice dà quindi in particolare le concentrazioni di tutte le specie nei prodotti, incluse quelle delle specie azotate: si vede che la specie presente in maggiore concentrazione (dopo ovviamente lo N_2) è il monossido d'azoto, circa lo 0,129% in frazione molare (0,134% in massa).

3.2.36 Dall'analisi dei risultati precedenti si evince che considerare la chimica dell'azoto ha un impatto minimo dal punto di vista energetico (la temperatura adiabatica di fiamma si abbassa di soli 3 K). Tuttavia, in realtà la chimica dell'azoto è alquanto lenta, per cui in effetti le concentrazioni di ossidi di azoto saranno (fortunatamente) ben lontane da quelle di equilibrio. Non ha quindi senso calcolarne la concentrazione in equilibrio.

3.2.37 Analizziamo ora in maggior dettaglio le caratteristiche della combustione nei due regimi limite citati precedentemente, vedi 3.2.1. In una fiamma laminare premiscelata (quindi evidentemente sia combustibile che ossidante si trovano allo stato gassoso) la velocità di propagazione della fiamma è una proprietà determinata dai fenomeni di cinetica chimica e di diffusione (in particolare conduzione di calore). Per una miscela stechiometrica cherosene/aria alla pressione atmosferica, il valore della velocità di propagazione laminare S_L è intorno ai 0,43 m/s. Più in generale, essa dipende dalla composizione della miscela (combustibile/ossidante), dal relativo rapporto di equivalenza, dalla pressione, e dalla temperatura iniziale della miscela; i valori tipici sono comunque intorno ai 0,3 – 0,4 m/s (fa eccezione l'idrogeno, con valori intorno ai 2,5 m/s). Se supponiamo di avere flusso laminare di una miscela combustibile/aria in un condotto, alla velocità u , possono verificarsi tre evenienze: 1) se $u = S_L$ la fiamma laminare rimarrà in una posizione fissa nel tubo; 2) se $u > S_L$ la fiamma sarà progressivamente trascinata dal flusso verso l'uscita del tubo, dando luogo al cosiddetto *flameout*; se $u < S_L$ la fiamma risale entro il tubo (*flashback*).

3.2.38 Abbiamo però visto che nei combustori la combustione è sicuramente turbolenta. Il fronte di fiamma allora, anziché essere piano come nel caso precedente, sarà fortemente corrugato, presentando perciò un'area molto maggiore di quella della sezione del combustore. Poiché in ogni punto del fronte la fiamma si propaga con velocità S_L , la fiamma nel suo insieme consumerà una quantità di miscela fresca molto maggiore di quanto farebbe una fiamma piana, per cui la velocità apparente di avanzamento della fiamma, o velocità della fiamma turbolenta $S_T = \dot{m}_{bruciata}/(\rho A)$ sarà di gran lunga maggiore di quella laminare. Essa aumenta con l'aumentare dell'intensità della turbolenza, definita come rapporto tra lo scarto quadratico medio (rms, *root mean square*) delle fluttuazioni di velocità, e la velocità media.

3.2.39 Nelle fiamme nonpremiscelate il fattore che controlla la combustione è la diffusione reciproca del combustibile nell'ossidante; la combustione infatti può aversi solo laddove i due reagenti si sono mescolati fino ad arrivare ad una composizione circa stechiometrica. In questo caso non esiste una velocità intrinseca di propagazione della fiamma, e la fiamma rimane ancorata dove combustibile ed ossidante entrano in contatto, permettendo quindi una combustione più stabile e sicura. Se combustibile ed ossidante sono entrambi in forma gassosa si parla di fiamme omogenee, se invece il combustibile è in forma condensata (liquido o solido) si parla di combustione eterogenea.

3.2.40 In una fiamma a getto (*jet flame*) il combustibile viene iniettato attraverso un ugello di diametro D_j nell'aria ambiente, oppure in una corrente coassiale di ossidante. Se il numero di Reynolds del getto $Re_j = \rho_f u_f D_j / \mu_f$ è basso, la fiamma risulta laminare, e la sua lunghezza va aumentando all'aumentare della velocità u_f con il quale in combustibile è iniettato nell'ossidante (e quindi anche di Re_j). Oltre $Re_j \simeq 8000$ l'estremità della fiamma comincia a diventare turbolenta; aumentando ulteriormente Re_j la lunghezza della fiamma inizialmente si riduce un poco, poi rimane sensibilmente costante, mentre aumenta la frazione della lunghezza della fiamma in cui il moto è turbolento.

3.2.41 In una fiamma eterogenea, prima di potersi avere la combustione occorre che il combustibile evapori, e quindi si mischi con l'ossidante. Il processo di evaporazione è alimentato dal calore scambiato dai prodotti caldi con le goccioline fredde, il quale serve per il riscaldamento e per fornire il calore latente di evaporazione. Ovviamente, per effetto dello scambio di calore la temperatura delle goccioline T_d (dove d sta per *droplets*, goccioline) aumenta, mentre per effetto dell'evaporazione il diametro D_d si riduce progressivamente.

3.3.1 Per avere un alto rendimento di combustione η_b occorre che il tempo di residenza del combustibile in camera sia sufficiente a completare i processi di evaporazione, miscelamento con l'ossidante, e reazione chimica. Quindi il tempo di residenza dovrà essere maggiore della somma dei tempi di evaporazione, miscelamento e reazione chimica. Normalmente questi ultimi tre tempi non sono dello stesso ordine di grandezza, per cui il tempo determinante al fine di assicurare la completezza della combustione sarà il più lungo dei tre. Possono anche verificarsi situazioni in cui due tempi sono circa dello stesso ordine di grandezza (mentre il terzo è molto minore), per cui risultano entrambi controllanti. Quale sia il tempo controllante dipende dalle condizioni operative (*idle*, ossia funzionamento al minimo, decollo, salita, crociera, avviamento o *start-up*).

3.3.2 Analizziamo separatamente la dipendenza dei tre tempi citati dalle condizioni operative. Il tempo di evaporazione dipende dalle dimensioni delle gocce, dall'intensità della turbolenza, e dalla pressione in camera. Per quanto riguarda il diametro, occorre osservare che un iniettore genera uno *spray* di goccioline con una distribuzione di diametri. Per individuare un diametro rappresentativo, si adotta il diametro medio di Sauter o SMD, definito come rapporto tra la sommatoria del prodotto (numero di goccioline di diametro D_i) $\times (D_i^3)$, diviso l'analoga sommatoria (numero di goccioline di diametro D_i) $\times (D_i^2)$; la sommatoria è estesa su tutti i possibili diametri delle goccioline. Possiamo quindi dire che il diametro medio di Sauter è il diametro di una gocciolina che ha lo stesso rapporto volume/area dello *spray* considerato.

3.3.3 La figura indica chiaramente come il tempo necessario per avere completa evaporazione delle goccioline decresce al diminuire delle dimensioni delle goccioline stesse.

3.3.4 I tre pannelli della figura, relativi a tre diversi valori della pressione, evidenziano che in ogni caso si ha una diminuzione del tempo necessario a far evaporare le goccioline all'aumentare dello scarto quadratico medio della velocità, quindi dell'intensità della turbolenza. All'aumentare della pressione, il tempo di residenza necessario per la evaporazione della goccioline resta invariato se $u' = 0$, cioè se la combustione è laminare, ma in presenza di turbolenza si vede che il tempo di residenza necessario per l'evaporazione diminuisce con p_3 . L'evaporazione può quindi diventare il fattore controllante a

bassi valori di p_3 , tipicamente all'avviamento.

3.3.5 Vediamo ora il tempo di miscelamento, che può essere preso, sulla base di semplici considerazioni di ordine dimensionale, inversamente proporzionale al tasso di miscelamento (di combustibile ed aria, per combustione nonpremiscelata, oppure di miscela combustibile/aria e prodotti caldi, che accendono la miscela fresca, per combustione premiscelata). Ricordiamo che l'espressione del flusso diffusivo (per unità di area) nell'equazione delle specie è $\rho D_i \partial Y_i / \partial x_k$, dove ρD_i è quindi il coefficiente di diffusione. Possiamo perciò esprimere il tasso di miscelamento come il prodotto di un coefficiente di diffusione, un'area, ed un gradiente di concentrazione. Per ricavare una stima dell'ordine di grandezza di questi tre fattori, ricorriamo a semplici considerazioni di ordine dimensionale, facendo riferimento a valori tipici delle grandezze entro il combustore. Per quanto riguarda il coefficiente di diffusione, esso ha dimensioni $[\rho D_i] = [(\dot{m}/A)/(\partial Y_i/\partial x_k)] = [\rho u l]$ (la concentrazione è adimensionale); notiamo che in un flusso turbolento la diffusione dovuta alla turbolenza è estremamente più efficace di quella molecolare (dovuta cioè all'agitazione termica delle molecole), per cui il suo valore sarà legato ai valori della velocità del flusso. Possiamo per esempio prendere come valore rappresentativo il valore della velocità u_j del getto d'aria che entra attraverso le perforazioni del *liner*; chiamato poi $\rho = \rho_3$ la densità del flusso d'aria in ingresso, ed l una dimensione caratteristica del combustore, si ha che il coefficiente di diffusione (turbolenta) ha un ordine di grandezza dato da $[\rho u_j l]$. Per l'area avremo ovviamente un ordine di grandezza $[l^2]$, e per il gradiente di concentrazione $[1/l]$. Si arriva quindi a poter assumere la portata di miscelamento proporzionale a $[\rho_3 u_j l]$. In questa espressione possiamo a sua volta esprimere ρ_3 attraverso l'equazione di stato; per la velocità del getto d'aria ricorriamo in prima approssimazione all'equazione di Bernouilli, vedi 3.1.13. Nella conseguente espressione della portata di miscelamento è conveniente far comparire il rapporto tra caduta di pressione attraverso il *liner* e pressione all'ingresso del combustore, il quale si mantiene sensibilmente costante per un dato disegno (con valori dell'ordine di pochi %). Quindi, fissati T_3 , l e $\Delta p_{liner}/p_3$, si ricava che la portata di miscelamento è direttamente proporzionale alla pressione in camera, e quindi il tempo di miscelamento è inversamente proporzionale ad essa. Va osservato che in effetti al variare di p_3 (cioè del rapporto di compressione β_o) varia anche la T_3 , ma secondo una dipendenza piuttosto debole, $T_3 \propto \beta_o^{(\gamma-1)/\gamma}$; poiché poi la T_3 compare sotto radice quadrata, la dipendenza di \dot{m}_{mix} , e quindi t_m dalla variazione di T_3 dovuta a variazioni del rapporto di compressione risulta alquanto limitata, ed in prima approssimazione trascurabile nell'ambito di questa trattazione intesa solo a trovare un ordine di grandezza del tempo di miscelamento.

3.3.6 In modo simile a quanto visto sopra, si può assumere il tempo caratteristico dei processi chimici sia inversamente proporzionale alla quantità di combustibile che riesce a bruciare nell'unità di tempo. Se questo tempo caratteristico risulta essere il fattore controllante, ovverosia è molto più lungo degli altri, vuol dire che le reazioni sono lontane dall'equilibrio, per cui possiamo trascurare il termine *backward* ed esprimere il tasso di formazione (in senso algebrico, il combustibile ovviamente viene distrutto in camera) del combustibile come indicato, dove per la maggior parte delle reazioni $m_k = 2$. Fissate temperature e concentrazioni, risulta quindi una dipendenza di w_i da ρ^2 , che a sua è proporzionale al quadrato della pressione in camera. In realtà i dati sperimentali rivelano che un migliore accordo si ottiene se si assume un esponente lievemente più basso; ciò è dovuto al fatto che

all'aumentare della pressione le reazioni *backward* assumono progressivamente maggior importanza. In ultima analisi, si può indicativamente ipotizzare $t_c \propto 1/p_3^{1,75}$.

3.3.7 Poiché $t_c \propto 1/p_3^{1,75}$, mentre $t_m \propto 1/p_3$, l'andamento qualitativo dei tempi citati in funzione della pressione in camera è indicativamente come riportato in figura, con il tempo chimico che risulta controllante per pressioni in camera sotto i 100 kPa, ed il tempo di miscelamento che diventa controllante per pressioni sopra i 300 kPa; ci sarà poi una regione intermedia nella quale i due tempi risultano circa dello stesso ordine di grandezza. Il tempo di evaporazione, se il combustibile è efficacemente atomizzato (ridotto in goccioline di piccolo diametro), risulta in genere più breve dei precedenti (ma all'avviamento del motore le cose possono andare diversamente, a causa della bassa temperatura dell'aria in camera).

3.3.8 Possiamo quindi dire che la combustione è tanto più completa quanto è piccolo il tempo controllante (cioè il più lungo dei tre considerati), relazione che possiamo mettere nella forma di una proporzionalità inversa tra rendimento di combustione e tempo controllante. Abbiamo appena visto che in genere per $p_3 < 100$ kPa il tempo controllante è $t_c \propto 1/p_3^{1,75}$, mentre per $p_3 > 300$ kPa il tempo controllante è $t_m \propto 1/p_3$; se dunque grafichiamo η_b in termini di un *parametro di carico* in cui compare $p_3^{1,75}$, si avrà che per $p_3 < 100$ kPa l'andamento è rettilineo, mentre per $p_3 > 300$ kPa segue un esponente circa 0,57; per pressioni intermedie si avrà un raccordo tra i due rami di curva. Possiamo dunque pensare che nel tratto per $p_3 < 100$ kPa, dove la chimica è il fattore controllante, quello che determina la completezza della combustione è la velocità delle reazioni nella zona primaria. La combustione è tanto più completa quanto maggiore è la pressione, finché non si arriva ad una situazione nella quale la combustione è praticamente in equilibrio, e la sua completezza è limitata solo dagli incombusti necessariamente presenti in questa situazione. Per pressioni superiori quindi la combustione è prossima all'equilibrio; nella diluizione (nelle zone intermedie e di diluizione, globalmente indicate come 'zona secondaria') dei prodotti formati nella zona primaria, la dissociazione regredisce per effetto dell'abbassamento di temperatura, avvicinando perciò η_b all'unità. Nel modo in cui è stata ricavata, il primo tratto di curva dovrebbe in teoria scendere fino a pressione nulla, ma vedremo subito che ciò non è possibile.

3.3.9 Infatti, i limiti di infiammabilità, vedi 3.2.4, impediscono la combustione al disotto di una certa pressione, qualunque sia il rapporto di equivalenza (ma questa pressione limite per il cherosene è circa 7,5 kPa, che equivale alla pressione ambiente a circa 18000 m di quota, al disopra quindi delle possibilità degli aerei civili). Più importante è invece il fatto che al diminuire della pressione in camera il tasso di rilascio di calore, dato da $w_i Q_f$, dove w_i è (in modulo) il tasso di formazione del combustibile e Q_f il suo potere calorifico, diminuisce come la potenza 1,75 della pressione; una parte di questo calore rilasciato sarà scambiato con le pareti del *liner*, e questa perdita di calore (principalmente per convenzione) varia molto poco con la pressione. Al diminuire di p_3 si arriverà dunque ad una situazione in cui il calore scambiato con le pareti eguaglia quello generato, e la fiamma allora si spegne. Inoltre, al diminuire di p_3 i tempi di evaporazione diventano più lunghi, vedi 3.3.4, riducendo quindi ulteriormente la completezza della combustione e con essa il rilascio di calore. Il risultato di questo è che al disotto di una certa pressione ambiente (ossia al disopra di una certa quota) non è più possibile riaccendere il motore in volo. La curva riporta un andamento tipico

effettivo della curva riportata, per il caso ideale, in 3.3.8; si noti che essa non passa appunto per l'origine ($p_3 = 0$).

3.3.10 Per avere un alto rendimento di combustione bisogna perciò avere un *liner* abbastanza lungo, in modo da aumentare il tempo di residenza in camera (ma occorre trovare un compromesso, per che un *liner* troppo lungo comporta un aumento di peso, vedi 3.1.3). Si deve inoltre cercare di contenere la quantità di aria utilizzata per il raffreddamento del *liner*; infatti l'aria fredda (relativamente fredda, in quanto è quella che esce dal compressore) utilizzata per il raffreddamento ostacola la combustione del combustibile che diffonde nello strato limite, abbassando in tal modo η_b . Se allora i fori di iniezione dell'aria di raffreddamento sono molto spazati, la miscela aria/combustibile che lambisce la parete subisce un notevole incremento di temperatura tra un foro e l'altro; poiché in ogni caso tale temperatura non può superare i limiti dettati dalla resistenza del materiale delle pareti del *liner*, bisognerà allora abbassare considerevolmente la temperatura dello strato limite in corrispondenza ad ogni foro, per consentire al fluido di arrivare fino al foro successivo con una temperatura ancora accettabile; questo richiede l'utilizzo di una quantità notevole di aria. Se invece i fori sono più vicini, sarà necessario un raffreddamento minore, e quindi anche un quantitativo di aria minore, con un minore effetto negativo sulla combustione. L'ideale sarebbe avere aria immessa con continuità attraverso la parete del *liner*, situazione che è approssimata nel raffreddamento per traspirazione, vedi 3.1.17.

3.4.1 La reazione di fotosintesi trasforma la CO_2 atmosferica e l'acqua in carboidrati più ossigeno. Questi sono convertiti in grassi dalle piante (in questo caso i grassi si accumulano nei semi, come si può facilmente vedere in particolare nel caso delle olive e della frutta a guscio – noci e simili) e negli animali. Poiché nei grassi $(\text{CH}_2)_n\text{O}_m$ l'indice m è in genere molto minore di n , la composizione dei grassi è prossima a $(\text{CH}_2)_n$, ed in ogni caso il rapporto fra numero di atomi di idrogeno e carbonio è prossimo a due (ed in effetti negli idrocarburi liquidi si riscontrano valori in genere intorno a 2).

3.4.2 Gli idrocarburi sono miscele complesse di diverse famiglie di specie. Le paraffine (dette anche idrocarburi alifatici) sono idrocarburi a catena diritta, in cui gli atomi di carbonio sono tutti allineati tra loro. Ciascun atomo di carbonio (tetravalente) scambia una valenza con l'atomo di carbonio che lo precede ed una con quello che lo segue nella catena, ed altre due valenze con atomi di idrogeno (monovalente) posti sui due lati della catena; alle estremità, altri due atomi di idrogeno terminano la catena, per cui, indicato con n il numero di atomi di carbonio, la formula è del tipo $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$. Nella famiglia delle isoparaffine (o idrocarburi isoalifatici) uno degli atomi laterali di idrogeno (per n maggiore o uguale a 3) è sostituito da un gruppo CH_3 (quindi con una valenza libera), dando luogo ad un composto con la stessa formula di una paraffina, ma con una differente struttura; si ha per esempio l'iso-butano $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$, da distinguere dal normal-butano $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$. Per n maggiore o uguale a 5 si possono avere ulteriori ramificazioni. Questi idrocarburi ramificati hanno in genere migliori proprietà lubrificanti (ed i greggi che ne contengono un'alta percentuale hanno perciò una quotazione economica più alta). Nella famiglia delle cicloparaffine la catena dell'idrocarburo, anziché essere chiusa dai due atomi di idrogeno, è chiusa su se stessa ad anello, per cui la formula è C_nH_{2n} . Infine, nella famiglia degli idrocarburi aromatici, per esempio nel benzene C_6H_6 , gli atomi di carbonio sono disposti in una struttura ad anello, in cui ciascun atomo di carbonio scambia con quello che

lo precede un legame semplice, e con quello che lo segue un legame doppio, per cui rimane un solo legame libero per un atomo di idrogeno.

3.4.3 La composizione del petrolio risulta fortemente dipendente dal particolare pozzo considerato; esso è prevalentemente di origine animale. Riportiamo qui la composizione tipica del cherosene. Osserviamo che le componenti paraffiniche presentano un rapporto tra atomi di idrogeno e carbonio uguale (le cicloparaffine) o superiore a 2, non formano depositi carboniosi sul *liner*, e formano poco *soot*. I componenti aromatici hanno un H/C prossimo ad uno, formano molto *soot*, vedi 4.3.6, e sono piuttosto aggressivi verso le gomme (per cui attaccano le guarnizioni dell'impianto di alimentazione del combustibile); il loro contenuto massimo è quindi fissato dalle norme, a secondo del tipo di combustibile. Risultano inoltre igroscopici, con conseguenti problemi, vedi 3.4.5.

3.4.4 La tabella riporta, per alcuni idrocarburi, la massa molare, il calore di vaporizzazione (energia necessaria a fare evaporare un kg di combustibile), il potere calorifico, la composizione della miscela stechiometrica (in percentuale di combustibile presente nella miscela combustibile/aria), i limiti di combustione (una miscela combustibile/aria si accende solo se la sua composizione spazia in un limitato campo attorno alle condizioni stechiometriche, vedi 3.2.4; qui i limiti sono indicati in percentuale rispetto al valore stechiometrico), la temperatura di ignizione (accensione) di una miscela (stechiometrica) combustibile/aria, e la relativa temperatura adiabatica di fiamma (ancora per composizione stechiometrica). Si noti che se invece la combustione avviene con scambio di calore (come p. es. nella caldaia di un impianto a vapore, dove i fumi caldi cedono calore a tubi in cui scorre acqua) la temperatura che si raggiunge è inferiore; la temperatura adiabatica di fiamma è quindi la massima temperatura raggiungibile nella combustione. Nella combustione di una mole di idrogeno (di massa 2,016 g) viene rilasciata un'energia pari a 242 kJ, per cui la quantità di energia rilasciata per unità di massa di idrogeno risulta 120,1 MJ. L'analogia grandezza per il carbonio (massa molare 12,01115) contenuto nel combustibile è 32,75 MJ se esso si ossida a CO₂, quindi molto inferiore a quella sviluppata da un'analogia massa di idrogeno. Ne segue che combustibili con rapporto H/C alto avranno potere calorifico alto, mentre quelli con H/C bassa (aromatici) hanno potere calorifico più limitato. Si noti che se il carbonio si ossida solo a CO, il rilascio di calore è molto più limitato

3.4.5 Il combustibile può contenere diversi contaminanti. Tra essi le gomme, che si formano nel combustibile per ossidazione sotto l'effetto, tra l'altro, della luce solare, e che possono intasare i filtri delle linee di alimentazione. L'acqua, che inevitabilmente è presente nei giacimenti, presenta una certa solubilità nell'idrocarburo per cui è sempre presente nel combustibile. Tale solubilità diminuisce con il diminuire della temperatura, per cui quando l'aereo sale in quota (ove la temperatura è più bassa) una parte dell'acqua in soluzione si separa e forma ghiaccio che anch'esso può intasare i filtri. L'acqua comunque può anche essere presente in *lumps*, ammassi. Lo zolfo come abbiamo detto viene per quanto possibile eliminato in raffineria. Il sodio è presente in particolare come cloruro di sodio nei petroli estratti da pozzi nel mare; nel processo di combustione dà acido cloridrico, corrosivo. Anche il vanadio, che condensa a 922 K formando depositi sulle pale della turbina, esercita un'azione corrosiva. Il contenuto di sedimenti e ceneri è invece irrilevante per il cherosene (è importante invece per altri combustibili).

3.4.6 Al combustibile vengono aggiunti alcuni additivi allo scopo di prevenire la formazione di gomme, ruggine (si aggiungono opportuni idrocarburi), ghiaccio (glicerolo), il verificarsi di scariche elettriche (aggiungendo un additivo che aumenta la conducibilità elettrica del combustibile, scaricando in tal modo l'elettricità statica), di migliorare le proprietà lubrificanti (ancora aggiungendo opportuni idrocarburi), ed infine additivi intesi a prevenire la formazione di materiale biologico come lieviti e muffe, che possono intasare i filtri (tali biocidi tendono a raccogliersi nell'acqua che può formarsi sul fondo dei serbatoi e depositi; essendo tossici, tale acqua va opportunamente trattata). Esistono in teoria alcuni additivi che riducono la formazione di fumo, ma non sono utilizzati perché portano ulteriori problemi.

3.4.7 I combustibili di impiego aeronautico si classificano in due gruppi, quelli che sono essenzialmente cherosene, e quelli che sono una miscela di cherosene e benzina, quindi più volatili perciò più adatti all'impiego in climi freddi, come può essere richiesto in particolare ad aerei militari. I combustibili per uso civile sono contraddistinti dalla sigla *Jet*, quello per impiego militare dalla sigla *JP* (*Jet Propellant*). A seconda delle specifiche richieste, ne esistono diversi tipi. Quelli per impiego civile sono il Jet-A, il Jet-A1 ed il Jet-B, quest'ultimo impiegato in climi particolarmente freddi. Il Jet-A, impiegato nei soli voli interni negli Stati Uniti, presenta un punto di congelamento di -40 C; per voli transoceanici, in particolare su rotte polari, è più indicato il Jet-A1, che ha un punto di congelamento più basso. Si ricordi che la temperatura nella tropopausa, secondo le tabelle ICAO, è mediamente di -56,5 C = 216,65 K (ma può risultare localmente, od occasionalmente, più bassa). Per un aereo che vola p. es. a $M_0 = 0,8$, la temperatura della'aria a contatto con la fusoliera (e quindi i serbatoi) sarà circa pari (in realtà un po' inferiore per effetto della conduzione termica) alla temperatura totale $T_0 = T\{1 + [(\gamma - 1)/2]M_0^2\} = 244 \text{ K} = -29 \text{ C}$. Il Jet-A1 è comunque lievemente più costoso del Jet-A, perché ne sono state esclusi gli idrocarburi con punto di congelamento tra -47 e -40 C. Negli aerei militari si è adoperato per lungo tempo il JP-4, il quale però essendo molto volatile rischia di provocare incendi o addirittura esplosioni nel caso l'aereo sia colpito anche solo dal fuoco di armi leggere. Si cerca perciò di sostituirlo con combustibili più vicini al cherosene, come lo JP-8; negli aerei imbarcati su portaerei si utilizza invece il JP-5, che ha un *flash point* più alto, per diminuire il rischio di incendi a bordo. Il JP-6 è stato sviluppato per il bombardiere supersonico B-70 (peraltro non più sviluppato dopo che il prototipo XB-70 è andato distrutto in un incidente); dovendo questo volare a $M_0 = 3$, si ponevano problemi di riscaldamento aerodinamico, per cui il combustibile doveva possedere una notevole stabilità termica. Anche lo JP-7 è stato sviluppato per un aereo largamente supersonico, lo SR-71.

4. FORMAZIONE DI INQUINANTI E CONTROLLO DELLE EMISSIONI

4.1 Le emissioni di inquinanti dai motori aeronautici coinvolgono due aspetti, un fenomeno di in-

quinamento su scala locale nei pressi degli aeroporti, ed uno derivante dalle emissioni ad alta quota, le quali portano ad effetti su scala globale. Tra gli inquinanti di interesse nel campo aeronautico figurano il particolato (in questo caso *soot*, visibile come fumo), poi gli idrocarburi incombusti, i quali agiscono anche come composti organici volatili, gli ossidi di zolfo, gli ossidi di azoto, ed infine il monossido di carbonio. A questi si aggiungono i contaminanti H_2O e CO_2 .

4.2 Per ridurre le emissioni, possiamo in linea di principio seguire tre linee: 1) pre-trattare il combustibile, nel caso in cui le emissioni nocive siano dovute ad impurità presenti nel combustibile (come avviene per zolfo e ceneri); 2) modificare il processo di combustione in modo da adottare condizioni operative che minimizzino la formazione di inquinanti (che sarebbe la strada preferibile in termini di costo); 3) trattare i fumi per cercare di eliminare quanto possibile gli inquinanti. Per impianti di terra, se le emissioni fossero ancora troppo alte, si può cercare di migliorare la dispersione dei fumi nell'ambiente (per esempio adottando camini alti, o rilasciando gli inquinanti solo quando si verificano condizioni meteorologiche favorevoli alla dispersione – trattenendoli quindi durante le situazioni sfavorevoli), oppure, come soluzione estrema, rilocalizzare l'impianto in una zona dove l'impatto delle emissioni sia minimo (p. es. zona scarsamente popolata, e/o molto ventilata). Queste ultime opzioni tuttavia non implicano una riduzione delle emissioni, ma solo una loro migliore dispersione, o riduzione del loro impatto nocivo, e non hanno quindi effetto su inquinanti o contaminanti il cui effetto dannoso è globale piuttosto che locale (gas che distruggono l'ozono stratosferico e gas di serra), ed effetto ridotto su inquinanti che agiscono a livello regionale (ossidi di zolfo ed azoto, che causano – tra l'altro – piogge acide).

4.3.1 Riportiamo la terminologia adottata per indicare i diversi tipi di particolato. Osserviamo che il termine 'particolato' si riferisce tanto a particelle che a goccioline. Aerosol è il termine più generale. Con smog si intendono quelle particelle o goccioline il cui diametro è prossimo alle lunghezze d'onda della luce ($0,4 - 0,7 \mu m$), per cui esse risultano particolarmente efficaci nel disperderla. Ricordiamo la distinzione tra particolato primario (prodotto direttamente nella combustione) e secondario (prodotto successivamente nell'atmosfera da reazioni che coinvolgono inquinanti primari).

4.3.2 Le particelle primarie includono carbone polverizzato (il carbone utilizzato p. es. nelle centrali elettriche è macinato mediante cosiddetti mulini per ridurlo alla consistenza di una cipria), poi *soot*, che è prodotto nella combustione di tutti gli idrocarburi (si distingue tra particolato, derivante dalla condensazione di vapori, pieno, e cenofere, residui della combustione di gocce, sulla cui superficie vengono a galleggiare le specie a più alto numero di atomi di carbonio, solide; mentre la goccia brucia e si consuma, rimane quindi una crosta solida, vuota), e ceneri, sostanze non combustibili presenti in tutti i carboni (quelle di diametro più piccolo vengono trascinate dai fumi, sono perciò dette volanti, mentre quelle più grandi si depositano sul fondo). Le particelle secondarie si formano nell'atmosfera per reazioni che interessano inquinanti primari come NO_x , SO_x , e i COV (Composti Organici Volatili).

4.3.3 La tabella riporta diverse caratteristiche del particolato in funzione del diametro (riportato in ascissa). Queste comprendono in particolare (seconda fascia dall'alto) la designazione della radiazione di lunghezza d'onda corrispondente al diametro (che quindi viene più efficacemente diffusa),

le designazioni adottate per il particolato a secondo del diametro (terza e quarta fascia), alcune tipi caratteristici di particelle (quinta fascia), e la velocità terminale di sedimentazione (ottava fascia), ossia la velocità di caduta delle particelle alla quale le forze di gravità e di resistenza aerodinamica (dovuta al moto di caduta) si equilibrano.

4.3.4 Le particelle di piccolo diametro, cosiddette fini, sono quelle più pericolose per la salute. Inizialmente si era fissato come indice delle contenuto nell'aria di queste particelle la concentrazione (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) di particelle con diametro inferiore ai $10\ \mu\text{m}$, rilevata attraverso opportuni filtri. Successivamente si è riusciti ad ottenere misure accurate della concentrazione di particelle di diametri più fini (che sono quelle più pericolose) e si è quindi fissato un nuovo standard, relativo a particelle con diametro inferiore ai $2,5\ \mu\text{m}$. Come si vede le particelle più grosse sono filtrate dall'organismo, per cui le particelle respirabili sono solo quelle con diametro minore di circa $3,5\ \mu\text{m}$. Le particelle più sottili, sotto $0,5\ \mu\text{m}$, sono meno pericolose perché sono anche espirate.

4.3.5 Il *soot* è un particolato solido che si forma nella combustione di tutti gli idrocarburi, costituito in massima parte da carbonio, più ridotte quantità di idrogeno, ed eventualmente di ossigeno. Il *soot* contribuisce anche fortemente alla radiazione della fiamma. Infatti, esistono due meccanismi di radiazione, uno per eccitazione di molecole del gas, e successiva de-eccitazione con rilascio di energia sotto forma elettromagnetica (questa radiazione è caratterizzata da frequenze, o equivalentemente lunghezze d'onda, ben definite, per cui si parla di radiazione in bande da gas), ed uno per radiazione da corpo solido (in questo caso *soot*) portato ad alta temperatura, che irradia in uno spettro continuo di radiazione. Nella combustione di idrocarburi (eccetto il metano), in particolare ad alta pressione, il secondo meccanismo è generalmente largamente preponderante, e rende la fiamma gialla e luminosa. Bisogna notare che il *soot*, oltre ad essere un inquinante, rappresenta anche combustibile non utilizzato.

4.3.6 La formazione del *soot* avviene in particolare da idrocarburo a basso rapporto tra numero di atomi di idrogeno e carbonio, ossia con un 'eccesso' di carbonio. Essa avviene secondo linee diverse per idrocarburi paraffinici ed aromatici. Nei primi l'idrocarburo si spezza successivamente in gruppi più semplici, fino ad arrivare alla formazione della specie CH, che poi successivamente dà luogo alla formazione di acetilene. A partire a queste specie (che vengono chiamate precursori del *soot*), comincia la produzione di *soot*. Negli idrocarburi aromatici, oltre al precedente meccanismo, se ne attiva anche un secondo, in cui gli anelli aromatici (ovverosia i sei atomi di carbonio disposti ad anello presenti in queste specie, vedi 3.4.2) si staccano per dare luogo ad una struttura tipo grafite. Le prime particelle che si formano hanno dimensioni dell'ordine del nm, tuttavia esse tendono ad agglomerarsi (per effetto di forze elettrostatiche e di van der Waals) ed a crescere fino ad acquistare diametri dell'ordine del μm . L'accrescimento delle particelle di *soot* è contrastato dall'azione ossidante di O_2 ed OH in particolare. Il *soot* viene quindi principalmente formato nella zona primaria del combustore, ove il rapporto di equivalenza è relativamente alto (e se la combustione avviene in regime nonpremiscelato, si hanno sicuramente zone ove $\varphi \gg 1$); esso poi viene parzialmente consumato per ossidazione nelle zone intermedia e di diluizione. Nella formazione del *soot* comunque hanno più importanza i fenomeni fisici che quelli chimici.

4.3.7 Il *soot* si forma solo in condizioni (globali, se combustione premiscelata, locali se nonpremiscelata) di miscela ricca, per cui si ha un eccesso di combustibile, che non può bruciare. Questo mette a disposizione combustibile per il processo di *sooting*. Come si vede, la frazione di carbonio contenuto nel combustibile convertito a *soot* cresce velocemente oltre $\varphi = 1, 2$, in particolare ad alta pressione. Se la combustione avviene in regime premiscelato, possiamo tenere φ sotto 1,2 e quindi praticamente annullare totalmente la formazione di *soot*; abbiamo tuttavia notato che la combustione premiscelata pura è alquanto difficile da controllare in regime stazionario, per cui si adottano fiamme pilota che portano ad operare in regime parzialmente premiscelato. Se la combustione avviene in regime nonpremiscelato, ci saranno comunque zone ove φ è maggiore del valore limite indicato (sul lato combustibile della fiamma), e quindi si ha in ogni caso formazione di *soot*.

4.3.8 Le emissioni di *soot* aumentano fortemente all'aumentare della pressione operativa per diversi motivi. Innanzitutto, all'aumentare della pressione si allargano i limiti di infiammabilità, vedi 3.2.4, in particolare sul lato ricco della fiamma, il che consente la combustione anche per valori di $\varphi \gg 1$; quindi, attorno ad una gocciolina di combustibile, si estenderà la zona dove la miscela combustibile evaporato/aria può accendersi, in particolare sul lato ricco (cioè vicino alla gocciolina), e ciò comporta un'aumentata produzione di *soot*, vedi 4.3.7. Altri effetti si hanno a seconda del tipo di iniettore utilizzato; in quelli *pressure-swirl* all'aumentare della pressione l'angolo di apertura dello *spray* si riduce, per cui nella zona centrale si hanno rapporti di equivalenza alti che danno forte formazione di *soot*; gli iniettori *airblast* risultano invece meno sensibili alla pressione, ed in ogni caso producono meno *soot* grazie alla migliore atomizzazione del combustibile, che porta le goccioline ad evaporare rapidamente, con successivo rapido miscelamento dei vapori con l'aria e limitata estensione delle zone con φ significativamente maggiore dell'unità.

4.3.9 Vediamo ora le tecniche per il controllo del particolato primario (la formazione di quello secondario può essere contenuta solo limitando le emissioni di NO_x , SO_x e COV). In linea di principio, si può rimuovere il particolato dai fumi (ma questo richiede impianti molto pesanti ed ingombranti, che possono essere utilizzati solo a terra, e che comunque imporrebbero una caduta di pressione inaccettabile in un turbogetto), oppure ancora meglio prevenirne la formazione agendo sul valore del rapporto di equivalenza φ , come appunto si fa nei combustori dei motori aeronautici; questo però, come vedremo, comporta anche interazioni con le emissioni di NO_x e CO. Come già osservato, vedi 4.3.8, una migliore atomizzazione (cioè l'iniezione del combustibile in goccioline di diametro molto piccolo) comporta una riduzione della formazione di *soot*.

4.3.10 Sono qui elencati i principali sistemi di rimozione del particolato, utilizzati negli impianti di terra; nei primi tre si cerca di separare la fase condensata da quella gassosa facendo affidamento su una forza che agisce in modo differente per le due fasi; nei filtri si ha un filtraggio attraverso membrane, e negli ultimi sistemi si catturano le particelle con acqua. In particolare, nelle camere di sedimentazione i fumi carichi di particolato vengono fatti defluire attraverso un condotto di grande sezione, in modo da ridurre la velocità, e quindi consentire tempi di attraversamento della camera piuttosto lunghi, tali da permettere al particolato di sedimentare. L'efficienza di rimozione è però estremamente bassa per particelle fini, meno del 3% per $D = 10 \mu\text{m}$. Nei cicloni l'azione della forza di gravità è sostituita da quella della forza centrifuga; nei precipitatori elettrostatici la forza che guida la separazione delle

fasi è di natura elettrostatica. Questi ultimi due sistemi offrono un'efficacia di rimozione migliore (rispetto alle camere di sedimentazione) per particelle sottili. I filtri trattengono le particelle tramite un tessuto. Nelle torri di lavaggio e negli *scrubber* le particelle fini sono catturate mediante goccioline, che occorre siano di piccolo diametro per catturare efficacemente le particelle. In particolare, nello *scrubber* Venturi il gas viene fatto passare entro un condotto convergente-divergente, dove viene iniettato il liquido (acqua), allo scopo di polverizzarlo finemente grazie all'alta velocità del gas.

4.4.1 I Composti Organici Volatili (COV oppure VOC – *Volatile Organic Compounds*) sono composti organici che presentano un'alta tensione di vapore alla temperatura ambiente, per cui evaporano in quantità significativa nell'aria. In alcuni casi sono tossici o cancerogeni (come il benzene, che causa una diminuzione della produzione di globuli rossi, con conseguente rischio di leucemie; poi il toluolo C_7H_8 e gli xileni tipo $C_6H_4(CH_3)_2$, dannosi al sistema nervoso centrale; gli Idrocarburi Policiclici Aromatici, denotati come IPA oppure PAH – *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*, quali il 3,4 benzopirene $C_{20}H_{12}$, cancerogeno, contenuto anche nel fumo delle sigarette; in questi idrocarburi si hanno più anelli del benzene adiacenti). Tuttavia, nella maggior parte dei casi si tratta di sostanze di tossicità moderata o nulla, ma che suscitano comunque preoccupazione perché promuovono la formazione di ozono, di particolato secondario, ed alcuni di essi contribuiscono anche all'effetto serra, come il metano. Il metano tuttavia è relativamente poco reattivo, per cui viene spesso escluso dal gruppo dei COV (si parla quindi di COV non metanici o COVNM, NMVOC). Le fonti di emissioni principali di COV sono i solventi utilizzati p. es. nelle vernici, i veicoli a motore, e le operazioni di movimentazione dei combustibili. Pur non essendo esattamente equivalenti, si può dire che il termine COV sta nella maggior parte dei casi ad indicare un idrocarburo

4.4.2 I COV promuovono la formazione di ozono, che sappiamo essere nocivo al livello del suolo, in quanto gas fortemente ossidante che può provocare quindi lesioni alle mucose, nonché danni p. es. ai pneumatici, vedi 2.7.5. Vediamo ora i meccanismi attraverso i quali i COV fanno aumentare la concentrazione di ozono nell'atmosfera. Il biossido di azoto derivante dall'ossidazione atmosferica del monossido di azoto emesso dai motori, vedi anche 4.6.6, subisce una reazione fotochimica sotto l'effetto della luce, scindendosi in monossido di azoto ed ossigeno atomico; quest'ultimo si combina con ossigeno molecolare per formare ozono. L'ozono viene infine rimosso ancora dal monossido di azoto. Si noti che la reazione di ricombinazione (2) avviene tramite l'intervento di un terzo corpo, vedi 3.2.15, mentre nella reazione di dissociazione (1) l'energia necessaria a far avvenire la reazione è fornita dal fotone, il quale secondo la meccanica quantistica ha energia pari al prodotto della costante di Planck per la frequenza della radiazione. La concentrazione di ozono nell'atmosfera sarà quindi il risultato della competizione fra queste tre reazioni. In presenza di un COV si aggiungono alle reazioni citate sopra altre reazioni (che non possiamo riportare tutte in dettaglio sia perché comportano numerosi passi, sia perché con il termine COV intendiamo in realtà centinaia di specie chimiche). Possiamo dire che l'effetto complessivo di queste reazioni è quello di portare alla formazione di idroperossido HO_2 , il quale a sua volta può rimuovere NO ossidandolo a NO_2 ; quest'ultima reazione avviene senza intervento dell'ozono, la cui concentrazione perciò sale rispetto al caso di assenza di COV nell'atmosfera. Se in prima approssimazione supponiamo che la reazione (3) sia in equilibrio, l'espressione della sua costante di equilibrio, funzione della sola temperatura,

ci mostra che al diminuire della frazione molare di NO per effetto della reazione (5), e del conseguente aumento di quella di NO₂, deve necessariamente corrispondere un aumento della frazione molare dell'ozono. Si noti che nella relazione di equilibrio la concentrazione di ossigeno molecolare nell'atmosfera si può assumere costante, essendo ben poco influenzata dalla presenza di inquinanti a livello di tracce.

4.4.3 La formazione di particolato secondario si ha principalmente per effetto della presenza in atmosfera di specie come NO_x, SO_x, COV ed ammoniaca NH₃ (la quale è prodotta principalmente da processi biologici come agricoltura e allevamento). In presenza di umidità atmosferica il biossido di azoto e l'anidride solforosa (che nell'atmosfera si ossida ad anidride solforica) si tramutano rispettivamente in acido nitrico ed acido solforico, i quali reagendo con l'ammoniaca presente nell'aria portano alla formazione di nitrato e solfato d'ammonio, i quali sono solidi alla temperatura ambiente e pertanto danno luogo alla formazione di particelle fini. Successivi fenomeni di agglomerazione, vedi 4.3.6, possono portare queste particelle a diametri tali da compromettere la salute e la visibilità. Processi analoghi si hanno in presenza di COV; ancora, non possiamo riportare l'intera gamma di reazioni che si possono avere con le centinaia di specie classificabili come COV, ma possiamo comunque dire che l'effetto della reazione di COV con altre specie presenti nell'atmosfera porta alla formazione di specie meno volatili, che perciò condensano in particelle fini in modo del tutto analogo a quanto visto sopra.

4.4.4 La figura riporta la tensione di vapore p_v in funzione della temperatura T per numerosi composti organici (ma anche per l'acqua, l'anidride solforosa ed il mercurio; quest'ultimo può essere presente in rifiuti solidi urbani). In ogni caso p_v cresce con T . P. es. la tensione di vapore dell'acqua è di circa 0,03 atm a 24 C, mentre sale ad 1 atm a 100 C. La tensione di vapore della maggior parte dei composti organici è invece sensibilmente più alta, p. es. per l'acetone C₃H₆O è di circa 0,21 atm a 24 C, e raggiunge 1 atm a circa 57 C. Il comportamento di un liquido contenuto in un recipiente aperto all'aumentare della temperatura è dunque il seguente: per T tale che $p_v(T) < p_{atm}$ si ha una lenta evaporazione, per T tale che $p_v(T) = p_{atm}$ si ha ebollizione con un tasso di cambiamento di fase che dipende dal tasso con cui viene fornito calore (infatti per far evaporare un kg di liquido occorre fornire una quantità di calore pari al calore latente di evaporazione), per T tale che $p_v(T) > p_{atm}$ si ha ebollizione vigorosa. In quest'ultimo caso il cambiamento di fase sottrae calore al liquido rimasto, che quindi raffredda fino a raggiungere la temperatura di ebollizione [quella cioè per cui $p_v(T) = p_{atm}$].

4.4.5 Un liquido volatile alla temperatura T che riempie parzialmente un recipiente chiuso evapora sino a che la pressione parziale dei suoi vapori nella parte libera del recipiente eguaglia la $p_v(T)$. La pressione totale nel recipiente sarà perciò la somma della pressione degli altri gas contenuti nel recipiente (p. es. aria) e della $p_v(T)$. Se per esempio riempiamo parzialmente un recipiente con un liquido volatile e chiudiamo subito il tappo, la pressione salirà dal valore atmosferico $p = p_{atm}$ al valore $p = p_{atm} + p_v(T)$ al termine del processo di evaporazione. Poiché p_v aumenta con T , la pressione totale nel contenitore sale all'aumentare di T .

4.4.6 La tensione di vapore degli idrocarburi è tanto più alta quanto minore è il loro numero di atomi di carbonio; come abbiamo già visto, metano, propano e *n*-butano sono addirittura gassosi a

temperatura ambiente. Incidentalmente, alcuni elementi che possono essere contenuti nei rifiuti solidi urbani presentano una bassissima tensione di vapore alla temperatura ambiente, ma alle temperature che si raggiungono in un inceneritore possono vaporizzare in quantità significativa e successivamente, raffreddandosi, condensare in particelle fini, tossiche.

4.4.7 Riportiamo la definizione convenzionalmente adottata per un COV. Ricadono sotto questa definizione la maggior parte degli idrocarburi con meno di 12 atomi di carbonio.

4.4.8 Analizziamo quanto avviene in un serbatoio di combustibile (a terra, per quanto simili considerazioni si possono applicare ai serbatoi degli aerei). Nel serbatoio è presente vapore di combustibile alla pressione $p_v(T)$, essendo T la temperatura ambiente. Quando il serbatoio viene riempito, i vapori contenuti nella parte vuota del serbatoio vengono espulsi nell'atmosfera (perdita di riempimento). Se poi il serbatoio viene chiuso, variazioni di temperatura inducono variazioni della p_v , e quindi della pressione totale al suo interno. Per evitare sovrappressioni (se la T aumenta) o sottopressioni (se diminuisce) che possano compromettere l'integrità del serbatoio, occorre prevedere la ventilazione del serbatoio: ciò fa sì che, aumentando la temperatura, i vapori in tal modo generati sfuggano all'esterno del serbatoio (perdita di respirazione). Man mano che il serbatoio si svuota (supponendo la T costante), ulteriore liquido evapora per fare in modo che la pressione parziale del vapore di combustibile nella parte vuota del serbatoio sia sempre pari a $p_v(T)$ (perdite di svuotamento); questi vapori saranno poi espulsi in una successiva fase di riempimento. La quantità di liquido evaporata, indicato con V il volume libero del serbatoio (cioè non occupato dal liquido) si ricava dalla legge di stato dei gas perfetti $p_v V = n_i \mathcal{R} T = m_i \mathcal{R} T / \mathcal{M}_i$, essendo n_i il numero di moli del composto volatile evaporate, \mathcal{M}_i la sua massa molare (peso molecolare) e quindi m_i la massa evaporata; per quest'ultima si ricava $m_i = p_v V \mathcal{M}_i / (\mathcal{R} T)$. Quindi m_i cresce con V , ed anche con T (perché p_v aumenta fortemente con T , certo più che linearmente, vedi 4.4.4, la quale è in scala logaritmica). Per limitare le perdite, si possono accettare limitate sovrappressioni o sottopressioni nel serbatoio, utilizzando quindi chiusure a tenuta, tarate per aprirsi in corrispondenza a differenze di pressione predeterminate, che comunque non ne mettano in pericolo l'integrità strutturale.

4.4.9 Per limitare le perdite in un serbatoio, si può adottare un tetto flottante, in modo da non lasciare uno spazio vuoto al disopra del liquido, eliminando in tal modo le perdite prima esaminate. Rimane tuttavia il problema di assicurare un'adeguata tenuta sul bordo del tetto flottante, che scorre contro la parete del serbatoio al variare del livello del liquido.

4.5.1 Oltre agli effetti già citati, gli ossidi di zolfo innalzano il punto di rugiada dei fumi. P. es., se questi contengono l'11% in volume di H_2O , il vapore condensa ad una temperatura di 48 C (perché la tensione di vapore dell'acqua a 48 C è pari a 0,11 atm). Se tuttavia i fumi contengono anche solo 1 ppm di H_2SO_4 (derivante da reazione di SO_x con vapore acqueo), il punto di rugiada si alza a 110 C, quindi anche parti relativamente calde delle condotte possono essere ricoperte da un velo di liquido contenente acido solforico in soluzione, fortemente corrosivo.

4.5.2 Lo zolfo può ossidarsi, per effetto dell'ossigeno atmosferico, a SO_2 e quindi a SO_3 , che in contatto con l'umidità atmosferica dà acido solforico, che irrita le vie respiratorie e gli occhi, genera piogge acide, ed inoltre dà luogo alla formazione di particolato secondario per reazione con l'ammoniaca

(presente nell'aria, prevalentemente per cause naturali); tali particelle secondarie hanno diametri comparabili con le lunghezze d'onda della luce visibile, per cui sono particolarmente efficaci nel disperderla, peggiorando la visibilità. Se invece lo zolfo reagisce con idrogeno forma acido solfidrico H_2S (detto anche idrogeno solforato, maleodorante, e tossico in alte concentrazioni). Le concentrazioni attuali di fondo di anidride solforosa ed ammoniacca sono indicate.

4.5.3 La figura illustra le attività umane che coinvolgono flussi di zolfo, principalmente emesso nell'atmosfera a causa di trattamento di minerali e combustione di combustibili fossili; la pioggia rimuove la SO_2 formatasi. Lo zolfo è presente nella crosta terrestre soprattutto in forma di gesso, che presenta una solubilità in acqua di circa 2000 ppm; le acque sotterranee contenenti zolfo in soluzione possono percolare in giacimenti di combustibili fossili, che quindi ne vengono a contenere una certa percentuale (questo processo ovviamente non comporta un intervento umano).

4.5.4 I combustibili che contengono una maggiore percentuale di zolfo sono gli olii pesanti, e soprattutto il carbone; questo zolfo brucia a SO_2 . Altra importante fonte di SO_2 è il trattamento di minerali, come indicato.

4.5.5 Per quanto riguarda le tecniche di controllo delle emissioni di zolfo in forma ossidata (SO_x), queste variano a seconda che si considerino grandi impianti fissi, che possono sostenere il costo, l'ingombro ed il peso di un sistema di trattamento dei fumi (generalmente tramite immissione in camera di carbonato di calcio $CaCO_3$ polverizzato, che consuma SO_2 trasformandosi in solfato di calcio, ossia gesso), oppure fonti mobili, per le quali l'unica soluzione è ridurre il contenuto di zolfo del combustibile usato.

4.5.6 Per desolfurare un idrocarburo, si fa reagire (in fase gassosa) l'idrocarburo contenente zolfo con un flusso di idrogeno, sotto l'azione di un catalizzatore. Si forma acido solfidrico come sottoprodotto, che deve quindi essere a sua volta trattato. Il trattamento prevede l'assorbimento mediante una soluzione acquosa alcalina (che aumenta la solubilità dell'acido solfidrico, rimuovendo ioni H^+), poi l'ossidazione mediante una corrente d'aria che scinde H_2S in zolfo elementare ed acqua. Occorre però fare attenzione a non eccedere con il flusso d'aria per evitare la reazione che porta invece alla formazione di SO_2 , altro inquinante. Lo zolfo elementare può non essere smerciabile commercialmente (se non c'è una fonte di utilizzazione vicina) per cui necessita una discarica.

4.6.1 Gli effetti nocivi degli ossidi di azoto (monossido NO , biossido NO_2 e protossido N_2O) sono qui riassunti. Essi formano particelle secondarie nell'atmosfera, compreso smog, portano alla formazione di ozono, causano piogge acide (per acido nitrico), attaccano l'ozono stratosferico. Il biossido è un irritante respiratorio, la cui concentrazione è circa un ppb in aria non inquinata, mentre il protossido ed è un gas di serra.

4.6.2 La figura indica i flussi di azoto sotto forma ossidata indotti dall'uomo. Si noti che le piante (e gli animali che se ne nutrono) hanno bisogno di azoto, però non riescono ad utilizzare quello atmosferico in forma molecolare N_2 (praticamente inerte), e devono fare affidamento sull'azoto atomico N che si forma per effetto di fulmini, oppure su fertilizzanti.

4.6.3 Le più importanti fonti di emissioni di NO_x sono da veicoli a motore, ed impianti (in particolare

quelli che bruciano carbone).

4.6.4 Ancorché NO_x e SO_x presentino alcune somiglianze (entrami sono irritanti, formano particolato secondario, causano piogge acide, sono emessi in quantità particolarmente grande nella combustione del carbone), tra loro sussistono anche importanti differenze. Innanzitutto i veicoli a motore emettono molto NO_x , ma poco SO_x ; la formazione di quest'ultimo è dovuta alla presenza di impurità di zolfo nel combustibile, mentre NO_x è formato principalmente a partire dall'azoto atmosferico, anche se nella combustione del carbone c'è un importante contributo dovuto all'azoto contenuto nel combustibile. La formazione di NO_x può essere controllata operando sulla temperatura T , sul tempo di residenza in camera t e sul contenuto di ossigeno, mentre le emissioni di SO_x dipendono solo dal contenuto di zolfo del combustibile. SO_x viene convertito, nella desolforazione dei fumi, in un solido, mentre NO_x viene convertito in specie gassose. Mentre SO_x può essere disciolto in acqua, NO_x no, essendo molto poco solubile.

4.6.5 I fumi caldi contengono NO_x principalmente sotto forma di monossido NO, il quale al diminuire della temperatura si converte in biossido NO_2 , irritante. Ancorché un motore emetta principalmente NO, le emissioni sono spesso date come NO_2 equivalente (quindi un kg di NO emesso equivale a $\mathcal{M}_{\text{NO}_2}/\mathcal{M}_{\text{NO}} = 46/30 = 1,533$ kg di NO_2). La reazione di NO, in presenza di frammenti di idrocarburi (come COV) e sotto l'azione della luce solare, porta all'aumento della concentrazione di ozono, fortemente irritante, vedi 4.4.2.

4.6.6 L'equilibrio della reazione di conversione di NO a NO_2 secondo la $\text{NO} + 0,5 \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{NO}_2$ dipende fortemente dalla temperatura, a causa della dipendenza della costante di equilibrio di questa reazione, $K_p(T) = p_{\text{NO}_2}/(p_{\text{NO}} \sqrt{p_{\text{O}_2}}) = X_{\text{NO}_2}/(X_{\text{NO}} \sqrt{X_{\text{O}_2}} \sqrt{p})$. Ad alta T si ha praticamente quasi solo NO, a bassa T quasi unicamente NO_2 .

4.6.7 Le figure in basso riportano le concentrazioni *di equilibrio chimico* di NO (a sinistra) e NO_2 (a destra) in funzione della temperatura (qui data in gradi Fahrenheit) per fumi contenenti il 21% di ossigeno (curva più alta) e fumi contenenti il 4% di ossigeno. Notiamo che nei prodotti di combustione una parte dell'ossigeno è stato utilizzato per far avvenire la combustione, per cui il contenuto residuo tipico all'uscita di un combustore di una turbina a gas è dell'ordine del 10 – 15% (la concentrazione di ossigeno nei prodotti può essere facilmente valutata in funzione del rapporto di equivalenza in base ad un modello *mixed is burnt*, vedi 3.2.7, figura sopra). È importante sottolineare che le concentrazioni di equilibrio sono quelle raggiunte asintoticamente per lunghi tempi di permanenza alle temperature indicate; il realtà i processi di reazione avvengono con velocità finita, per cui per brevi tempi di permanenza le concentrazioni saranno ben al di sotto di quelle riportate.

4.6.8 I principali meccanismi di formazione di NO_x sono: 1) termico, cosiddetto perché estremamente sensibile alla temperatura, caratterizzato da tempi di formazione relativamente lunghi, identificato da Zel'dovich, 2) prompt (rapido), caratterizzato da tempi di formazione relativamente rapidi, identificato da Fenimore, 3) fuel-N, dovuto all'azoto contenuto nel combustibile, importante per carbone, 4) un meccanismo che passa attraverso la formazione di protossido di azoto, meno importante, etc. Solo per il primo meccanismo può essere ricavata un'espressione approssimativa del tasso di formazione (kg di NO che si formano per unità di volume e di tempo); gli altri meccanismi sono estremamente

complessi.

4.6.9 Il primo passo del meccanismo termico è la reazione di N_2 atmosferico ed ossigeno atomico (che si forma a causa delle alte temperature in camera di combustione) per dare NO ed un atomo di N. Questa reazione è alquanto lenta (in termini chimici, vedi 4.6.10), per cui per lo più NO si forma a valle della fiamma, nei fumi caldi. L'atomo di N può poi reagire secondo le reazioni 2. o 3. per dare un'altra molecola di NO; queste due reazioni sono molto più rapide, per cui la formazione di questa seconda molecola è quasi contemporanea a quella della prima. La reazione 3. completa il meccanismo di Zeldovich (in genere meno importante perchè la concentrazione di OH è bassa rispetto a quella di O_2). Globalmente il tasso di formazione di NO è quindi il doppio di quello relativo alla prima reazione (perché appunto ogni reazione 1. forma una molecola di NO, e l'atomo di N formatosi genera un altro NO attraverso 2. o 3.), e può essere posto nella forma indicata, nella quale si vede che compaiono alcune costanti (caratteristiche della reazione), una dipendenza dalla densità, una dipendenza dalla temperatura (esponenziale, quindi molto forte), ed una dalla concentrazione dei reagenti. In questa espressione è facile valutare la densità ρ , la temperatura T e la concentrazione (espressa in questo caso come frazione di massa $Y_i = X_i \mathcal{M}_i / \mathcal{M}$) di azoto molecolare N_2 (dipendente da quanta aria atmosferica viene usata), mentre è difficile valutare la concentrazione di ossigeno atomico. In prima approssimazione, si può assumere che quest'ultimo si trovi in equilibrio con l'ossigeno molecolare (la cui concentrazione è più facile da valutare), per la quale si può ricorrere alla costante di equilibrio $K_p(T) = p_O / \sqrt{p_{O_2}} = \sqrt{p} X_O / \sqrt{X_{O_2}}$, per arrivare infine ad un'espressione in cui figura Y_{O_2} (anziché Y_O). Occorre notare però che generalmente la concentrazione di ossigeno atomico O è ben più alta di quella ricavata sotto l'ipotesi di equilibrio (perché la dissociazione della molecola di ossigeno secondo la $O_2 + M \rightarrow 2 O + M$ richiede l'interazione fra due molecole, mentre il passo inverso richiede un'interazione tra tre molecole, evento molto più infrequente), per cui la seconda espressione dà valori inferiori alla prima. Poiché comunque il tasso di formazione dipende, oltre che da T , anche dalla concentrazione di ossidante, il massimo valore si avrà non per combustione stechiometrica ($\varphi = 1$, che identifica da vicino le condizioni di massima temperatura), ma per combustione con un lieve eccesso d'aria ($\varphi \sim 0,8$, che dà temperature lievemente più basse, ma Y_O molto più alta). Si noti che il tasso di formazione di NO è stato scritto considerando il solo passo in avanti della reazione 1., supponendo quindi di essere ben lontani dall'equilibrio, cosa giustificata appunto dalla lentezza della reazione.

4.6.10 La motivazione della lentezza della reazione 1. va ricercata nella sua energia di attivazione (o equivalentemente, temperatura di attivazione) molto alta, che fa in modo che solo una piccola frazione delle molecole abbiano energia sufficiente a far avvenire la reazione. Se infatti grafichiamo il valore del termine $\exp(-T_k/T)$ dell'espressione di Arrhenius in funzione della temperatura per le diverse reazioni che compaiono nel meccanismo di Zel'dovich, vediamo che i valori relativi alla reazione 1. sono di molti ordini di grandezza inferiori a quelli relativi alle reazioni 2. e 3.; quindi è la reazione 1. che risulta 'controllante'. Notiamo che in teoria le reazioni 2. e 3. potrebbero essere attivate da azoto atomico N proveniente, anziché dalla reazione 1., dalla reazione di dissociazione dell'azoto molecolare (qui indicata come reazione 0.); quest'ultima reazione tuttavia presenta una temperatura di attivazione eccezionalmente alta, per cui avviene ad un tasso talmente basso da non

dare alcun contributo apprezzabile alla formazione di azoto atomico. Si noti che comunque il termine $\exp(-T_k/T)$ è estremamente sensibile alla temperatura (la figura ne riporta il logaritmo).

4.6.11 Questo meccanismo si innesca quando nella combustione si ha formazione di acido cianidrico; è importante per gli idrocarburi ed il carbone (che contengono sia C che H), ma non per esempio per combustione di idrogeno oppure di CO. È più veloce del meccanismo termico, per cui la NO si forma in prossimità della zona di fiamma. È relativamente importante a bassa temperatura (quindi contributo termico basso) o per difetto di ossigeno (idem).

4.6.12 Il carbone può contenere una certa percentuale di azoto sotto forma in particolare di gruppo amminico NH_2 od ammoniaca NH_3 ; una significativa percentuale può anche essere presente nell'olio combustibile. Questo azoto legato porta alla formazione di acido cianidrico ed ammoniaca, le quali si convertono in NO, anche se allo stesso tempo queste specie promuovono reazioni che invece distruggono NO. Tipicamente dal 20% al 50% dell'azoto contenuto nel combustibile è trasformato in NO.

4.6.13 Il meccanismo del protossido di azoto dà un certo contributo in tutti i combustibili, ma è più importante in presenza di azoto legato (NH , NH_2), che forma N_2O secondo i passi inversi di 13, 17, 19, il quale successivamente forma NO attraverso 12, 18, 21. Anche le emissioni di N_2O stesso hanno importanti effetti ambientali (è un gas di serra).

4.6.14 Per fissati valori di temperatura, densità e concentrazione di ossigeno atomico ed azoto, il tasso di produzione di NO termico risulta definito secondo la 4.6.9. Di conseguenza, in un sistema spazialmente omogeneo (in cui cioè non ci sono variazioni delle grandezze nelle diverse coordinate spaziali) l'equazione di conservazione delle specie, che in questo caso si scrive $\partial(\rho Y_{\text{NO}})/\partial t = w_{\text{NO}}$, porta ad una crescita lineare della concentrazione di NO nel tempo, secondo la $Y_{\text{NO}} = (w_{\text{NO}}/\rho) t$. La figura riporta quindi la crescita della concentrazione di NO nel tempo per vari valori della temperatura. Si noti che per alti tempi di residenza si hanno concentrazioni di NO molto alte, che possono quindi avvicinare (specie per le temperature più alte) i valori di equilibrio, che evidentemente non possono essere superati. In questa condizioni le espressioni per il tasso di formazione, vedi 4.6.9, andrebbero emendate considerando anche il tasso della reazione all'indietro, che andrebbe quindi a sottrarsi da quello in avanti.

4.6.15 Consideriamo la concentrazione di NO che si ha nel passaggio di un flusso attraverso un fronte di fiamma, e confrontiamo i risultati derivanti dall'applicazione della formula riportata in 4.6.9 con i valori di equilibrio. Supponiamo che l'andamento della temperatura nel tempo (conseguenza del passaggio attraverso il fronte di fiamma) sia del tipo mostrato a sinistra. Se la concentrazione di NO fosse in equilibrio, essa crescerebbe molto velocemente all'aumentare della temperatura, ma diminuirebbe rapidamente al suo diminuire a valle della fiamma. Per effetto della velocità finita della reazione invece, la crescita è molto più lenta (per cui si forma meno NO di quanto previsto dall'equilibrio), però una volta che la temperatura decresce (passato il fronte di fiamma) anche il tasso della reazione inversa crolla, e la NO non si riconverte più in azoto ed ossigeno. Questo è uno dei motivi che portano all'introduzione di una zona intermedia dei combustori delle turbine a gas.

4.6.16 Nella combustione del carbone, i tre meccanismi più importanti sono quello termico, quello

prompt e quello dell'azoto legato. Gli ultimi due sono attivi a qualsiasi temperatura, mentre il primo si attiva solo ad alta temperatura, per via della sua estrema sensibilità alla temperatura (dovuta all'altissima temperatura di attivazione della reazione 1.), diventando poi rapidamente dominante all'ulteriore aumento di T .

4.6.17 Nella combustione in turbine a gas invece il meccanismo dominante è senz'altro il meccanismo termico, molto importante a causa delle alte temperature operative. Il meccanismo *prompt* risulta relativamente poco importante sia per l'effetto dominante del meccanismo termico, sia per effetto delle alte pressioni operative, vedi 4.6.11. Il meccanismo dell'azoto legato risulta poi del tutto inefficace in quanto il cherosene contiene una quantità insignificante di azoto legato. Rimane il meccanismo del protossido d'azoto, il cui contributo può essere orientativamente calcolato ad un 10 – 15% circa del totale dello NO_x emesso. I grafici a torta riportano la distribuzione dello NO_x emesso al decollo ed in crociera, per una tipica situazione. Si osserva che al decollo l'86,3% dello NO_x è NO dovuto al meccanismo termico, il 12,8% è NO dovuto al meccanismo del protossido d'azoto, mentre lo 0,9% dello NO_x è direttamente emesso come protossido d'azoto. In fase di crociera queste percentuali cambiano come riportato, si osservi tuttavia che l'indice di emissione di NO_x è comunque molto più basso in crociera (1 g di NO_x per kg di combustibile bruciato, contro i 17,9 al decollo) in virtù delle minori temperature che si hanno in camera in queste condizioni.

4.6.18 Per controllare le emissioni di NO_x , la cosa in linea di principio migliore è adottare un processo di combustione che ne limiti la formazione. Ove ciò non sia possibile, occorre trattare i fumi mediante addizione di ammoniaca od urea, che riducono la concentrazione di NO_x (si noti che in questo caso processi di dissoluzione in acqua non sono possibili causa la bassissima solubilità degli ossidi di azoto); questo è possibile solo in impianti di terra, per evidenti problemi di peso dell'impianto e degli additivi.

4.6.19 Per quanto detto, si può ridurre il tasso di formazione di NO (almeno quello termico, che come detto nella combustione ad alta temperatura è la parte prevalente) riducendo la temperatura, il tempo di residenza entro la camera (o meglio il tempo che il flusso trascorre ad alta temperatura, il cosiddetto *time-at-temperature*), ed ancora riducendo la concentrazione di ossidante, vedi 4.6.9. Si può per esempio far avvenire la combustione in due o più stadi, introducendo prima solo una parte del combustibile o dell'ossidante fino a raggiungere una certa temperatura, poi effettuare una seconda iniezione, vedi successiva figura 4.8.8. In impianti di terra, si può far ricircolare una parte dei prodotti di combustione entro la camera, per abbassare la temperatura. Vedremo però che tutti queste azioni comportano un parallelo aumento delle emissioni di CO. Una soluzione radicale (almeno per combustibili che non contengono azoto legato) sarebbe quella di far avvenire la reazione in ossigeno puro anziché in aria, ma l'aria è gratis, mentre l'ossigeno puro costa.

4.7.1 Le emissioni di monossido di carbonio sono in massima parte dovute ai veicoli a motore, in particolare alle automobili. Le massime concentrazioni di CO si registrano quindi in città. Nei pressi degli aeroporti, circa il 50% delle emissioni di CO è dovuto agli aerei, mentre la parte restante è dovuta al traffico di veicoli dentro e attorno l'aeroporto stesso. L'interesse a limitare le emissioni di CO nasce non solo dai suoi effetti nocivi, vedi 2.7.10, ma anche al fatto che esso rappresenta un

incombusto, e quindi la sua conversione a CO_2 comporterebbe un miglioramento del rendimento del combustore, ossia una riduzione dei consumi, vedi anche 3.4.4.

4.7.2 Mentre l'ossidazione del carbonio contenuto negli idrocarburi e nel carbone è veloce, la successiva ossidazione a CO_2 è relativamente lenta. Essa avviene secondo la reazione citata, la quale risulta piuttosto lenta a bassa temperatura. Tale effetto in questo caso non è dovuto alla temperatura di attivazione (la quale anzi è singolarmente bassa, appena 39 K, per cui il termine $\exp(-T_k/T)$ è praticamente sempre unitario a qualsiasi temperatura), bensì al fatto che la concentrazione del radicale OH è estremamente sensibile alla temperatura (a basse temperature tale concentrazione è bassissima). Si trova inoltre che le emissioni di CO sono fortemente correlate con quelle di UHC, in quanto le stesse condizioni (alta temperatura) che favoriscono l'ossidazione di CO a CO_2 favoriscono anche l'ossidazione degli idrocarburi incombusti, come pure quella del *soot*.

4.7.3 La figura riporta l'indice di emissione di CO (EICO, g di CO emessi per kg di combustibile bruciato) per una turbina a gas, in funzione del rapporto di equivalenza φ . Per φ molto basso la temperatura è relativamente bassa per cui la reazione che dovrebbe ossidare CO a CO_2 è praticamente bloccata, con il risultato che si hanno forti emissioni di CO. Avvicinandosi alle condizioni $\varphi = 0,8$ la temperatura sale, per cui il tasso della reazione accelera, ed inoltre essendo in condizioni di miscela povera (eccesso di ossigeno) si ha ossigeno in abbondanza per ossidare la CO. Per $\varphi \sim 1$ l'alta temperatura accelera fortemente la reazione, per cui la concentrazione di CO praticamente raggiunge i livelli di equilibrio, al disotto dei quali non può andare (viceversa, si potrebbe dire che la concentrazione di CO_2 non può andare oltre il valore di equilibrio). Aumentando ancora φ , EICO aumenta perché per $\varphi > 1$ si opera in difetto di ossigeno, cosa che forza il carbonio contenuto nel combustibile ad ossidarsi a CO piuttosto che a CO_2 .

4.7.4 La figura mostra che gli indici di emissione di CO e di idrocarburi incombusti sono fortemente correlati fra loro (EIUHC spazia nella fascia indicata), per cui tutte le misure prese per contenere le emissioni di CO contengono anche quelle di UHC (*Unburned HydroCarbons*).

4.7.5 Riducendo le emissioni di CO (che viene bruciato a CO_2 , con rilascio di calore), e quindi anche quelle di idrocarburi incombusti (bruciati a CO_2 ed H_2O , con rilascio di calore), aumenta la percentuale del potere calorifico del combustibile che viene sfruttato a fini utili (ossia il rendimento di combustione, qui riportato in ascissa).

4.7.6 Le emissioni di CO si riducono all'aumentare della pressione operativa (nelle turbine a gas, nelle quali la combustione avviene in pressione), perché la reazione $\text{CO} + 0,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$, presenta un $K_p = p_{\text{CO}_2}/(p_{\text{CO}} \sqrt{p_{\text{O}_2}}) = X_{\text{CO}_2}/(X_{\text{CO}} \sqrt{X_{\text{O}_2} p})$ da cui $X_{\text{CO}_2}/X_{\text{CO}} = K_p(T) \sqrt{X_{\text{O}_2} p}$, ossia la conversione di CO a CO_2 , fissata T , aumenta con p . Al solito, le emissioni di UHC seguono un analogo andamento.

4.8.1 Abbiamo osservato, vedi 4.6.9, che le emissioni di NO_x termico hanno un massimo per $\varphi = 0,8$, mentre dalla 4.7.3 si vede che quelle di CO hanno un minimo ancora per $\varphi = 0,8$, e per quanto detto queste saranno anche le condizioni di minime emissioni di incombusti. Sussiste quindi una situazione di conflitto tra i requisiti di minimizzare le emissioni di questi diversi inquinanti; ogni passo inteso a diminuire le emissioni di NO_x comporta un parallelo aumento di quelle di CO e UHC, e viceversa.

4.8.2 La figura riporta le emissioni di NO e CO da un motore alternativo in funzione della temperatura; come detto, le prime aumentano con la temperatura, le seconde diminuiscono (almeno finché non ci si avvicina a condizioni di difetto di ossigeno). Si vede che è possibile identificare un campo di temperature entro il quale le emissioni di NO e CO sono entrambe accettabili. Occorrerà perciò cercare di operare all'interno di questo ristretto campo, evitando quanto più possibile disuniformità entro la camera, o fluttuazioni eccessive, che possano far uscire, sia pur localmente o temporaneamente, da questo campo.

4.8.3 Le pareti del cilindro devono essere raffreddate, sia per preservarne l'integrità, sia per evitare che la viscosità del lubrificante nel carter si riduca a valori inaccettabilmente bassi (al contrario di quanto avviene in un gas, il coefficiente di viscosità di un liquido diminuisce con la temperatura). Questo implica che la temperatura della miscela reagente nel cilindro non sarà uniforme come desiderato in linea di principio, bensì più bassa vicino alle pareti, con conseguenti accresciute emissioni di CO ed UHC (anche se NO_x si riduce). Per contrastare questo effetto, si cerca di adottare geometrie della camera di combustione con basso rapporto area/volume, quindi per quanto possibile vicine ad una sfera. Occorre poi accelerare il riscaldamento del motore (quando il motore è freddo emette grosse quantità di inquinanti perché lavora lontano dalla temperatura ottimale – si può dire che una grossa parte delle emissioni sono rilasciate alla partenza, per cui è opportuno far riscaldare il motore per uno o due minuti facendolo girare al minimo) mediante particolari soluzioni (facendo inizialmente ricircolare i gas di scarico, oppure utilizzando resistenze elettriche), ed infine adottare marmitte catalitiche.

4.8.4 Nelle marmitte catalitiche delle automobili, il monossido di carbonio è utilizzato (insieme agli UHC) come agente riducente, per strappare l'ossigeno da NO (la reazione indicata è puramente qualitativa – non bilanciata). Ciò richiede l'utilizzo di catalizzatori quali platino, palladio, rodio. Poiché il tasso di reazione è proporzionale alla superficie disponibile per il catalizzatore, i gas di scarico sono fatti defluire attraverso una struttura con un gran numero di sottili canali, ricoperti di un sottilissimo strato di catalizzatore (una marmitta contiene circa 1,5 g di catalizzatore, costoso). Come mostra la figura che dà i rendimenti di conversione di NO_x, CO e UHC, la marmitta può lavorare solo in una ristrettissima fascia di valori del rapporto aria/combustibile A/F , per cui si adottano rivelatori del contenuto di ossigeno dei fumi, che attraverso la centralina controllano il rapporto aria/combustibile. Non si possono però utilizzare benzine contenenti tetraetilato di piombo come antidetonante, perché il piombo avvelena il catalizzatore.

4.8.5 In un turbogetto, si hanno temperature relativamente basse in fase di *idle* (cioè quando il motore è acceso ma non fornisce spinta significativa, come avviene nelle fasi di attesa a terra) con associate alte emissioni di CO e basse di NO (estremo superiore sinistro della curva), mentre in fase di decollo si hanno alte temperature per avere la spinta massima, con basse emissioni di CO ma alte di NO (estremo inferiore destro della curva). In fase di volo di crociera la temperatura è intermedia, e si riescono a rispettare i limiti sia su CO che NO. Quindi la bontà di un combustore può essere valutata dal fatto che la curva è spostata verso l'origine (come nella curva C in figura), più che dal fatto che il punto di lavoro sia spostato verso l'uno o l'altro dei due estremi di una stessa curva.

4.8.6 Nei motori aeronautici la spinta viene variata agendo sulla portata di combustibile, e quindi sul rapporto di equivalenza, che determina poi il campo di temperatura in camera di combustione. Nelle condizioni di minima spinta (*idle*) la temperatura in camera è bassa, per cui si hanno basse emissioni di NO_x ma alte di CO e di UHC. La situazione inversa si verifica invece quando è richiesta la massima spinta (al decollo). Per quanto riguarda le emissioni di *soot*, esse sono determinate da un bilancio tra il termine di produzione, che sappiamo aumenta con il rapporto di equivalenza (vedi 4.3.6), quindi con la temperatura e la spinta, ed il termine di ossidazione, il quale pure aumenta con la temperatura (che favorisce la combustione delle particelle di carbonio). Questa situazione determina un minimo delle emissioni di *soot* in corrispondenza a valori intermedi della spinta; per bassi valori della spinta si ha limitata formazione di *soot*, ma anche ossidazione molto ridotta, mentre per alti valori della spinta l'alto valore di φ porta ad una copiosa produzione di *soot*, non bilanciata dal parallelo aumento del tasso di ossidazione delle particelle.

4.8.7 Nelle turbine a gas non è possibile adottare dispositivi catalitici perché indurrebbero cadute di pressione inaccettabili (oltre che per ovvi motivi di peso ed ingombro in un aereo). La necessità di raffreddare le pareti della camera di combustione (che altrimenti raggiungerebbero temperature inaccettabili) fa sì che in prossimità di esse si formi una regione di bassa temperatura, dove si avrà abbondante formazione di CO. Bisogna allora anche in questo caso adottare geometrie che minimizzino il rapporto superficie pareti/volume. Alla disposizione con camere di combustione a canne separate, vedi 3.1.5, disposte intorno all'albero che collega turbina e compressore (semplice e pratica per la manutenzione) è preferibile allora una camera anulare, con assai più basso rapporto superficie/volume, ma più costosa (perché più difficile da realizzare) e meno accessibile per la manutenzione. La maggior parte dei combustori dei motori aeronautici di spinta elevata adotta perciò la geometria anulare. Ancora, per limitare l'estensione delle zone a bassa temperatura in prossimità delle pareti è indicato utilizzare tecniche di raffreddamento che richiedano la minima quantità d'aria per la refrigerazione, quindi in particolare il raffreddamento per traspirazione, vedi 3.1.17, 3.3.10.

4.8.8 Una tecnica che può essere usata per contenere le emissioni di inquinanti è quello dello *staging*, cioè di suddividere l'iniezione di combustibile (e/o di aria) in più stadi. Le figure riportano la temperatura della zona primaria del combustore in funzione della quantità di combustibile iniettata (adimensionalizzata con la quantità totale di aria ingerita dal combustore, per cui ha il significato di un rapporto combustibile/aria, anche se tale interpretazione è un po' fuorviante, il quanto qui mentre ci si riferisce al combustibile che è stato iniettato fino ad una certa ascissa della camera, ci si riferisce invece per l'aria a tutta la portata d'aria, indipendentemente da come viene distribuita). In un combustore convenzionale (sopra) il combustibile è iniettato in un singolo evento, per cui man mano che il combustibile brucia si hanno dapprima temperature relativamente basse (che comportano eccessive emissioni di CO e UHC), poi temperature molto alte (che danno eccessive emissioni di NO). Per poter contenere le emissioni di inquinanti, occorrerebbe contenere invece le temperature nella fascia indicata. Questo può essere conseguito iniettando il combustibile, anziché in un singolo evento, in più stadi; per esempio nel caso considerato viene iniettato nel primo stadio tanto combustibile quanto ne basta per contenere la temperatura massima entro i limiti che danno emissioni accettabili di NO. Raggiunto questo limite, si inietta aria (attraverso porte del *liner* convenientemente disposte) per

abbassare la temperatura dei gas fino al valore limite che consente di contenere le emissioni di CO. Si inietta quindi nuovamente combustibile fino a raggiungere di nuovo la temperatura limite per NO, etc., fino a bruciare quindi tutta la portata di combustibile desiderata.

4.8.9 Da quanto sopra esposto, si evince che il controllo della temperatura, e quindi del rapporto di equivalenza, è un fattore cruciale per la limitazione delle emissioni di inquinanti. Bisogna quindi tenere φ entro gli stretti limiti che consentono di avere limitate emissioni di inquinanti. Questo è in linea di principio possibile in combustione premiscelata, tuttavia come detto essa non può essere conseguita senza l'introduzione di una fiamma pilota, vedi 3.2.1 e 4.3.7, cosa che ne riduce il vantaggio ai fini del controllo di φ . Essa è comunque sempre preferibile alla combustione nonpremiscelata. Occorre ancora osservare che, anche avendo individuato il valore di φ nominale che consente di minimizzare le emissioni, le condizioni operative del combustore portano in ogni caso a scostamenti da tale valore, dovuti sia all'effetto di disomogeneità del flusso (che si può cercare di ridurre attraverso una migliore atomizzazione del combustibile, e migliorando il successivo miscelamento dei vapori), sia a fluttuazioni turbulente (che non si possono ridurre *sic et simpliciter* perché la turbolenza è necessaria per avere un miscelamento attivo). Inoltre, va tenuto presente che in un combustore il rapporto di equivalenza deve variare tra i valori circa stechiometrici nella zona primaria, a valori all'uscita che consentono di ammettere i prodotti in turbina senza danni alle palette. Il progetto ottimale del combustore deve quindi ricercare il miglior compromesso al fine di minimizzare le emissioni dei diversi inquinanti nel loro insieme.

5. EMISSIONI DI RUMORE

5.1 Le emissioni di rumore da parte di un aereo sono dovute sia all'organo propulsivo (motore a getto, eliche) che al velivolo stesso; la prima fonte è preponderante al decollo, mentre all'atterraggio negli aerei moderni le due fonti sono di intensità comparabile. Per valutare gli effetti del rumore, occorre premettere alcune nozioni sulla misura del rumore, e sulla sua attenuazione atmosferica.

5.2.1 Il suono è una perturbazione ondosa che provoca una fluttuazione del valore della pressione. Se chiamiamo p il valore istantaneo della pressione in un punto del campo, esso potrà essere scisso nella somma di un termine medio, indicato qui con la soprilineatura, ed una componente fluttuante nel tempo, indicata con l'apice. Il valor medio della fluttuazione è ovviamente nullo; se si vuole quindi caratterizzare l'intensità della fluttuazione, occorrerà considerare il valor medio del *quadrato* della fluttuazione, qui indicata come $\overline{p'^2}$, ossia la varianza della pressione, grandezza sicuramente positiva. Alternativamente, si può usare lo scarto quadratico medio o rms (*root mean square*). La potenza emessa da una fonte sotto forma acustica è indicata come W , e conseguentemente misurata in watt. Si definisce invece come intensità acustica in un dato punto la potenza acustica ricevuta per unità di superficie, misurata quindi in W/m^2 . L'orecchio umano è in grado di avvertire suoni la cui intensità

acustica spazia sopra molti ordini di grandezza, per cui si preferisce utilizzare una scala logaritmica per misurare potenza, intensità, e scarto quadratico medio della pressione.

5.2.2 Per misurare potenza acustica, intensità acustica ed intensità della pressione si definiscono i relativi ‘livelli’ come dieci volte il logaritmo in base dieci del rapporto tra il valore della grandezza in questione ed un valore di riferimento della stessa (il fattore dieci è introdotto per convenzione; senza di esso si ottiene il valore dei livelli in Bel). Questo è preso come 10^{-12} W per la potenza, 10^{-12} W/m² per l’intensità, e 20 μ Pa per la pressione; gli ultimi due valori corrispondono al minimo livello sonoro percettibile da una persona con udito normale. Si può infatti dimostrare, vedi 5.2.3, che esiste una relazione tra l’intensità acustica e l’intensità (o varianza) della pressione, che per i valori di densità e velocità del suono (ossia temperatura) ambiente al livello del suolo porta alla coincidenza tra il livello di riferimento per l’intensità acustica e quello per l’intensità della pressione. Un raddoppio dell’intensità del rumore corrisponde ad un aumento di 3 dB del livello dell’intensità, infatti se dall’intensità I si passa ad un’intensità $2 I$, il livello risulta $L_{2I} = 10 \log_{10}(2I/I_{ref}) = 10 \log_{10}(I/I_{ref}) + 10 \log_{10}(2) = L_I + 10 \cdot 0,301 = L_I + 3,01$ dB. Si presti attenzione al fatto che i livelli di intensità acustica *non* si sommano, quelle che si sommano sono le intensità. Si noti che ad una sensazione di raddoppio del rumore percepito dall’orecchio corrisponde però un aumento del livello di circa 10 dB.

5.2.3 Viene qui riportata una concisa dimostrazione della relazione tra I e la varianza della pressione citata nella trasparenza precedente. Chiamiamo ξ e v la velocità e lo spostamento di una particella fluida generate da un’onda di pressione. La forza esercitata da una fluttuazione di pressione p' su un’areola dA è $p' dA$, per cui il lavoro elementare corrispondente allo spostamento $d\xi$ ha la forma indicata. Da esso segue l’intensità acustica, che è una potenza acustica (cioè lavoro diviso tempo) per unità di area. La velocità v può essere posta in relazione a p' considerando la forza che si esercita su un volumetto per effetto di un gradiente di pressione in direzione x , che sarà la differenza tra la forza $p' dy dz$ che si esercita (nella direzione positiva della coordinata x) sulla faccia all’ascissa x , e la forza $[p' + (\partial p'/\partial x) dx] dy dz$ che si esercita sulla faccia all’ascissa $x + dx$. Questa forza dà luogo ad un’accelerazione secondo la legge di Newton; eguagliando le due espressioni si ottiene una relazione tra la derivata spaziale di p' e la derivata temporale di v (cioè l’accelerazione della particella). La variazione di p' nel tempo e nello spazio si ricava dalla soluzione dell’equazione delle onde, della quale consideriamo per semplicità la forma monodimensionale. Si può facilmente verificare che la sua soluzione deve avere come argomento $at - x$ (corrispondente ad un’onda che si propaga nel senso positivo delle x), oppure $at + x$ (onda che si propaga nel verso negativo). Possiamo espandere la generica soluzione attraverso una serie di Fourier, nella quale figureranno tutti i possibili *modi* indicizzati con l’indice k , da $k = 1$ (modo fondamentale) in su (armoniche). Limitandoci per concisione a considerare solo il modo fondamentale, e solo l’onda che viaggia verso destra (l’estensione è comunque immediata) si trova quindi (derivando la p' rispetto ad x) l’espressione dell’accelerazione, ed integrando quella della velocità. Quest’ultima sostituita nella $I = p'v$, dà il valore istantaneo della densità; mediando si ottiene il valore medio, che è quello di interesse.

5.2.4 L’orecchio umano (di una persona giovane) è in grado di avvertire suoni di frequenza compresa tra 20 Hz e 20 kHz (anche se con l’età il limite superiore si riduce). La sensibilità dell’orecchio umano

non è però uguale su tutte le frequenze, ma presenta un massimo tra i 2 ed i 5 kHz, e si riduce sia al disotto che al disopra di questo campo. La figura mostra il livello del suono percepito dall'orecchio in funzione della frequenza, normalizzato con il valore alla frequenza di 1 kHz.

5.2.5 L'intero campo di frequenze udibili può essere suddiviso in intervalli, i cui limiti inferiori e superiori sono presi secondo una progressione geometrica (invece che aritmetica) per via dell'ampiezza del campo in questione. Se la ragione della progressione geometrica è 2, l'intervallo prende il nome di ottava; quindi per coprire l'intero campo da 20 a 20000 Hz occorrono 10 ottave (poiché $2^{10} = 1024 \simeq 20000/20$); in realtà, escludendo le frequenze estreme dello spettro, alle quali l'orecchio è poco sensibile, per la maggior parte dei fini pratici basta considerare otto ottave, le quali quindi coprono un campo in un rapporto $2^8 = 256$ ad uno. Ogni ottava può poi essere divisa ulteriormente in tre intervalli, le cui frequenze limite sono quindi in ragione della radice cubica di 2. La figura riporta sia la suddivisione in ottave adottata negli strumenti musicali, sia quella di interesse nel campo del rumore di origine aeronautica.

5.2.6 Abbiamo osservato, vedi 5.2.4, che la sensibilità del'orecchio umano al rumore dipende dalla frequenza. Più esattamente, la sensazione uditiva generata da un suono dipende dalla sua frequenza e dalla sua intensità (o dal suo livello di intensità). La figura riporta le curve di eguale rumorosità, ovvero le coppie (L_I, f) alle quali corrisponde un'eguale sensazione di rumore da parte dell'orecchio. Ovviamente le curve presentano una depressione tra i 2 ed i 5 kHz, essendo l'orecchio più sensibile a queste frequenze. Si osservi tuttavia che le curve non derivano da una semplice traslazione.

5.2.7 Per avere una scala più rappresentativa del livello sonoro effettivamente percepito dall'orecchio, è stata proposta la scala dB(A), nella quale ad ogni componente del rumore viene aggiunta (in senso algebrico) una correzione funzione della frequenza, che rispecchi approssimativamente la risposta dell'orecchio umano. Questa correzione, che qui è riportata assumendo come riferimento la frequenza di 1 kHz (per la quale la correzione è quindi nulla per definizione), è assunta in questa scala come funzione della sola frequenza (mentre dovrebbe più correttamente essere presa come una funzione sia della frequenza che dell'intensità, vedi 5.2.6). Questa scala quindi non è perfetta, ma coglie comunque l'essenza del fenomeno, e viene pertanto spesso usata quando non è richiesta un'estrema precisione.

5.2.8 Per quantificare il rumore emesso dagli aerei si ricorre invece ad una scala più complessa, che tiene conto in dettaglio dei diversi fattori che contribuiscono al disturbo da rumore.

5.2.9 La figura riporta i livelli tipici del rumore di alcune fonti e/o ambienti.

5.3.1 Il rumore emesso da una fonte (supponendo che essa emetta con uguale intensità in tutte le direzioni), propagandosi sfericamente, dà luogo (per ogni valore della distanza dalla sorgente) ad una intensità che è la potenza della fonte diviso la superficie della sfera; il livello dell'intensità si determina al solito introducendo un'intensità di riferimento, vedi 5.2.2. Si ottiene quindi il livello d'intensità acustica ad una distanza generica r dalla fonte [si osservi che $\log_{10}(4\pi) = 10,99 \simeq 11$]. A questa attenuazione geometrica si aggiunge un'attenuazione atmosferica, dovuta all'eccitazione di gradi di libertà delle molecole dell'aria, e secondariamente alla sua viscosità. L'attenuazione dovuta all'assorbimento atmosferico può essere espressa in funzione della 'spessore' r di aria attraversato introducendo un coefficiente α , che va quindi misurato in dB/m, o per comodità in dB/km. Esso

dipende fortemente dalla frequenza del suono, nonché dalle condizioni di temperatura ed umidità dell'aria.

5.3.2 La tabella riporta i valori di α per alcune frequenze, per diversi condizioni di temperatura ed umidità relativa dell'aria. Si vede innanzitutto che l'attenuazione dipende molto fortemente dalla frequenza, ed in particolare che le frequenze più alte sono notevolmente attenuate, al contrario di quelle più basse. Si può poi osservare che, a parità di umidità relativa, il valore del coefficiente di assorbimento diminuisce all'aumentare della temperatura atmosferica. A parità invece di temperatura atmosferica, si vede poi che un aumento dell'umidità relativa riduce l'attenuazione.

5.4.1 Vediamo ora quali interventi si possono prendere, in termini di gestione delle traiettorie di salita/discesa, per cercare di limitare il rumore percepito a terra (vedremo poi come limitare il rumore emesso dal motore e dal velivolo). Innanzitutto, l'uso di angoli elevati di salita/discesa permette di ridurre l'estensione della regione che l'aereo sorvola a bassa quota. Per quanto riguarda la fase di decollo, l'angolo della traiettoria di salita dipende in particolare dal numero di motori installati sull'aereo. Poiché le norme impongono che l'aereo, in caso di avaria ad un motore in fase di rullaggio sulla pista, possa decollare egualmente, occorre prevedere che i motori forniscano una spinta superiore al minimo necessario (per decollo con tutti i motori operativi). Quindi un aereo bimotore dovrà poter decollare con un solo motore operativo; questo vuol dire che nella situazione normale in cui l'aereo decolla con entrambi i motori operativi, esso potrà sfruttare una spinta doppia rispetto al minimo necessario, e seguire perciò una traiettoria di salita molto rapida, che lo porterà rapidamente lontano da centri abitati (la maggiore spinta dei motori provoca certo anche un incremento di rumorosità, ma prevale l'effetto del rapido allontanamento). Un aereo trimotore dovrà invece poter decollare con due soli motori operativi, quindi in condizioni di decollo normale godrà di un eccesso di spinta del 50% rispetto al minimo necessario, effettuando perciò una salita ripida, ma non tanto quanto quella di un bimotore. Un quadrimotore avrà similmente una riserva di spinta del 33% circa, quindi traiettoria di salita meno ripida, e perciò darà luogo ad un più intenso rumore percepito a terra.

5.4.2 Per ridurre il rumore percepito da centri abitati in corrispondenza al passaggio di un aereo in fase di salita, si può effettuare una manovra di *cutback*, cioè ridurre la spinta, in modo da diminuire il rumore emesso dal motore. La conseguente traiettoria di salita sarà meno ripida, tuttavia questo altera molto poco la quota alla quale l'aereo sorvola il centro abitato. Questo può tuttavia portare ad un successivo aumento del rumore percepito da un eventuale secondo centro abitato, a causa della quota di sorvolo, in questo caso ben inferiore a quella in assenza di *cutback*. La manovra di *cutback* va quindi definita in funzione della distribuzione dei centri abitati intorno all'aeroporto. Nel caso di vecchi aerei, molto rumorosi, si è adottata presso alcuni aeroporti una politica che gli impone un limite massimo del peso al decollo (in modo da diminuire la spinta richiesta e quindi il rumore emesso), da conseguire riducendo il carico o la quantità di combustibile caricato. Per poter effettuare lunghe tratte, gli aerei devono quindi effettuare un ulteriore rifornimento di combustibile in un aeroporto meno 'sensibile' dal punto di vista del rumore.

5.4.3 La manovra convenzionale di avvicinamento agli aeroporti prevede una fase di volo orizzontale a bassa quota, con conseguente forte rumore percepito a terra, seguita da una fase finale di discesa

con angolo di volo di 3° . Per ridurre l'estensione dell'area interessata dal sorvolo a bassa quota, si può pensare di adottare una tecnica di 'discesa continua', in cui l'aereo discende con un angolo di discesa costante, pari ancora a 3° . Ancora meglio sarebbe adottare una tecnica di discesa 'a due segmenti', in cui l'aereo scende dapprima con angolo di 6° , che viene successivamente ridotto a 3° nella fase finale; questo tuttavia comporta il rischio che, in caso che la manovra di riduzione dell'angolo di volo fallisca, l'aereo arrivi al suolo con una velocità verticale molto elevata, dando luogo ad una sorta di *crash* controllato. Incidentalmente, per conseguire gli angoli di discesa citati occorre che l'aereo estenda tutte le superficie idonee a frenare il suo moto, ipersostentatori e carrelli.

5.4.4 Per ridurre l'impatto del rumore emesso dagli aerei sui centri abitati, si pensa in futuro di adottare traiettorie di discesa che portino ad evitarne il sorvolo, ove possibile.

5.4.5 L'ubicazione dell'aeroporto ha ovviamente un'importanza centrale sul disturbo arrecato dal rumore degli aerei. Sarebbe da questo punto di vista preferibile ubicare l'aeroporto lontano dalla città, ma questo comporta anche tempi e costi di trasferimento aeroporto/città più elevati. Inoltre, il personale che lavora all'aeroporto normalmente desidera abitare vicino al luogo di lavoro, e questo comporta la crescita di un nucleo abitato nei pressi dell'aeroporto, con tutti i relativi servizi, dove poi si ricrea quella situazione di disturbo da rumore che si era tentato di evitare.

5.5 La figura riporta i tipici contributi del motore (anche scisso nei suoi componenti) e del velivolo al livello sonoro percepito a terra (si ricordi che i livelli sonori non si sommano, vedi 5.2.2). Al decollo il rumore emesso dal motore è largamente dominante, in particolare quello derivante dal getto, per cui il contributo del velivolo è trascurabile. All'atterraggio invece i due contributi, motore e velivolo, sono circa paragonabili.

5.6 Una notevole riduzione del rumore emesso dal motore, in particolare dal getto, è stata conseguita grazie all'introduzione del turbofan, il quale presenta una velocità di uscita del getto (o dei getti, se a flussi separati) decisamente minore del turbogetto semplice (specie in turbofan ad alto rapporto di by-pass); l'intensità del rumore emesso dal getto presenta infatti una fortissima dipendenza dalla velocità di uscita, vedi successiva 5.9.1. Aumentando tuttavia la potenza estratta dal flusso caldo attraverso la turbina (ed elaborata da compressore e fan) aumenta il rumore emesso dalle turbomacchine. La figura riporta i tipici diagrammi di direttività del rumore emesso da un turbogetto degli anni '60, e da un turbofan degli anni '90; in questi l'estensione dei lobi in una data direzione indica il livello di potenza acustica emesso in tale direzione. Si può constatare che il rumore del getto si è fortemente ridotto, ma c'è stato un aumento del rumore emesso dalle turbomacchine a causa dell'introduzione del fan. Anche la direttività del rumore del getto è alterata, vedi 5.8.2 (a_1 più bassa nei turbofan).

5.7.1 Il rumore emesso in generale può essere del tipo a 'toni discreti', ovverosia caratterizzato da ben determinate frequenze, oppure a 'larga banda', ossia distribuito su un ampio spettro di frequenze. Esaminiamo dapprima le fonti di rumore a larga banda del fan e del compressore. Il rumore a larga banda è tipicamente generato dall'interazione delle pale con un flusso turbolento, nel quale si trovano vortici le cui dimensioni spaziano tra quelle dell'ordine di grandezza delle dimensioni del condotto, fino alle scale più piccole della turbolenza (cosiddetta scala di Kolmogorov, che può arrivare anche ai micron), e che pertanto presentano frequenze di interazione con le pale che abbracciano un campo

molto ampio. La turbolenza è generata quando il flusso d'aria che investe il velivolo viene a contatto con superfici solide, quindi nello strato limite, in corrispondenza a discontinuità delle superfici, ed in ogni stadio della palettatura. Un esempio di fonte di rumore a larga banda è quello dovuto al moto delle estremità delle pale del fan entro lo strato limite della presa d'aria. La potenza acustica così generata è proporzionale alla quinta potenza della velocità del flusso.

5.7.2 Vediamo ora come viene generato il rumore a toni discreti, che è in questo caso dovuto al passaggio di una pala del rotore sopra una pala dello statore, evento in corrispondenza del quale si produce un disturbo di pressione. Chiamiamo B il numero delle pale del rotore (dal termine inglese *blade*), e V il numero delle pale dello statore di un generico stadio (da *vane*). Consideriamo qui il caso in cui B sia multiplo esatto di V . Supponiamo dapprima, come semplificazione estrema, di avere quattro pale rotoriche ed una sola statorica ($B = 4, V = 1$, in alto); si ha in tal caso emissione di un segnale di rumore ogni quarto di giro dell'asse del motore, quindi con una frequenza pari a quattro volte la velocità di rotazione di tale asse. Passiamo a considerare il caso di (ancora) quattro pale rotoriche e due pale statoriche ($B = 4, V = 2$, in mezzo); si hanno adesso due emissioni di rumore ogni quarto di giro dell'asse del motore, ma la frequenza è ancora pari a quattro volte la velocità di rotazione dell'asse (perché le due emissioni sono simultanee). Infine, supponiamo di avere sempre quattro pale rotoriche ma quattro statoriche ($B = 4, V = 4$, in basso); si hanno quattro segnali di rumore simultanei ogni quarto di giro dell'asse del motore, con una frequenza quindi sempre pari a quattro volte la velocità di rotazione dell'asse. In definitiva, nel caso in cui B sia multiplo esatto di V , la frequenza di emissione del rumore è in ogni caso B volte la velocità di rotazione dell'asse (in giri al secondo).

5.7.3 Consideriamo adesso il caso in cui B sia multiplo inesatto di V (ossia, detto in altri termini, in cui B non è multiplo di V). Supponiamo dapprima di avere una pala statorica in meno rispetto a quelle rotoriche, per esempio quattro pale rotoriche e tre statoriche ($B = 4, V = 3$, in alto); si ha in tal caso emissione di tre segnali di rumore ogni quarto di giro dell'asse del motore, quindi con una frequenza pari a dodici volte la velocità di rotazione dell'asse. Passiamo a considerare il caso in cui invece lo statore abbia una pala in più rispetto a quelle rotoriche, per esempio quattro pale rotoriche e cinque statoriche ($B = 4, V = 5$, in basso); si ha in tal caso emissione di cinque segnali di rumore ogni quarto di giro dell'asse del motore, quindi con una frequenza pari a venti volte la velocità di rotazione dell'asse. In definitiva, nel caso in cui B sia multiplo inesatto di V , la frequenza di emissione del rumore è pari a $B \cdot V$ volte la velocità di rotazione dell'asse (in giri al secondo). Si noti che nel presente caso di B multiplo inesatto di V la generazione dei disturbi di rumore segue un andamento rotatorio, concorde con il senso di rotazione della macchina nel caso $B > V$, discorde se $B < V$. Sottolineiamo che le frequenze individuate qui e nella figura precedente sono quelle del modo fondamentale, al quale si aggiungono poi quelle delle armoniche di ordine superiore. Infatti, ogni segnale periodico può essere decomposto in una serie di Fourier nella quale compaiono (a meno che tale segnale non sia esattamente sinusoidale, nel qual caso si ha solo il modo fondamentale) termini sinusoidali di frequenza multipla di quella fondamentale. Un ulteriore fattore che porta all'allargamento dello spettro del rumore emesso è dovuto al fatto che le diverse pale (rotoriche o statoriche) di uno stadio, pur essendo nominalmente tutte uguali, presentano però piccole differenze

dovute sia a tolleranze di lavorazione, sia a fenomeni che ne accompagnano l'uso (p. es. corrosione, danni di ingestione di oggetti estranei, come uccelli). In un fan moderno si può anche avere rumore da urti, nel caso in cui le estremità delle pale si trovino ad operare in regime supersonico.

5.7.4 Il rumore generato dal fan e dal compressore fuoriesce anteriormente attraverso la presa d'aria e posteriormente attraverso gli ugelli; entrambi in virtù della propria geometria fanno insorgere una direttività del rumore, vedi anche i diagrammi in 5.6. Si può trarre vantaggio dalla geometria della presa d'aria per limitare il rumore emesso verso terra, prolungando il labbro inferiore della presa, come indicato nella figura in basso. Questa soluzione asimmetrica porta però ad una distorsione del profilo di velocità che esce dalla presa d'aria, la quale a sua volta porta ad una distorsione del profilo di temperatura in uscita dalla turbina, con conseguente peggioramento del *pattern factor*. Bisogna perciò trovare una soluzione di compromesso. Gli altri strumenti a disposizione del progettista per controllare il rumore emesso da fan e presa d'aria sono: 1) aumentare la spaziatura tra rotore e statore (a valle di ogni palettatura si forma una scia turbolenta, la quale tende a decadere aumentando la spaziatura), che però porta ad un aumento di peso, 2) agire sul numero di pale di rotore e statore, se in particolare V risulta superiore a quanto indicato (M è il numero di Mach del flusso, n è l'ordine del modo considerato, vedi 5.7.3) i modi di ordine n si esauriscono dentro il condotto – questo porta però ad un numero di pale statoriche elevato, p. es. se consideriamo il solo modo fondamentale ($n = 1$) ed un numero di Mach prossimo all'unità, si vede che deve essere $V > 2, 2B$, 3) il rumore degli stadi intermedi può essere in parte schermato dagli stadi a monte o a valle, 4) utilizzare un profilo della presa d'aria 'pulito' dal punto di vista aerodinamico, senza *slats* (alette che nei primi turbogetti venivano aperte al decollo per consentire di ingerire una maggiore portata d'aria), e possibilmente senza *bottoming* (appiattimento della presa d'aria nella parte inferiore per cercare di contenere la lunghezza del carrello di atterraggio – gli sforzi sul carrello all'atterraggio aumentano all'aumentare della sua lunghezza).

5.7.5 La figura mostra le differenze tra un tipico turbofan degli anni '60 ed uno degli anni '80. Si può notare in particolare i turbofan moderni non presentano le alette per aumentare la portata d'aria; tutte le superfici dei condotti sono rivestite di *liners* acustici assorbenti, vedi 5.12.1; è stata aumentata la distanza tra rotore e statore, ed il numero delle pale dello statore è più del doppio di quelle del rotore, vedi 5.7.4; infine, i condotti del flusso secondario sono lunghi, vedi 5.12.2. Questi accorgimenti hanno consentito di ridurre di circa 20 dB il rumore percepito (quindi il disturbo si è ridotto a circa un quarto, vedi 5.2.2).

5.8.1 Il flusso nello statore del primo stadio della turbina, la cosiddetta piastra ad ugelli, è generalmente critico, per cui il rumore della turbina non può risalire a monte e si propaga solo verso valle. Anche in questo caso il rumore a larga banda è generato dall'interazione delle pale con il flusso turbolento che esce dal combustore, e con lo strato limite che cresce sulle pareti dei condotti. Poiché la temperatura del flusso nella turbina è nettamente superiore a quella che si ha nel fan e nel compressore (quindi anche la velocità del suono locale è più alta), il numero di Mach del flusso, a parità di velocità, risulta più basso, per cui per soddisfare la condizione sul numero delle pale statoriche necessarie a sopprimere i modi di ordine n basta un valore di V abbastanza contenuto. Anche in questo caso si può poi aumentare la spaziatura tra pale statoriche e rotoriche per ridurre il rumore, vedi 5.7.4.

Occorre poi notare che il rumore della turbina che esce dagli ugelli viene rifratto per effetto degli strati di miscelamento che si formano all'uscita degli ugelli tra flusso primario (caldo), flusso secondario (con temperatura lievemente superiore a quella atmosferica), ed atmosfera, vedi 5.8.2. A causa delle differenti temperature di questi tre flussi, e quindi delle conseguenti diverse velocità di propagazione del suono, si ha un fenomeno analogo a quello della rifrazione della luce all'interfaccia tra due mezzi ad indice di rifrazione diverso (anche se in questo caso più che una rifrazione in corrispondenza ad un'interfaccia, si ha una rifrazione continua graduale attraverso uno strato di miscelamento).

5.8.2 La rifrazione ad un'interfaccia è regolata dalla legge di Snell, che determina l'angolo θ_2 che l'onda rifratta forma con la normale all'interfaccia, noto l'equivalente angolo di incidenza θ_1 . Si vede quindi che passando da un mezzo caldo (a_1 alta) ad uno freddo (a_2 bassa) l'angolo θ deve diminuire, e questo porta al comportamento indicato, vedi 5.8.1.

5.9.1 Il rumore del getto è principalmente dovuto al miscelamento tra flussi a diversa velocità (getto primario e secondario tra loro, e getto nel suo complesso con l'atmosfera). Se l'ugello è sottoespanso, la pressione sulla bocca di uscita dell'ugello è maggiore di quella atmosferica, per cui appena il getto esce dall'ugello il relativo tubo di flusso tende ad allargarsi in maniera quasi esplosiva; le particelle fluide acquistano perciò una componente di velocità radiale che porta alla formazione di una depressione nella parte centrale del getto, con successiva inversione del moto radiale, e formazione di una serie di urti stazionari, con un andamento periodico come mostrato. A questi urti è anche associata generazione di rumore. L'intensità del rumore dovuto al miscelamento è teoricamente proporzionale all'ottava potenza della velocità del getto, anche se in realtà questa (fortissima) dipendenza è confermata sperimentalmente solo per valori intermedi della velocità di uscita del getto. Per valori bassi della velocità di uscita, altre fonti di rumore mascherano il rumore emesso dal getto, mentre per valori molto alti (tipici ad esempio dei turbogetti con postbruciatore) assumono importanza fenomeni di turbolenza in cui compaiono strutture organizzate, per le quali non è valida la formulazione teorica citata. In ogni caso è comunque sempre vero che l'intensità del rumore emesso dal getto cresce grandemente con la sua velocità. Il turbofan, che riduce la velocità del getto tanto più quanto più è alto il rapporto di by-pass, è quindi un'ottima soluzione per contenere il rumore emesso dal getto (oltre che, ovviamente, per ridurre i consumi).

5.9.2 Il turbofan a flussi separati dà luogo a due *mixing layers*, uno tra getto primario e getto secondario, ed il secondo tra getto secondario e atmosfera, oppure, più a valle, tra getto risultante dall'avvenuto miscelamento dei flussi primario e secondario, ed atmosfera. Le non uniformità di velocità e temperatura nei due getti danno quindi luogo ad una significativa produzione di rumore. Per contro, il turbofan a flussi associati, in cui velocità e temperature sono (almeno idealmente) uniformate prima di espellere il flusso dall'ugello, risulta più silenzioso, e come noto risulta anche in un minor consumo specifico. Tale soluzione richiede però condotti più lunghi, quindi comporta pesi maggiori per i motori. Osserviamo in particolare che nei turbofan ad alto rapporto di by-pass, adottati per ridurre il consumo ed il rumore emesso, le maggior dimensioni del fan risultano in frequenze caratteristiche più basse, che in particolare in fase di avvicinamento possono dar luogo a vibrazioni di strutture a terra. Recentemente sono stati proposti ugelli *chevron*, con bordo d'uscita frastagliato, i quali danno luogo ad una significativa riduzione del rumore, con una perdita di spinta

limitata orientativamente allo 0,25%.

5.9.3 Nei primi turbogetti (semplici) il rumore era essenzialmente dovuto al getto, causa la velocità di uscita molto alta, vedi 5.9.1, per cui la riduzione del rumore del motore passava necessariamente per la riduzione del rumore emesso dal getto. A questo scopo si utilizzavano condotti che distribuivano il flusso su tanti ugelli più piccoli, portando di conseguenza a frequenze di emissione più elevate, così da poter trarre vantaggio dalla maggiore attenuazione atmosferica, vedi 5.3.2. Ovviamente questo comportava anche maggiori perdite di pressione interne e maggiore resistenza aerodinamica esterna, nonché un aumento di peso.

5.10 Il rumore dalla camera di combustione è essenzialmente dovuto al flusso turbolento, che come detto genera rumore a larga banda, vedi 5.7.1. Esso risulta tuttavia abbastanza contenuto rispetto a quello emesso da altre fonti, per cui non sono in genere richiesti interventi particolari.

5.11 All'atterraggio si ha una notevole emissione di rumore quando la direzione della spinta dei motori viene invertita, per consentire l'arresto dell'aereo in una lunghezza di pista contenuta; in tali condizioni il motore viene spinto al massimo (per ottenere il massimo effetto frenante), anche se per un tempo breve (pochi secondi). Negli invertitori dei turbofan può essere invertita la direzione dell'intero getto (configurazioni a e b), oppure solo il getto freddo, configurazione c; quest'ultima soluzione genera meno rumore perché la pressione del flusso freddo è più bassa di quella del getto caldo (nei turbofan a flussi separati). D'altronde, nei turbofan ad alto rapporto di by-pass il flusso caldo contribuisce alla spinta solo orientativamente per il 20% (quindi l'80% va ascritto al flusso freddo), per cui anche invertendo il solo flusso freddo si ha una sufficiente generazione di spinta negativa. A causa del rumore emesso in fase di inversione della spinta, in alcuni aeroporti (con piste sufficientemente lunghe) il suo uso è consentito solo in situazioni di emergenza o pista sdruciolevole.

5.12.1 Una soluzione che ha contribuito ad abbattere nettamente il rumore emesso dai motori, oltre all'introduzione del turbofan, è stata l'utilizzo di *liners* acustici assorbenti disposti sulle pareti interne dei condotti del motore. Questi sono lamiere perforate distanziate dalla pareti dei condotti da una struttura a nido d'ape, vedi anche la successiva 5.12.3. Questi *liners* assorbono il rumore attraverso due meccanismi: 1) al passaggio di un'onda di sovrappressione il gas è forzato ad entrare nella struttura a nido d'ape attraverso le perforazioni, mentre con la successiva onda di depressione ne viene richiamato. Questo meccanismo è simile a quello di un ammortizzatore, e viene detto 'resistivo'; 2) un'onda incidente può essere cancellata da quella riflessa se la spaziatura tra la parete del condotto ed il lamierino perforato è pari ad un quarto della lunghezza d'onda del suono (meccanismo 'reattivo'). La profondità della struttura a nido d'ape va quindi scelta attentamente per cercare di smorzare le frequenze di maggior interesse nei diversi componenti del motore. L'attenuazione che si riesce a conseguire è notevole, circa 5 dB nei condotti della presa d'aria (dai quali esce il rumore del fan e del compressore), e più di 10 dB nei condotti di scarico. Naturalmente i *liners* assorbenti comportano anche problemi: un aumento di peso (ma questo può essere contenuto cercando di utilizzare la struttura a nido d'ape per irrobustire la gondola del motore), la possibilità che acqua (per esempio piovana) resti intrappolata nella struttura a nido d'ape, e quindi congeli ad alta quota nei condotti della presa d'aria, aumentando di volume e quindi danneggiando il *liner*, l'analoga possibilità che

olio e/o combustibile restino intrappolati nei condotti di scarico, dove l'alta temperatura può dare luogo ad incendi. Devono poi poter resistere a temperature molto basse (quelli della presa d'aria) o relativamente alte (quelli applicati sui condotti del flusso caldo).

5.12.2 La figura mostra come il rumore viene attenuato, per effetto in particolare di successive riflessioni sulle pareti dei condotti, in corrispondenza a ciascuna delle quali si ha un assorbimento da parte del *liner*. Conviene quindi utilizzare condotti a rapporto lunghezza/diametro elevato, per avere numerose riflessioni sulle pareti.

5.12.3 La figura mostra alcune tipologie di *liners* acustici. Quelli destinati a rivestire la presa d'aria possono essere realizzati in alluminio, mentre quelli dei condotti caldi devono essere in acciaio (pesante) o titanio (più leggero). Si può anche adottare un doppio strato, con differenti altezze delle strutture a nido d'ape, per poter smorzare efficacemente per effetto reattivo due frequenze tipiche anziché una sola.

5.13 Il rumore emesso dal velivolo diventa significativo in fase di atterraggio, quando quello emesso dal motore è meno importante. Esso è dovuto allo strato limite turbolento che si forma su tutta la struttura dell'aereo, alle discontinuità che si manifestano nella geometria della superficie dell'ala quando gli ipersostentatori sono estratti, ai carrelli di atterraggio, nonché ai vortici che si formano in corrispondenza ai bordi d'uscita. Per limitarlo, si possono applicare tecniche che tendono a far rimanere lo strato limite in regime laminare su una frazione quanto più possibile estesa della superficie dell'aereo, sia mediante un opportuno disegno aerodinamico, sia mediante aspirazione dello strato limite attraverso materiali porosi. Queste tecniche sono particolarmente interessanti perché riducono anche la resistenza aerodinamica offerta dal velivolo. Sono anche stati studiati carrelli opportunamente disegnati per limitare il rumore emesso (il carrello è un'importante fonte di rumore), ma questi presentano lo svantaggio di un significativo aumento di peso.

5.14 Abbiamo fin qui considerato il rumore avvertito a terra, ma ha ovviamente importanza limitare anche il rumore avvertito dai passeggeri in cabina. Esso è principalmente dovuto allo strato limite turbolento sulla fusoliera. L'intensità del rumore emesso cresce con la velocità di volo dell'aereo secondo un'esponente compreso tra 5 e 6; tuttavia, esso decresce con la quota per via di una dipendenza quadratica dalla pressione, per cui il massimo rumore in cabina si ha nella fase di decollo (anche per effetto dei motori). A questa fonte di rumore va aggiunto quello, spesso non indifferente, proveniente dall'impianto di condizionamento e pressurizzazione, e naturalmente quello dei motori. Lo strato limite turbolento si ispessisce avanzando lungo la fusoliera, per cui i posti più rumorosi sono quelli in coda (e infatti la prima classe è sempre ubicata vicino alla prua). Per limitare il rumore in cabina si usano materiali insonorizzanti. Il rumore proveniente dai motori, nelle configurazioni con i motori disposti sotto l'ala, è parzialmente schermato da quest'ultima; tuttavia, la disposizione sotto l'ala provoca anche una riflessione verso il basso di quella parte del rumore dall'ugello che andrebbe altrimenti indirizzata verso l'alto, con conseguente più intenso rumore percepito a terra.

5.15 La figura riassume gli accorgimenti che si possono prendere per controllare il rumore emesso da un motore turbofan.

5.16.1 Consideriamo ora il rumore emesso da velivoli propulsi da eliche. Questo rumore consta

prevalentemente di una componente a toni discreti, legata al passaggio delle pale, pur essendoci anche una componente a larga banda, legata come sempre a fenomeni turbolenti. Il rumore diventa intenso quando il numero di Mach all'estremità delle pale, M_{tip} , si avvicina all'unità. Il valore di M_{tip} deriva dalla composizione della velocità di avanzamento dell'aereo con la velocità tangenziale dovuta alla rotazione dell'elica, e risulta perciò massimo in condizioni di volo di crociera (anziché al decollo come accade per i motori a getto). Questo porta anche ad un rumore in cabina elevato durante la fase di crociera, fattore che contribuisce a far preferire i turbofan per voli a lungo raggio (un rumore elevato in cabina può essere sopportato solo per un volo di durata limitata; inoltre, il turbofan consente velocità di volo più elevate, quindi importanti risparmi di tempo su tratte lunghe). Per ridurre il rumore emesso dalle eliche, occorrerebbe in linea di principio cercare di contenere il numero di Mach all'estremità delle pale (ma questo vorrebbe dire ridurre la velocità di volo, la velocità di rotazione dell'elica, e la lunghezza delle pale, alternative poco appetibili), oppure si può tentare di ridurre il disturbo da rumore spostandolo su frequenze più alte aumentando il numero delle pale (frequenze più alte sono meno avvertite dall'orecchio umano, e sono meglio attenuate dall'atmosfera). Per coppie di eliche controrotanti si possono ancora applicare gli accorgimenti considerati per le turbomacchine, in particolare giocare sulla spaziatura tra le due eliche, ed utilizzare un numero di pale diverso. Ricapitolando, il problema delle eliche è il rumore percepito in cabina in crociera, anziché quello avvertito a terra in fase di decollo e atterraggio.

5.16.2 Il propfan è una particolare elica che mantiene un rendimento elevato anche a valori del numero di Mach relativamente alti, grazie ad eliche che nella parte terminale, anziché essere diritte, sono incurvate in modo simile ad un'ala a freccia. L'alto valore del numero di Mach di volo comporta però un numero di Mach all'estremità delle pale elevato, con conseguente forte emissione di rumore. Per contenere il disturbo arrecato ai passeggeri, è possibile installare i motori in coda, preferibilmente con eliche spingenti, in modo da allontanare quanto più possibile la fonte di rumore dai passeggeri.

5.17 Gli aviogetti supersonici, per l'espressione della spinta $F \simeq \dot{m}_a (u_e - V_0)$, richiedono velocità di uscita del getto molto elevate per poter ottenere una spinta ad alta velocità di volo. Queste u_e molto elevate generano rumore intensissimo, vedi 5.9.1. Per superare questo problema sarebbe necessario sviluppare motori a ciclo variabile, che possano cioè lavorare come turbofan nelle fasi di decollo/salita/atterraggio, per poi passare a turbogetto semplice, o turbogetto con postbruciatore in fase di volo di crociera. Un'altra importante fonte di rumore dei velivoli supersonici è dovuta al cosiddetto *bang* (o *boom*) sonico, dovuto al passaggio del cono di Mach generato dal velivolo sul terreno sottostante. La corrispondente perturbazione di pressione al suolo ha in realtà un'ampiezza minima, ma la rapidità con la quale avviene la rende particolarmente fastidiosa. Per limitare l'intensità dell'urto si potrebbe limitare il numero di Mach di volo a valori moderatamente supersonici, p.es. intorno 1,5, ma in queste condizioni l'economia del velivolo risulta insoddisfacente se confrontata con quella di un aereo subsonico. Infatti, il rendimento di un motore aeronautico in generale cresce con la velocità (almeno fin quando u_e si mantiene sostanzialmente superiore a V_0) perché si riduce il lavoro richiesto al compressore, ma al passaggio attraverso il muro del suono i valori dell'efficienza aerodinamica L/D del velivolo tipicamente dimezzano (passando per esempio da circa 20 a circa 10). Perché i due effetti si compensino, occorre considerare un numero di Mach di volo prossimo a 3.

IMPATTO AMBIENTALE DEI MOTORI AERONAUTICI

D. Lentini, a.a. 2005/06

1. INTRODUZIONE

- TESTO:

- dispense e trasparenze (saranno progressivamente immesse in rete):

- <http://dma.ing.uniroma1.it/STAFF/lentini/lentini.html>

- (sotto la voce *Lecture Notes*)

- diego.lentini@uniroma1.it, tel. 064458281, fax 06483729

- REGISTRARSI NELL'ELENCO

- ORARIO LEZIONI E RICEVIMENTO

1.2 EMISSIONI

- CHIMICHE:

- INQUINANTI: NO_x , SO_x , *soot*, CO, UHC (*Unburned Hydro-Carbons*)
- CONTAMINANTI: CO_2 , H_2O

È VERO CHE GLI AEREI INCIDONO SOLO PER IL 3.5% SUI CONSUMI TOTALI DI COMBUSTIBILI (PERCENTUALE PERÒ IN CRESCITA), MA OPERANO IN QUOTA

- RUMORE:

- DAL MOTORE
- DAL VELIVOLO (→ denominazione del corso un po' limitativa)

1.3 NORME SULLE EMISSIONI

1. IMPOSTE DAPPRIMA DA FAA NEGLI USA (FAR), JAA IN EUROPA, POI CONFLUITE NELL'ANNEX 16 DELLE NORME ICAO
2. INOLTRE, NORME LOCALI (ES. HEATHROW)
3. NORME SEMPRE PIÙ STRINGENTI CON IL PASSARE DEGLI ANNI
4. STANNO DIVENTANDO IL FATTORE CONTROLLANTE NELLO SVILUPPO DI NUOVI MOTORI ED AEREI (GIÀ IN PASSATO PER SST, *SuperSonic Transport*)
5. INTERESSE ANCHE ECONOMICO (ES. ORARI AEROPORTI)

1.4 ESEMPIO: RUMORE

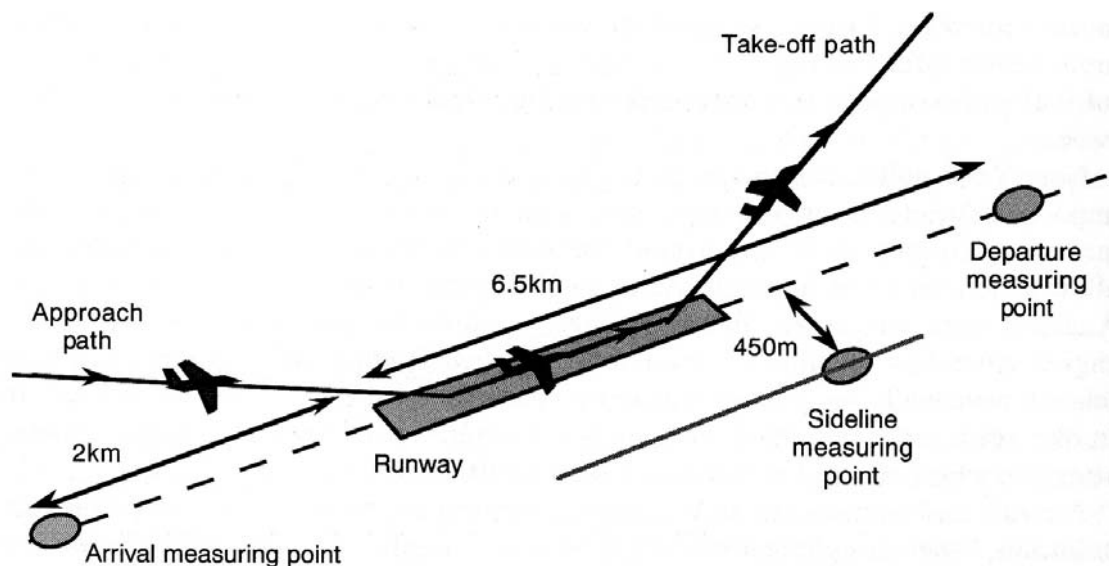


Figure 1: Posizioni standard per la misura del rumore.

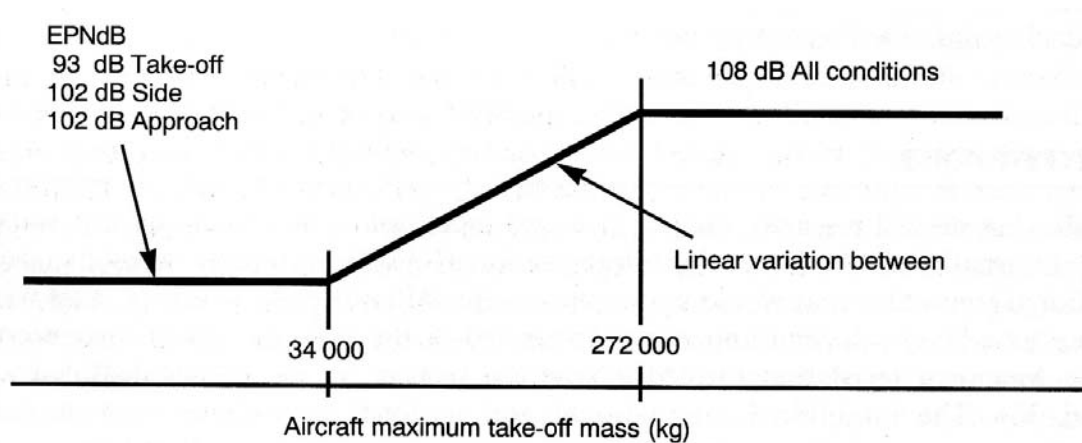


Figure 2: Limiti sul rumore imposti dalle norme.

1.5 RIDUZIONE STORICA DEL CONSUMO SPECIFICO

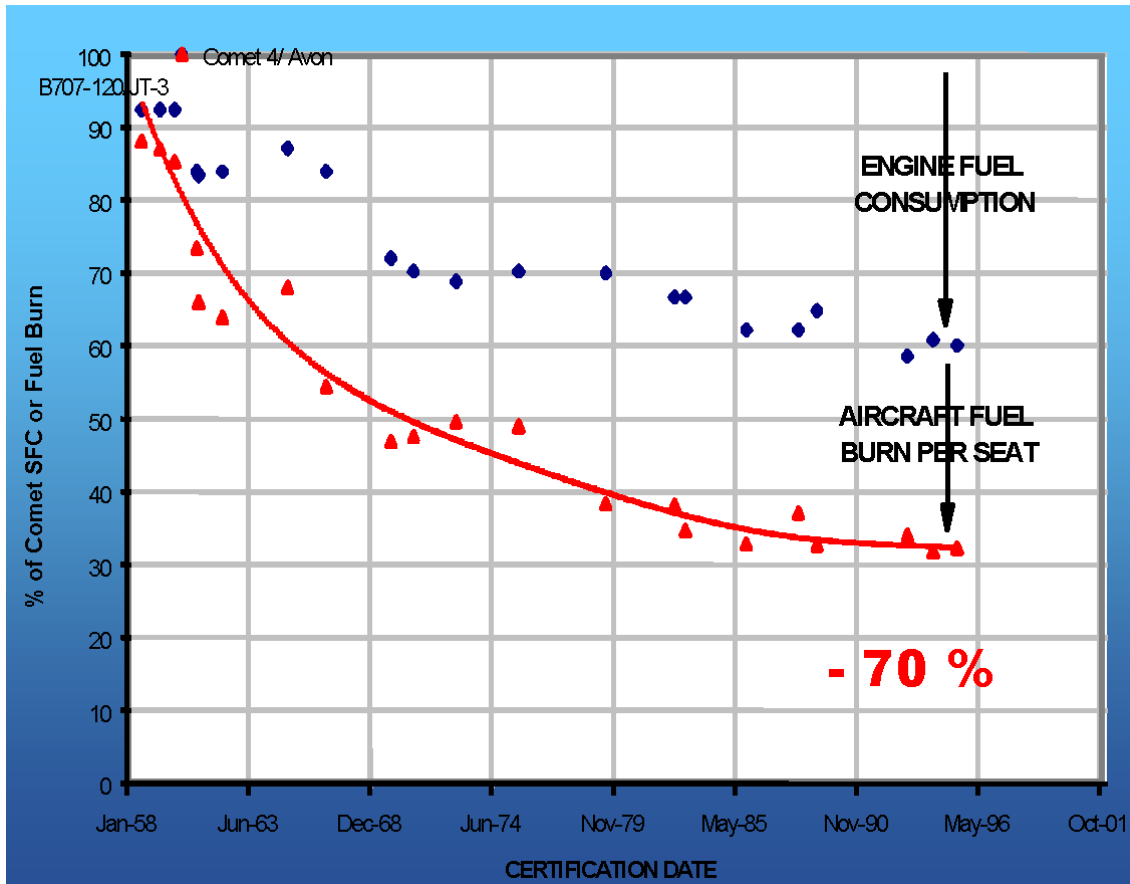


Figure 3: Riduzione storica del consumo per unità di spinta, e per passeggero-chilometro.

1.6 RIDUZIONE STORICA DEL RUMORE EMESSO

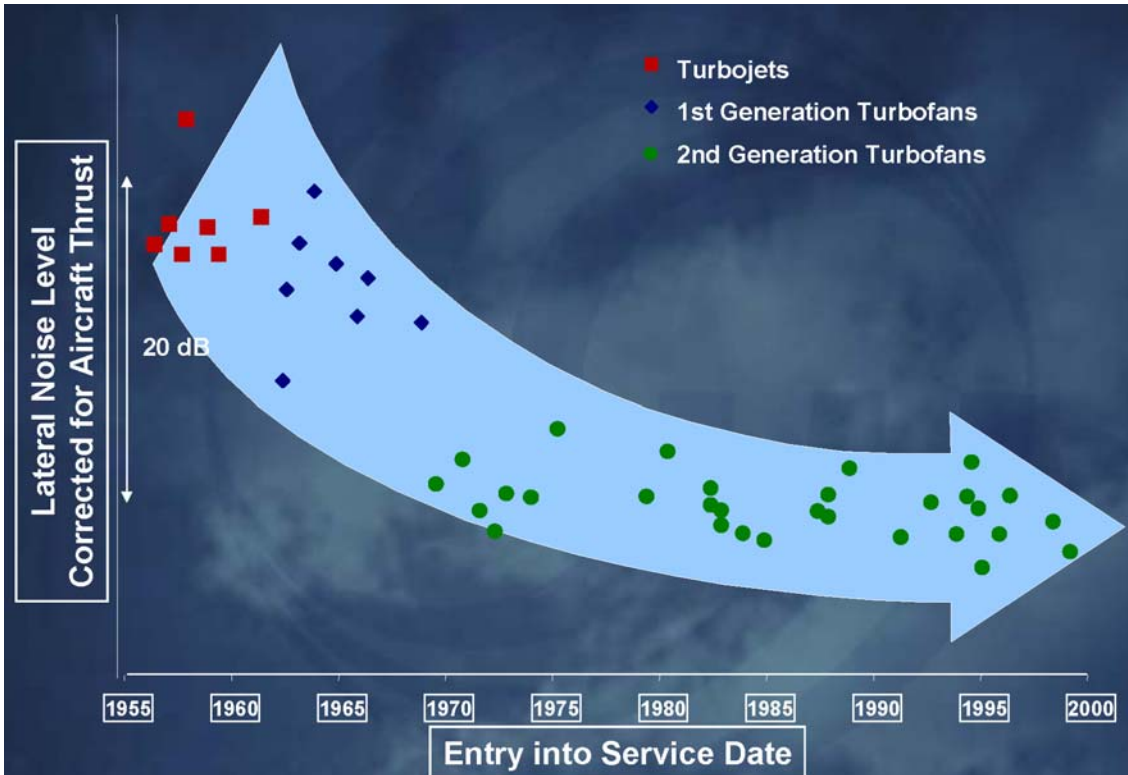


Figure 4: Riduzione storica del rumore emesso da aerei commerciali.

1.7 OBIETTIVI ACARE 'VISION 2020'

- *Advisory Council for Aerospace Research in Europe*
 - RIDURRE CO₂ DEL 50%
 - RIDURRE NO_x DELL'80%
 - RIDURRE A METÀ IL RUMORE
 - ELIMINARE DISTURBO DA RUMORE FUORI AEROPORTI
 - TAGLIARE SOSTANZIALMENTE I COSTI OPERATIVI
 - RIDURRE DI 5 VOLTE IL TASSO DI INCIDENTI
 - RIDURRE DRASTICAMENTE L'IMPATTO DI ERRORI UMANI
 - ASSICURARE 99% DEI VOLI NON SUBISCA RITARDI > 15 m
 - NUOVI STANDARDS DI QUALITÀ ED EFFICIENZA
 - DIMEZZARE IL *TIME-TO-MARKET*
 - MIGLIORARE SINERGIE TRA RICERCA MILITARE E CIVILE
- PER LE EMISSIONI, QUESTI OBIETTIVI IMPLICANO UN RAD-DOPPIO DEL TASSO STORICO DI MIGLIORAMENTO FINORA CONSEGUITO

1.8 COME RAGGIUNGERE GLI OBIETTIVI ESEMPIO: CO₂

- OBIETTIVO: RIDUZIONE 50% CO₂
 - 20% DAI MOTORI (RIDUZIONE TSFC)
 - 20% DALL'AERODINAMICA
 - 10% DALLA GESTIONE DEL TRAFFICO AEREO
 - ? RIDUZIONE PESO, QUINDI SPINTA RICHIESTA (MATERIALI, STRUTTURE)
 - IL RAGGIUNGIMENTO DEGLI OBIETTIVI COMPORTA QUINDI R&D (*RESEARCH AND DEVELOPMENT*) IN MOLTI SETTORI
- SOLO POCHI GRANDI AZIENDE (DI AEREI E MOTORI) POSSONO RIUSCIRE
- SI PREVEDE TUTTAVIA CHE IL VOLUME DEL TRAFFICO AEREO TRIPLICHERÀ ENTRO IL 2020...

1.9 OTTIMIZZAZIONE

- RISULTA RELATIVAMENTE FACILE CONSEGUIRE I *SINGOLI* OBIETTIVI DI RIDUZIONE DELLE EMISSIONI...
 - MA IL PROBLEMA È CHE BISOGNA CONSEGUIRLI *TUTTI* SIMULTANEAMENTE
- OTTIMIZZAZIONE COMPLESSIVA DEL PROGETTO
- *COSA* OTTIMIZZARE (DOC, RITORNO SULL'INVESTIMENTO...)?
E SULLA BASE DI QUALE PREZZO DEL COMBUSTIBILE?
 - OTTIMIZZAZIONE CON VINCOLI (N. VINCOLI PUÒ ESSERE > N. VARIABILI DI PROGETTO)

1.10 SI PUÒ OTTIMIZZARE UNA SOLA COSA ALLA VOLTA

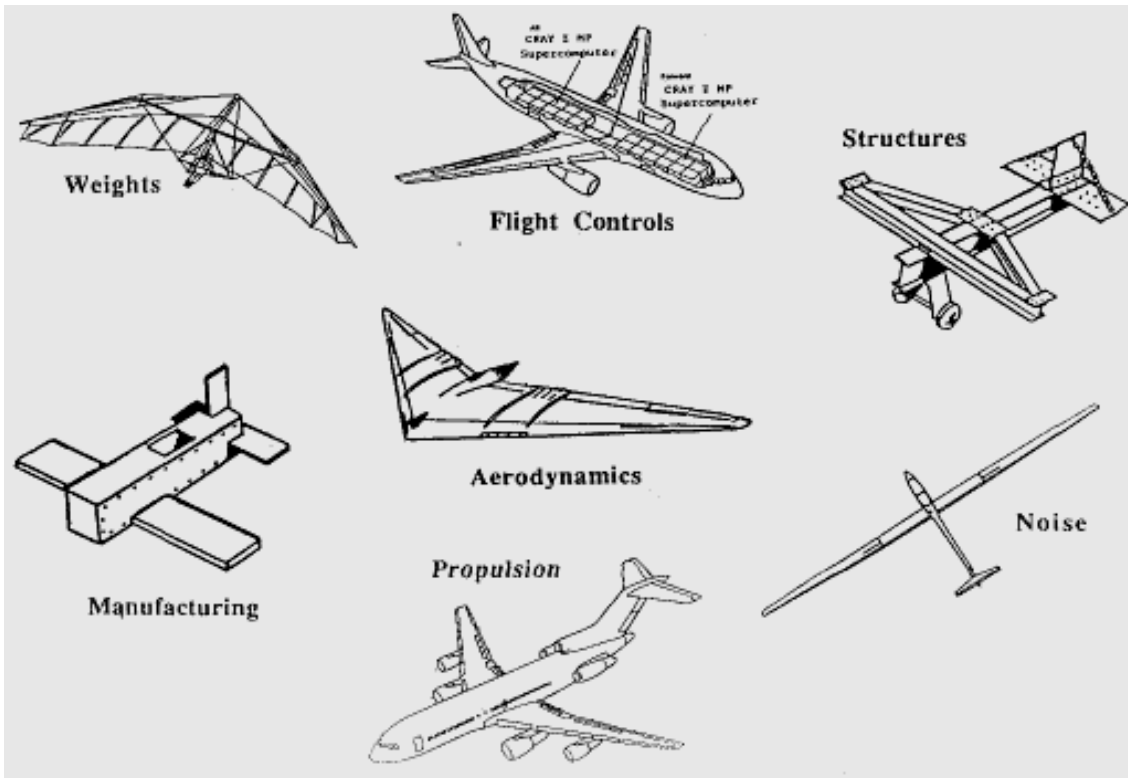


Figure 5: (Da non prendere troppo sul serio)...

1.11 POSSIBILE RISPOSTA: CONFIGURAZIONI NON CONVENZIONALI



Figure 6: Configurazione *Over the Wing Nacelle*.

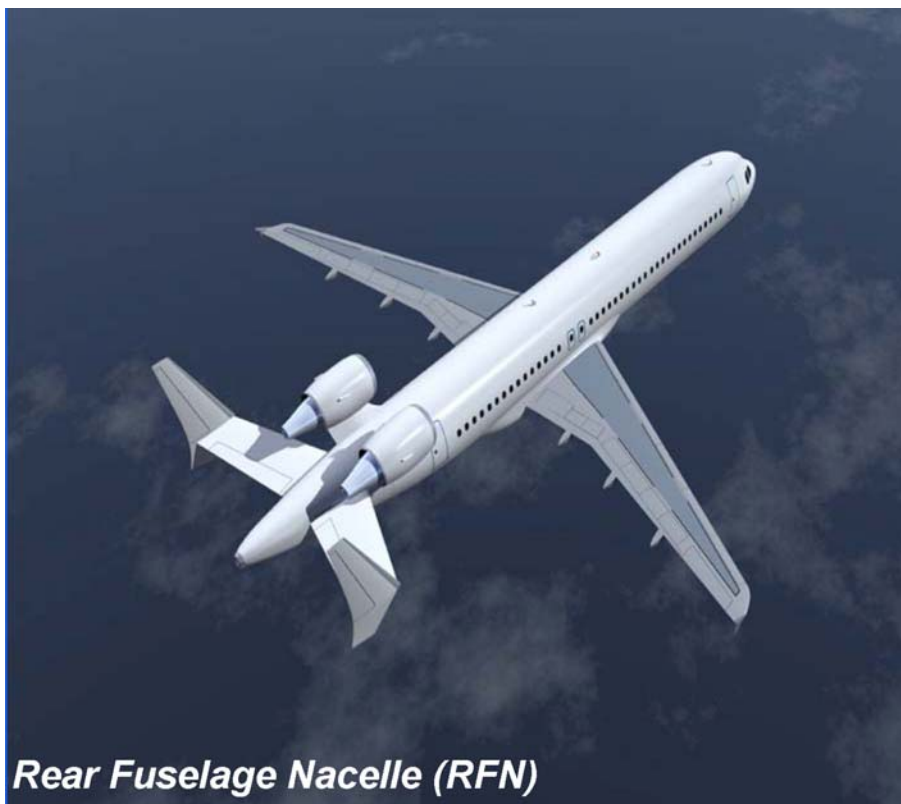


Figure 7: Configurazione *Rear Fuselage Nacelle*.

1.12 ...O CONFIGURAZIONI ANCORA MENO CONVENZIONALI

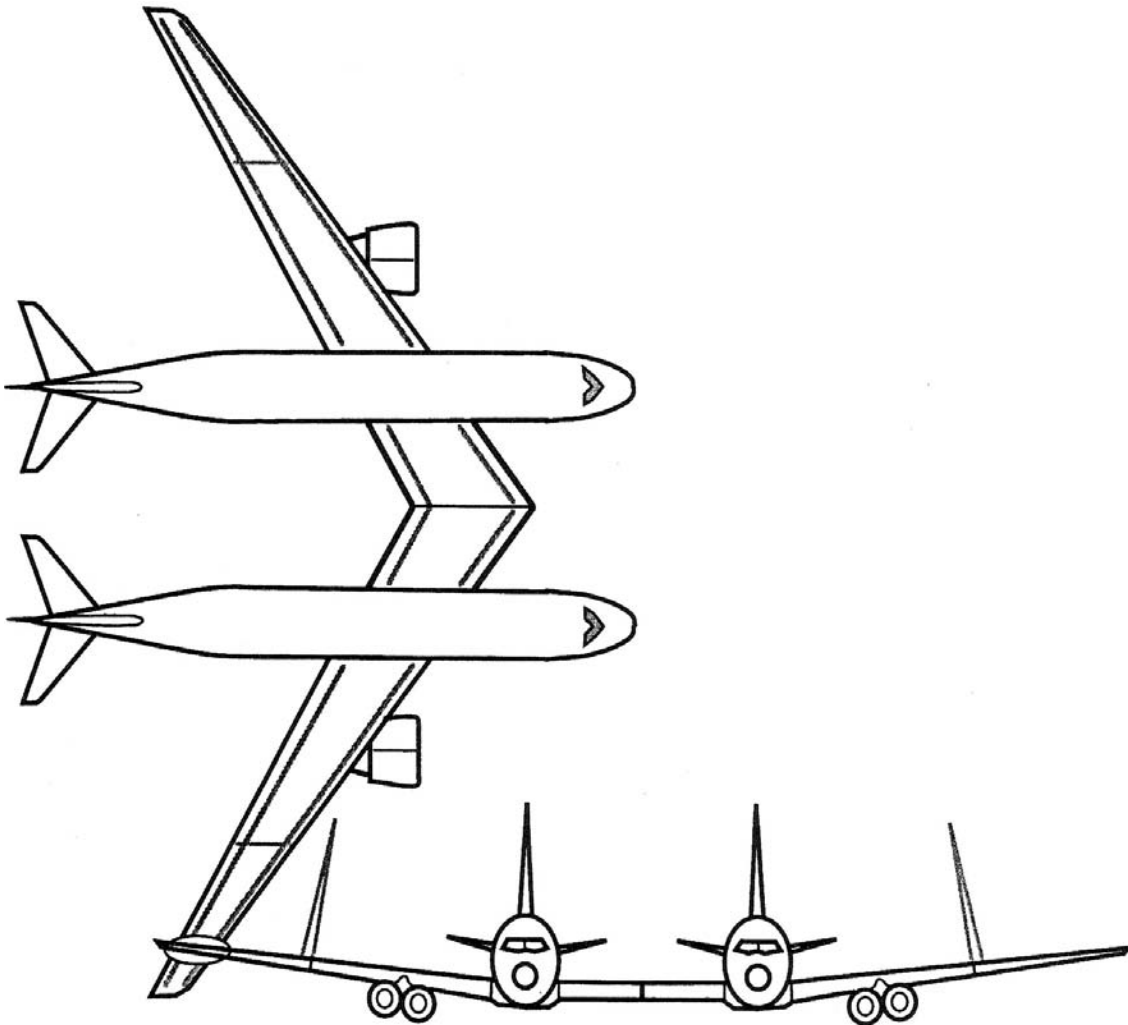


Figure 8: Configurazione *twin-fuselage*.

1.13 RISCHIO ASSOCIATO A NUOVE CONFIGURAZIONI

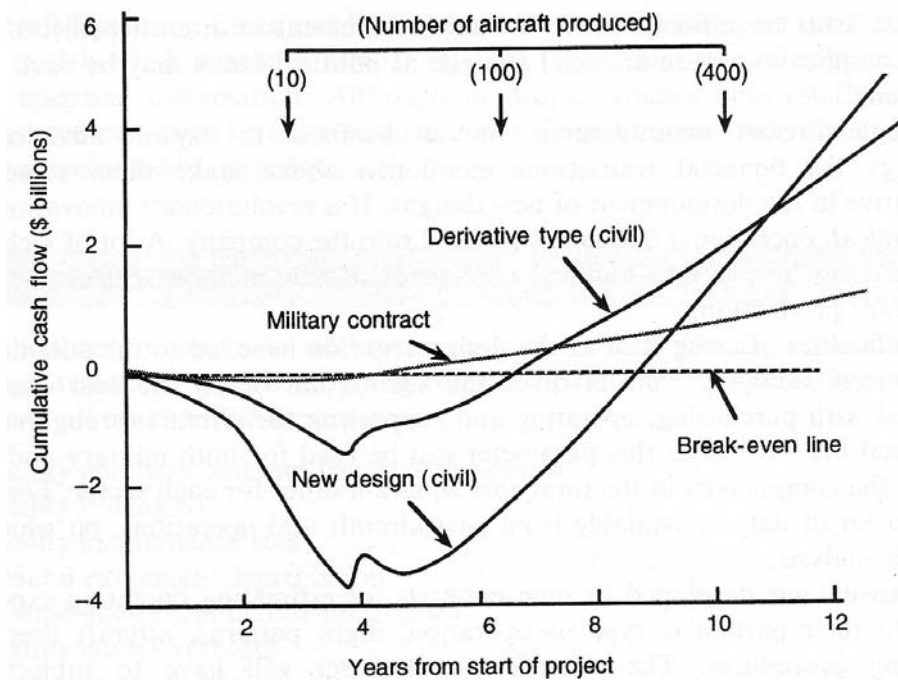


Figure 9: Flusso temporale di cassa di un progetto di aereo (convenzionale) da 150 posti.

- L'AIRBUS 380 HA RICHIESTO UN INVESTIMENTO DI 10.5 Geuro

1.14 PER NON RISCHIARE...

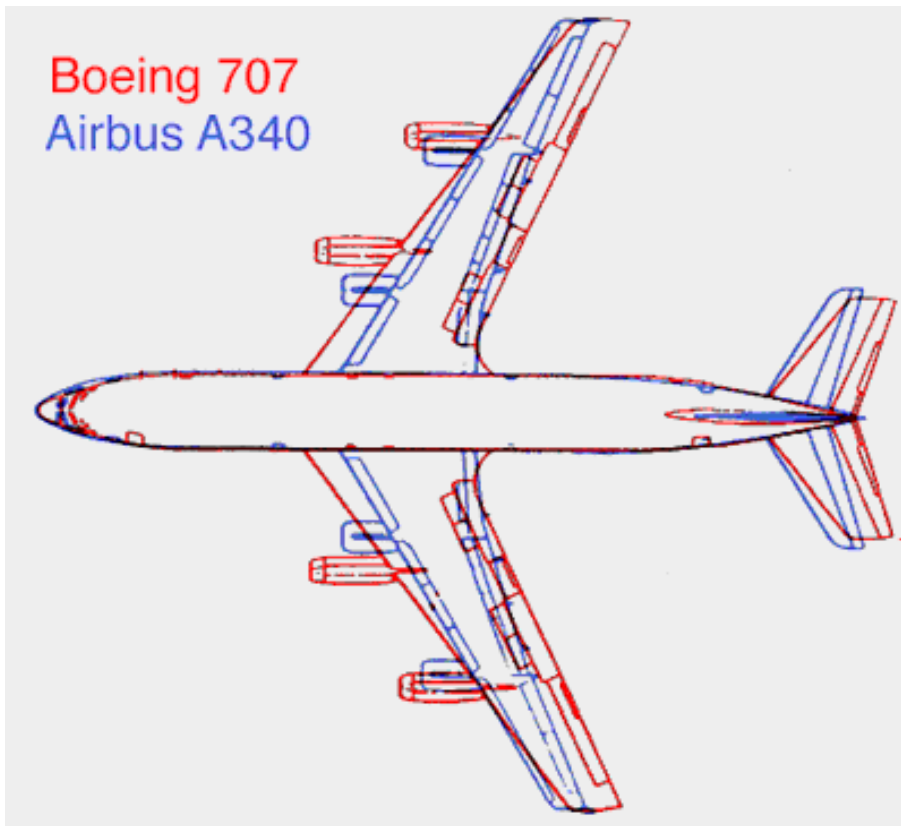


Figure 10: Confronto tra le sagome del Boeing 707 e dell'Airbus 340.

1.15 PROGRAMMA

1. INTRODUZIONE

2. EMISSIONI DI INQUINANTI:

- INQUINANTI E CONTAMINANTI
 - EFFETTI DIRETTI
 - EFFETTO SERRA
 - DISTRUZIONE DELL'OZONO STRATOSFERICO
- CAMERE DI COMBUSTIONE:
 - ASPETTI DI BASE
 - FONDAMENTI DI COMBUSTIONE
 - DIFFUSORI
 - AERODINAMICA DEL COMBUSTORE
 - RENDIMENTO DI COMBUSTIONE
 - STABILIZZAZIONE DELLA FIAMMA
 - SCAMBIO TERMICO
 - COMBUSTIBILI
 - INIETTORI
 - EMISSIONI
 - CENNI ALLA MODELLISTICA

3. EMISSIONI DI RUMORE:

- METROLOGIA
- SORGENTI:
 - PROPULSIVE
 - NON PROPULSIVE
- RIDUZIONE DEL RUMORE
- AEREI SUPERSONICI
- CENNI ALLA MODELLISTICA

4. CONFIGURAZIONI NON CONVENZIONALI

2.1 INQUINANTI E CONTAMINANTI

- SOSTANZE:
 - INQUINANTI (DANNOSE ALLA SALUTE)
 - CONTAMINANTI (NO, MA POSSONO ALTERARE IL CLIMA)
- INQUINANTI:
 - PRIMARI
 - SECONDARI
- SCALE:
 - LOCALE
 - REGIONALE
 - GLOBALE

2.2 INTERRELAZIONE EMISSIONI/ATMOSFERA/EFFETTI

- SORGENTI DI EMISSIONI

→ ATMOSFERA:

- TRASPORTO
- DILUIZIONE
- REAZIONI SECONDARIE
- RIMOZIONE DA MECCANISMI NATURALI

→ RECETTORI → EFFETTI

2.3 CRITERI DI MISURA DELLA CONCENTRAZIONE DI INQUINANTI GASSOSI

- CONCENTRAZIONI:

- FRAZIONE MOLARE (= IN VOLUME) $X_i = n_i/n$
- ppm (parti per 10^6), ppb (parti per 10^9), ppt (parti per 10^{12})
- TALVOLTA SPECIFICATE COME ppmv (IN VOLUME), ...
- SPESSO RIFERITE ALLA MISCELA SECCA (dry basis) ppmvd
- MASSA MOLARE (O PESO MOLECOLARE) DI UNA

MISCELA DI N SPECIE CHIMICHE $\mathcal{M} = \sum_{i=1}^N X_i \mathcal{M}_i$

- SI POSSONO RICAVARE LE FRAZIONI DI MASSA
 $Y_i = m_i/m$ COME $Y_i = X_i \mathcal{M}_i / \mathcal{M}$

- PER LIQUIDI E SOLIDI LA CONCENTRAZIONE INVECE È SEMPRE IN MASSA
- PER INQUINANTI SOLIDI/LIQUIDI/GASSOSI IN ATMOSFERA, CONCENTRAZIONE IN MASSA PER UNITÀ DI VOLUME $c_i = m_i/V$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

2.4 INDICI DI EMISSIONE

- E_{NO_x} = g di NO_x EMESSI PER kg DI COMBUSTIBILE BRUCIATO
- E_{SO_x} = g di SO_x EMESSI PER kg DI COMBUSTIBILE BRUCIATO
- PER AEREI: kg di NO_x EMESSI PER CICLO LTO, ...

2.5 UNITÀ DI MISURA

- UNITÀ SI (SISTEMA INTERNAZIONALE):
 - LUNGHEZZA m, MASSA kg, TEMPO s, TEMPERATURA K
 - $T(K) = T(C) + 273,15$
 - ENERGIA JOULE J (1 kWh = 3,6 MJ; 1 cal = 4,186 J;
1 kcal = 1 Cal = 4186 J; 1 BTU = 1055 J)
 - POTENZA WATT W (1 CV = 735,5 W; 1 HP = 746 W; 1 BTU/h
= 0,293 W)
 - PRESSIONE PASCAL Pa (1 atm = 101325 Pa)
- MULTIPLI/SOTTOMULTIPLI:
 - kilo (k) = 10^3 , mega (M) = 10^6 , giga (G) = 10^9 , tera (T) = 10^{12} ,
peta (P) = 10^{15} , exa (E) = 10^{18} , zetta (Z) = 10^{21} , yotta (Y) = 10^{24}
 - milli (m) = 10^{-3} , micro (μ) = 10^{-6} , nano (n) = 10^{-9} , pico (p) =
 10^{-12} , femto (f) = 10^{-15} , atto (a) = 10^{-18} , zepto (z) = 10^{-21} , yocto
(y) = 10^{-24}

2.6 PRINCIPALI INQUINANTI E CONTAMINANTI ATMOSFERICI

- PARTICOLATO
- COMPOSTI ORGANICI VOLATILI (COV/VOC) E UHC (*UNBURNED HYDROCARBONS*)
- OZONO O₃ TROPOSFERICO
- OSSIDI DI ZOLFO SO_x
- OSSIDI DI AZOTO NO_x
- MONOSSIDO DI CARBONIO CO
- PIOMBO Pb, ARSENICO As,
- ...

- ANIDRIDE CARBONICA CO₂
- METANO CH₄
- (ACQUA H₂O)

2.7.1 EFFETTI DELL'INQUINAMENTO

- EFFETTI SULL'UOMO
- EFFETTI SUGLI ANIMALI
- EFFETTI SULLE PIANTE
- EFFETTI SUI MATERIALI
- EFFETTI SULL'AMBIENTE

2.7.2 EFFETTI SULL'UOMO

- VALUTATI DA:
 - STUDI EPIDEMIOLOGICI
 - STUDI SU ANIMALI
 - ESPERIMENTI SU SOGGETTI (CONSENZIENTI)
 - COLTURE DI CELLULE *IN VITRO* ED *IN VIVO*
- EVENTUALE PRESENZA DI UNA *SOGLIA*

2.7.3 EFFETTI SUGLI ANIMALI

- IN PARTE ANALOGHI A QUELLI SULL'UOMO
- EFFETTO RADIAZIONI UV SU PLANCTON

2.7.4 EFFETTI SULLE PIANTE

- ESEMPIO: EFFETTO SO_2 SU ERBA MEDICA
- EFFETTO NO_2 ↓

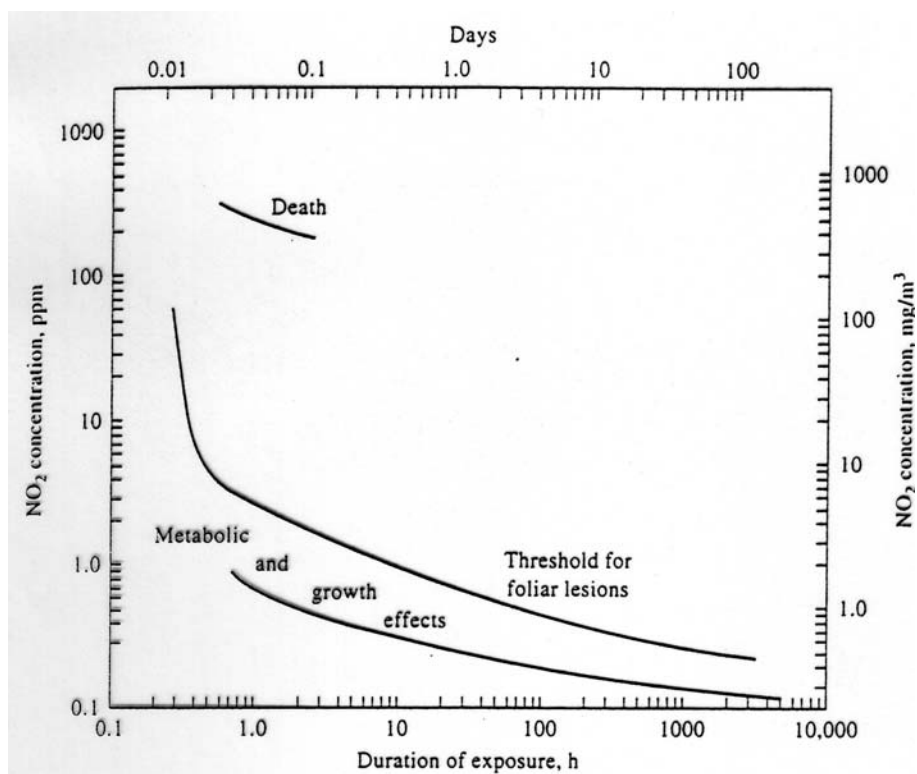


Figure 11: Curve di soglia per la manifestazione di effetti sulle piante, in funzione della concentrazione di NO_2 e della durata dell'esposizione.

2.7.5 EFFETTO SUI MATERIALI

- EFFETTO O₃ SU PNEUMATICI
- EFFETTO SO₂ SU ACCIAIO

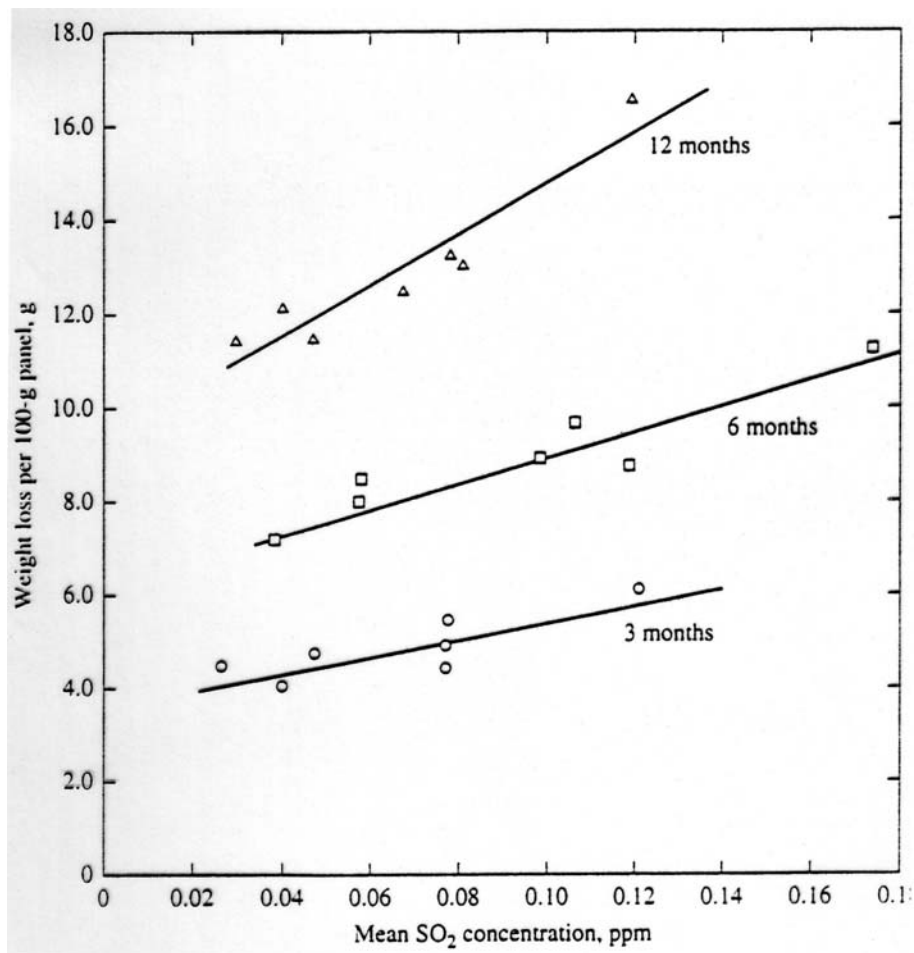


Figure 12: Perdita di peso di un pannello d'acciaio in funzione della concentrazione di SO₂, con la durata dell'esposizione come parametro.

2.7.6 EFFETTI SULL'AMBIENTE

- SMOG (VISIBILITÀ)
- PIOGGIE ACIDE
- RISCALDAMENTO GLOBALE (EFFETTO SERRA)
- DISTRUZIONE DELLO STRATO DI OZONO

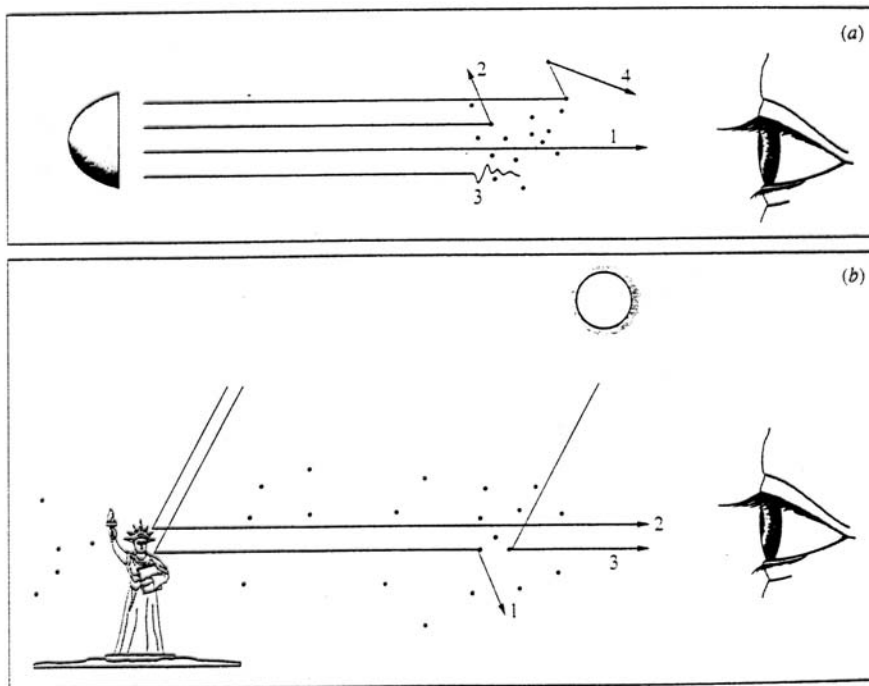


Figure 13: Possibili interazioni dei fotoni con particelle sospese nell'atmosfera.

2.7.7 EFFETTO DEL PARTICOLATO

- PRIMARIO (EMESSO NELLA COMBUSTIONE) E SECONDARIO (FORMATO NELL'ATMOSFERA CAUSA COV, UHC, NO_x, SO_x)
- LE PARTICELLE FINI POSSONO ESSERE RESPIRATE IN PROFONDITÀ NEI POLMONI
- LONDRA DICEMBRE 1952, CIRCA 4000 MORTI
- INCREMENTO 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ CONCENTRAZIONE PARTICOLATO CAUSA UN INCREMENTO 6% MORTALITÀ
- VISIBILITÀ

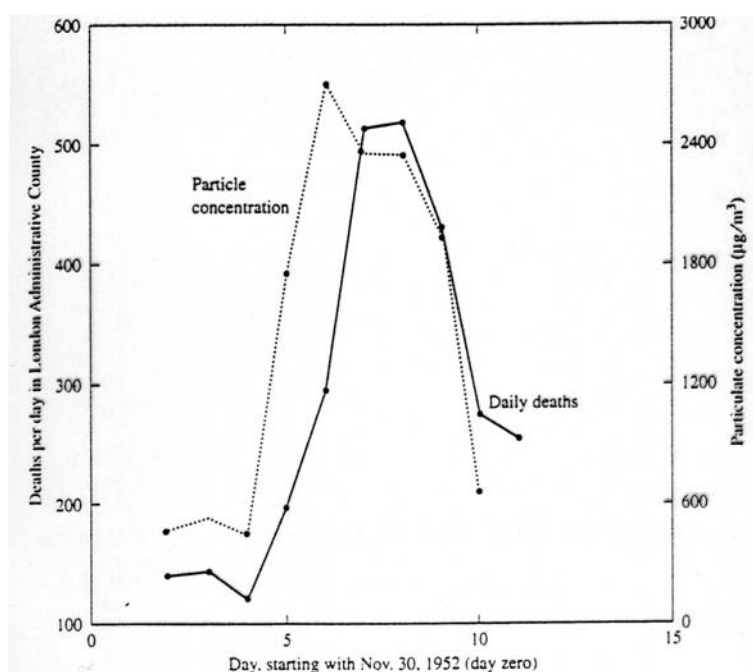


Figure 14: Tasso di mortalità giornaliera e concentrazione di particolato per l'episodio di inquinamento del dicembre 1952 a Londra.

2.7.8 EFFETTO DEL SO_x

- PIOGGE ACIDE (MAGGIOR RESPONSABILE)
- IRRITANTE
- EFFETTI SULLE COLTURE
- PROMUOVE LA FORMAZIONE DI PARTICOLATO SECONDARIO
- CONTRASTA L'EFFETTO SERRA

2.7.9 EFFETTO DEL NO_x

- PIOGGE ACIDE (25 – 30% DEL TOTALE)
- NO₂ IRRITANTE RESPIRATORIO (~ 1 ppb IN ARIA NON INQUINATA)
- PROMUOVE LA FORMAZIONE DI O₃ TROPOSFERICO, IRRITANTE
- N₂O PROMUOVE LA DISTRUZIONE DI O₃ STRATOSFERICO (MA CFC MOLTO PIÙ DANNOSI), INOLTRE GAS DI SERRA
- PROMUOVE LA FORMAZIONE DI PARTICOLATO SECONDARIO ED O₃ IN PRESENZA DI HC

2.7.10 EFFETTO DEL CO

- FORTISSIMA AFFINITÀ PER L'EMOGLOBINA (220 VOLTE > OSSIGENO), FORMA CARBOSSIEMOGLOBINA COHb
- LETALE GIÀ PER $X_{CO} = 0.05\%$
- ATTUALMENTE $X_{CO} = 120$ ppb EMISFERO NORD, 50 SUD (VITA MEDIA BREVE, 0.2 a)

% COHb NEL SANGUE	EFFETTI
0.3 – 0.7	LIVELLO FISILOGICO PER NON FUMATORI
2.5 – 3	DECREMENTO FUNZIONALITÀ CARDIACA IN ALCUNI SOGGETTI, ALTERAZIONI FLUSSO SANGUIGNO, RIDUZIONE GLOBULI ROSSI
4 – 6	RIDUZIONE CAPACITÀ VISIVA, VIGILANZA, CAPACITÀ LAVORATIVA
3 – 8	LIVELLO NORMALE FUMATORI
10 – 20	EMICRANIA, APATIA, AFFANNO, DILATAZIONE VASI CUTANEI, VISIONE ANORMALE, DANNI A FETO
20 – 30	FORTE EMICRANIA, NAUSEA, CAPACITÀ MANUALE ALTERATA
30 – 40	DEBOLEZZA, NAUSEA, VOMITO, OSCURAMENTO VISTA, FORTE EMICRANIA, IRRITABILITÀ, GIUDIZIO ALTERATO
50 – 60	SVENIMENTO, COLLASSO, COMA
60 – 70	COMA, ATTIVITÀ CARDIACA E RESPIRATORIA DEPRESSA, TALVOLTA FATALE
> 80	FATALE

2.7.11 VITA MEDIA NELL'ATMOSFERA DI INQUINANTI E CONTAMINANTI

- LEGATA AI MECCANISMI NATURALI DI RIMOZIONE

SPECIE CHIMICA	CONCENTRAZ PRE-INDUSTR ppb	CONCENTRAZ 1994 ppb	VITA MEDIA a	% VARIAZ DOVUTA A COMBUST
ANIDRIDE CARBONICA CO ₂	278000	356000	120	> 90
METANO CH ₄	700	1714	14	10
PROTOSSIDO D'AZOTO N ₂ O	270	310	120	20
CFC-11 CFC ₁₃	0	0,268	50	0
CFC-12 CF ₂ Cl ₂	0	0,503	102	0
MONOSSIDO DI CARBONIO CO	60	120 (EMISF N)	0,2	> 90
NO _x TROPOSFERICO	?	10 – 1000	< 0,03	> 50
HC NON METANO	?	?	0 – 0,24	...
ACQUA STRATOSFERICA H ₂ O	3500	5500	~ 2	10
OZONO TROPOSFERICO O ₃	25	50	< 0,1	> 50
OZONO STRATOSFERICO O ₃	4000	3800	~ 2	< 5
ANIDRIDE SOLFOROSA SO ₂	?	> ?	...	> 90
SOOT C	?	> ?	<i>f(D)</i>	> 90

2.8 CRESCITA DELLA CONCENTRAZIONE ATMOSFERICA DI INQUINANTI

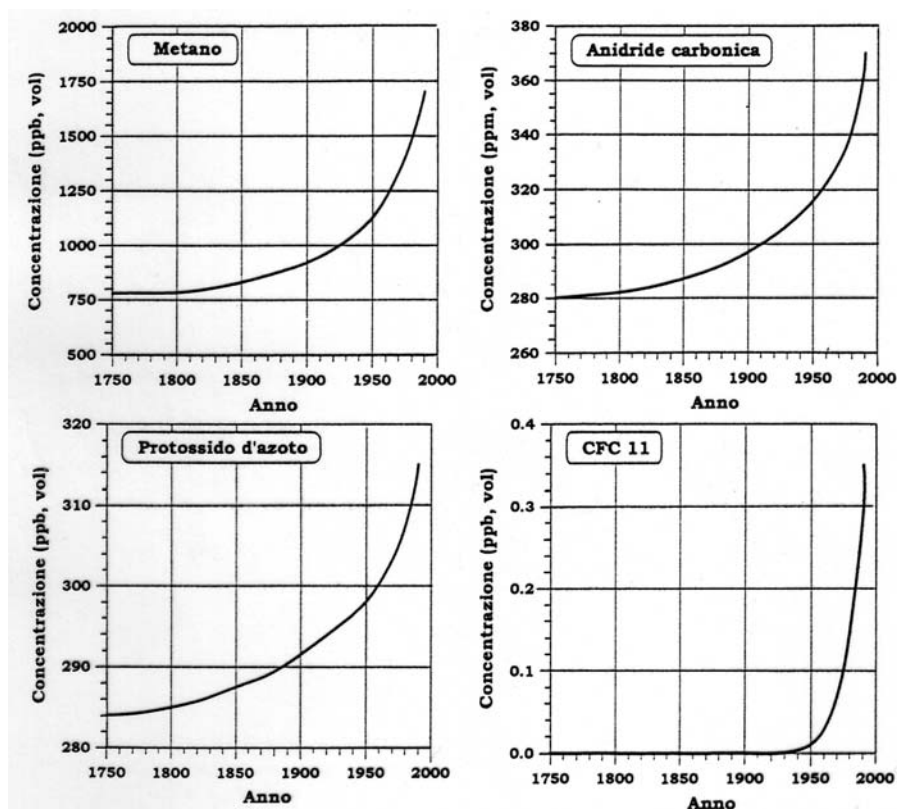


Figure 15: Crescita della concentrazione atmosferica di alcuni inquinanti e contaminanti.

2.9 CONDIZIONI METEOROLOGICHE

- INFLUENZANO LA DISPERSIONE DEGLI INQUINANTI:
 - GRADIENTE VERTICALE DI TEMPERATURA
 - VELOCITÀ E DIREZIONE DEL VENTO
 - TURBOLENZA ATMOSFERICA

2.10.1 EFFETTO DEGLI AGENTI DI SERRA

- CO₂ (~ 60%), CH₄ (~ 30%), N₂O (~ 10%), (H₂O)
- PROVOCANO IL RISCALDAMENTO GLOBALE →
- $X_{\text{CO}_2} = 280$ ppm IN ETÀ PRE-INDUSTRIALE, ATTUALMENTE 370 ppm, E POTREBBE ARRIVARE A 550 ppm
 - DESERTIFICAZIONE
 - MAGGIOR FREQUENZA DI CONDIZIONI METEOROLOGICHE ESTREME
 - SCIOGLIMENTO CALOTTE POLARI E GHIACCIAI
 - INONDAZIONE ZONE COSTIERE
 - POSSIBILE EFFETTO SU CORRENTE DEL GOLFO, EL NIÑO, LA NIÑA

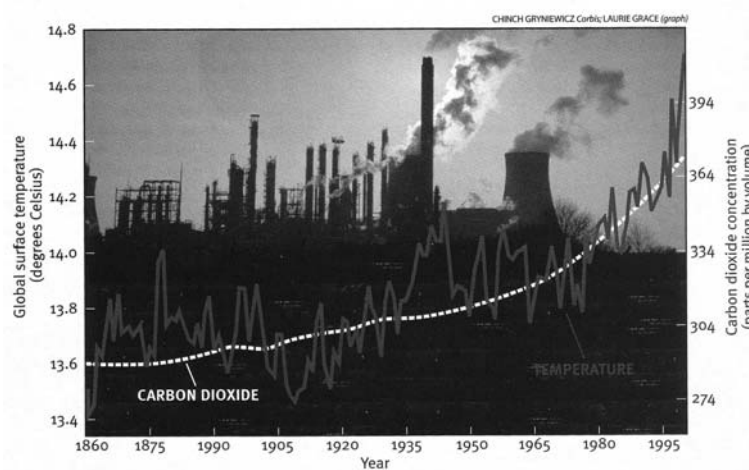


Figure 16: Aumento della concentrazione di CO₂ e della temperatura superficiale globale.

2.10.2 EFFETTO SULLA FREQUENZA DI CONDIZIONI METEOROLOGICHE ESTREME

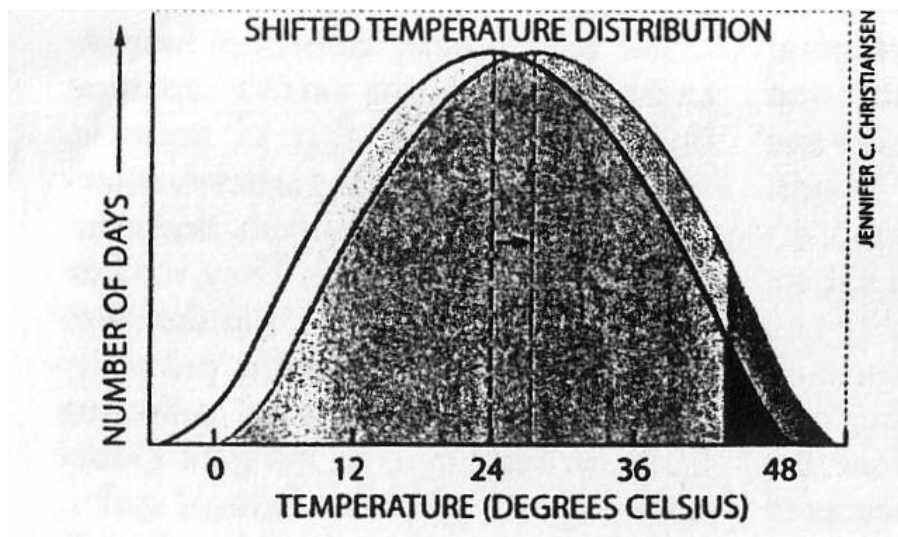


Figure 17: Aumento del numero annuo di giorni a temperatura molto alta per effetto di un piccolo aumento della temperatura media.

2.10.3 EFFETTO DI H₂O

- GAS DI SERRA, MA IMPATTO DELLE ATTIVITÀ UMANE GLOBALMENTE TRASCURABILE
- TUTTAVIA, H₂O EMESSA DA MOTORI A GETTO AD ALTA QUOTA FORMA CRISTALLI E NUBI (*CONTRAILS*) CHE OSTACOLANO LE RADIAZIONI UV → IMPATTO NEGATIVO SULLA FORMAZIONE DI O₃ STRATOSFERICO

2.10.4 RISCALDAMENTO GLOBALE

- LA TERRA RICEVE ENERGIA DAL SOLE COME RADIAZIONE, DISTRIBUITA IN UN AMPIO CAMPO DI LUNGHEZZE D'ONDA λ (O DI FREQUENZE ν)
- LA TERRA IRRADIA ENERGIA VERSO LO SPAZIO, IN UN AMPIO CAMPO DI LUNGHEZZE D'ONDA
- $\lambda = c/\nu$, $c \simeq 300000$ km/s VELOCITÀ DELLA LUCE
- TEMPERATURA SUPERFICIALE DEL SOLE $\simeq 6000$ K
- TEMPERATURA SUPERFICIALE DELLA TERRA $\simeq 288$ K
- LUNGHEZZA D'ONDA ALLA QUALE L'EMISSIONE È MASSIMA (LEGGE DI WIEN) $\lambda_{max} = 2,9 \cdot 10^{-3} / T$
- PER IL SOLE $\lambda_{max} = 0,483 \mu\text{m}$ (LUCE VISIBILE)
- PER LA TERRA $\lambda_{max} = 9,99 \mu\text{m}$ (INFRAROSSO)
- TRASPARENZA/OPACITÀ DELL'ATMOSFERA ALLA RADIAZIONE DI DIVERSA λ

2.10.5 ASSORBIMENTO ATMOSFERICO E SPETTRI DI EMISSIONE

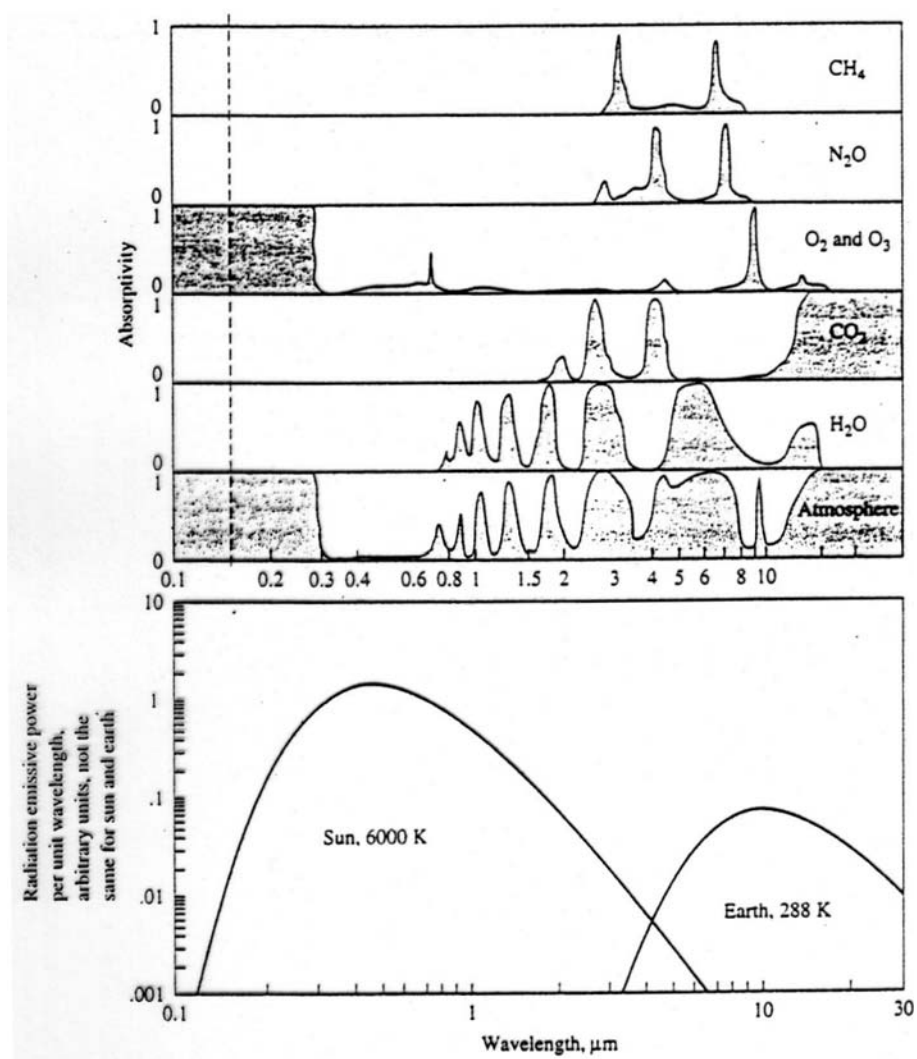


Figure 18: Coefficienti d'assorbimento di alcuni componenti atmosferici in funzione della lunghezza d'onda (alto), e spettri di emissione del Sole e della Terra (basso, non in scala).

2.10.6 INTERAZIONI NEL PROCESSO DI RISCALDAMENTO GLOBALE

- PROCESSI NON ANCORA COMPLETAMENTE COMPRESI

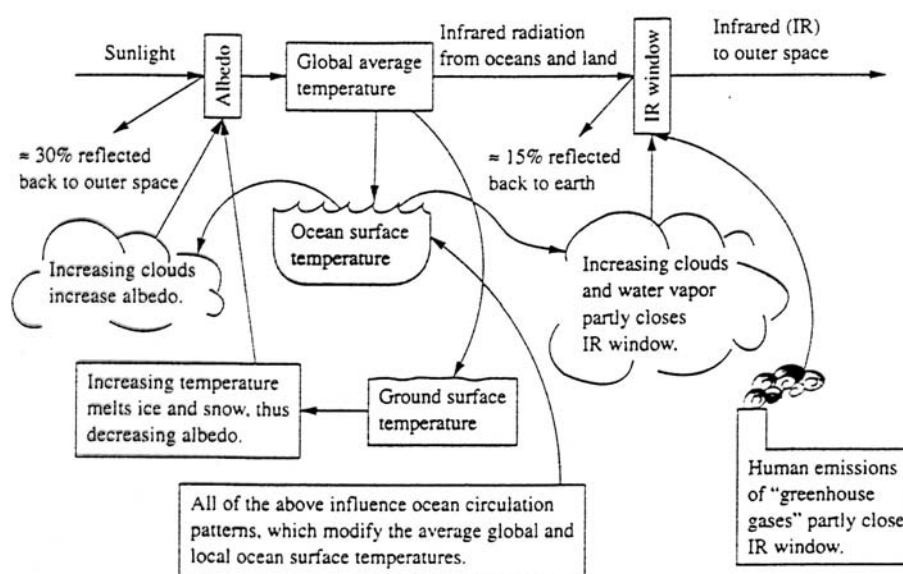


Figure 19: Schema (semplificato) delle interazioni nel processo di riscaldamento globale.

2.10.7 CONTRIBUTO DEI DIVERSI AGENTI DI SERRA

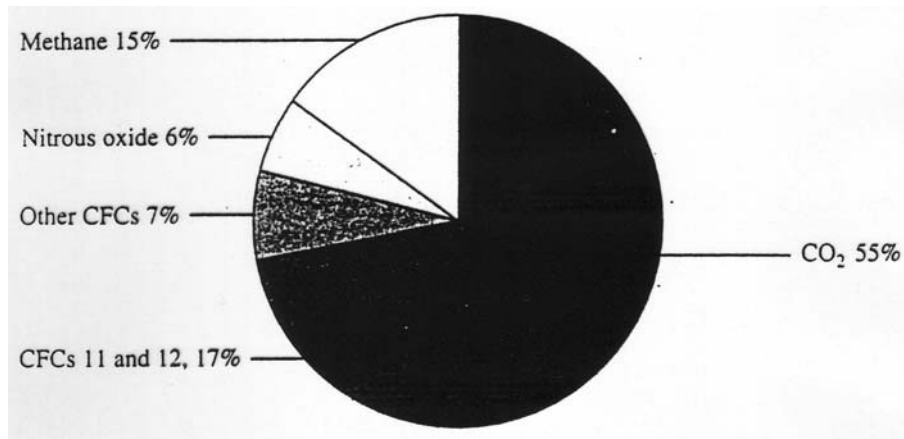


Figure 20: Contributo di diversi agenti di serra alla variazione di trasparenza della finestra dagli 8 ai 12 μm nel periodo 1980-1990.

2.10.8 FLUSSI DI CARBONIO

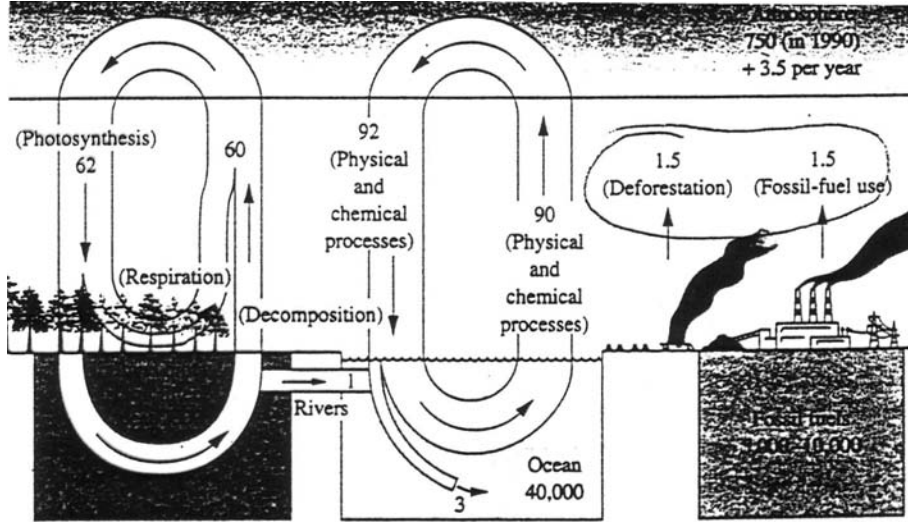


Figure 21: Flussi (in Gt/a) globali e riserve (in Gt) di carbonio. (Attenzione, il flusso per uso di combustibili fossili è in realtà 7-8 Gt/a)

2.10.9 GLOBAL WARMING POTENTIAL (GWP)

- VALORE DIPENDE DALL'ORIZZONTE TEMPORALE CONSIDERATO

GAS DI SERRA	20 ANNI	100 ANNI	500 ANNI	INCREMENTO ANNUO CONC.
CO ₂	1	1	1	0,4%
CH ₄	56	21,5	6,5	0,6%
N ₂ O	280	310	170	0,25 %
CFC-11 CCl ₃ F		12000		0 %
CFC-12 CCl ₂ F ₂		16000		0 %
HFC-23	9100	11700	9800	
HFC-32	2100	650	200	
SF ₆	16300	23900	34900	

2.11.1 DISTRUZIONE DELLO STRATO DI OZONO STRATOSFERICO

- L'OZONO O₃ TROPOSFERICO È UN FORTE IRRITANTE RESPIRATORIO ED OCULARE
- LA CONCENTRAZIONE DI OZONO RAGGIUNGE UN MASSIMO TRA I 10 ED I 30 km DI QUOTA
- UNICO GAS CHE BLOCCA LA RADIAZIONE UV CON $\lambda < 0,28 \mu\text{m}$
- ODG (OZONE DEPLETING GASES): CFC (Freon), NO_x

2.11.2 CONCENTRAZIONE DI OZONO

- TROPOSFERA ~ 50 ppb
- STRATOSFERA $\sim 3,8$ ppm = 3800 ppb
- O₃ FORMATO DA IRRAGGIAMENTO UV $0,18 < \lambda < 0,23 \mu\text{m}$
- O₃ ASSORBE RADIAZIONI UV $0,22 < \lambda < 0,32 \mu\text{m}$

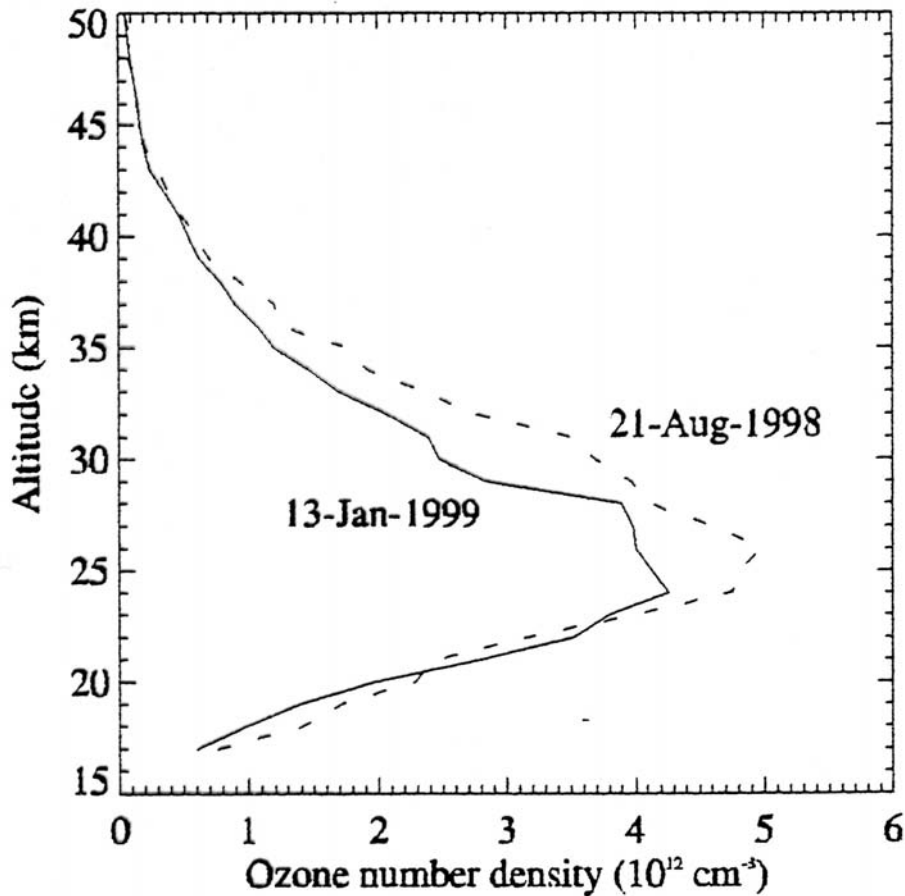


Figure 22: Concentrazioni tipiche, invernali ed estive, di ozono in funzione della quota, ad una latitudine media.

2.11.3 ODGs STRATOSFERICI

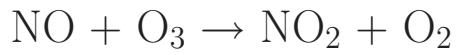
- SPECIE CHIMICHE DI LUNGA VITA MEDIA (\sim INERTI), CHE DIFFONDONO DALLA TROPOSFERA:
 - CLOROFLUOROCARBURI CFC (Freon)
(VITA MEDIA CFC-11 50 a, CFC-12 102 a)
 - PROTOSSIDO D'AZOTO N_2O (VITA MEDIA 120 a)
- EMISSIONI DI MOTORI A GETTO:
 - PROTOSSIDO D'AZOTO N_2O , OSSIDO D'AZOTO NO

2.11.4 DISTRUZIONE OZONO DA CFC

- RADIAZIONE UV SCINDE I CFC, LIBERANDO Cl ATOMICO
 - DISTRUZIONE OZONO ATTRAVERSO IL MECCANISMO:
 1. $\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{ClO} + \text{O}_2$
 2. $\text{ClO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{Cl} + 2 \text{O}_2$
 - SENZA CONSUMO NETTO DI Cl
- UN ATOMO DI Cl PUÒ DISTRUGGERE DA 10000 A 1000000 MOLECOLE DI O_3 !
- CFC SONO STATI BANDITI, SOSTITUITI CON CLORIDROFLUOROCARBURI, DI VITA MEDIA PIÙ BREVE

2.11.5 DISTRUZIONE OZONO DA NO_x

- DISTRUZIONE OZONO ATTRAVERSO IL MECCANISMO:



- LA MOLECOLA DI NO VIENE CONSUMATA

3.1.1 CAMERE DI COMBUSTIONE: ASPETTI DI BASE

- VINCOLI SUL PROGETTO:
 - AREA FRONTALE (LIMITATA PER CONTENERE RESISTENZA, INGOMBRO, PESO)
 - LUNGHEZZA (LIMITATA PER CONTENERE RESISTENZA, INGOMBRO, PESO, SOLLECITAZ ASSE TURBOMACCHINE) (OGNI kg IN PIÙ $\rightarrow \simeq$ CIRCA 3 kg IN PIÙ AL DECOLLO)
 - BASSA CADUTA DI PRESSIONE ($\epsilon_b = p_4/p_3 \rightarrow M$ BASSO)
- DESIDERATA:
 - BASSE EMISSIONI DI INQUINANTI
 - COMBUSTIONE STABILE SU AMPIO CAMPO \dot{m}_f, f, V_0, p_a
 - η_b PROSSIMO AL 100%
 - *PATTERN FACTOR* $(T_{4,max} - T_{4,min})/(\overline{T_4} - T_3)$
BASSO (O COMUNQUE APPROPRIATO)
 - LUNGA DURATA (RAFFREDDAMENTO E MATERIALI)
 - ACCENSIONE AFFIDABILE, RIACCENSIONE IN QUOTA
 - COSTI DI PRODUZIONE E MANUTENZIONE CONTENUTI
- TENDENZA AD AUMENTO $\beta_o = \beta_d \beta_f \beta_c$ E $\tau = T_4/T_a$ (PER *TSFC* E *F/W*) RENDE PIÙ DIFFICILE CONSEGUIRE QUESTI OBIETTIVI (ECCETTO RIACCENSIONE)

3.1.2 CONFIGURAZIONE DELLA CAMERA

- VINCOLI: BASSO Δp , SUFFICIENTE t_s , $f \simeq 0.02$

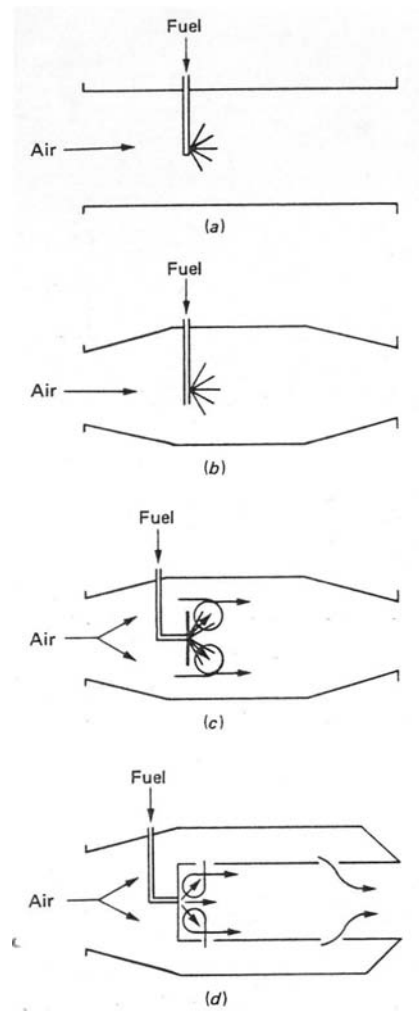


Figure 23: Effetto dei vincoli sul disegno della camera.

3.1.3 QUANTO 'PESA' UNA CAMERA TROPPO LUNGA

- AUMENTO PESO CAMERA DI COMBUSTIONE
- AUMENTO PESO CASSA DEL FLUSSO PRIMARIO
- AUMENTO PESO CASSA DEL FLUSSO SECONDARIO
- AUMENTO PESO ASSI DELLE TURBOMACCHINE
- AUMENTO PESO GONDOLA
- MOLTIPLICARE $\times \sim 3$
- INOLTRE, AUMENTO DELLA RESISTENZA ESTERNA

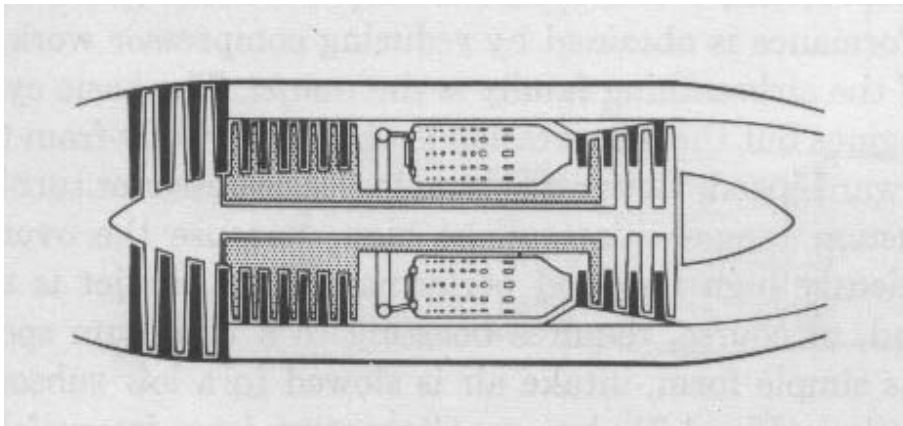


Figure 24: Sezione di un turbofan.

3.1.4 ESEMPIO: DIMENSIONAMENTO ASSE TURBOMACCHINE

- DETERMINARE POTENZA, COPPIA PER DIMENSIONARE ASSE
→ MASSA PER UNITÀ DI LUNGHEZZA $\frac{\pi}{4} \delta D_{asse}^2$

- PER TURBOGETTO SEMPLICE (IDEALE, ADATTATO, $V_0 = 0$):

$$P_c = \dot{m}_a [c_p T_a (\tau_c - 1)]$$

$$F = \dot{m}_a \left\{ 2 c_p T_5 \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_5} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2}$$

$$T_5 = T_a [\tau - (\tau_c - 1)]$$

$$\frac{p_a}{p_5} = \frac{p_a p_4}{p_4 p_5} = \frac{p_a}{p_4} \left(\frac{T_4}{T_5} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \frac{1}{\beta_c} \left(\frac{T_a T_4}{T_5 T_a} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \frac{1}{\beta_c} \left\{ \frac{\tau}{\tau - (\tau_c - 1)} \right\}^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

– TIPICAMENTE $P_c/F \simeq 400$ W/N

– ES.: $F = 500$ kN $\rightarrow P_c \simeq 200$ MW

– $P = T \omega \rightarrow T = P/\omega$

– PER $\omega \simeq 1000$ rad/s $\rightarrow T \simeq 200$ kN m

– (CONFRONTO MOTORE AUTO: $P \simeq 100$ kW, $T \simeq 200$ N m)

→ DIMENSIONAMENTO ASSE (PIENO) $D_{asse} = \left(\frac{16 T}{\pi \sigma} \right)^{1/3}$

3.1.5 TIPI DI COMBUSTORI

- TUBOLARE (A CANNA): PESANTE, LUNGO; TESTS E MANUTENZIONE FACILI. ABBANDONATI (SE NON PER PICCOLE F)
- ANULARE: BASSO Δp , BASSE EMISSIONI; TESTS, MANUTENZIONE E COSTRUZIONE DIFFICILI, SENSIBILITÀ AD ALTERAZIONE PROFILO INGRESSO (I PIÙ DIFFUSI PER ALTE F)
- TUBO-ANULARE: TESTS FACILI

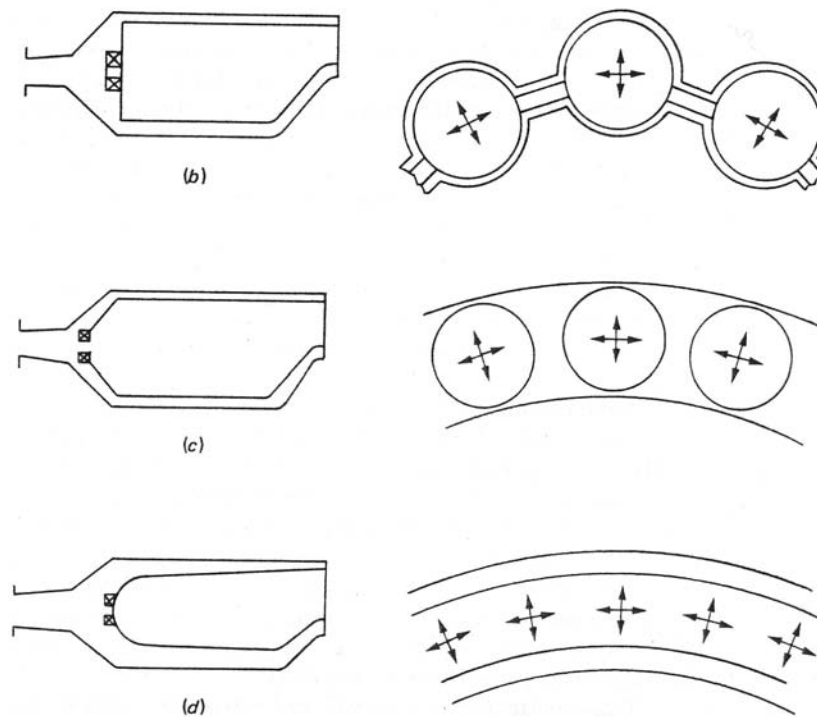


Figure 25: Camere (dall'alto verso il basso) tubolari, tuboanulari, anulari. A sinistra vista laterale, a destra vista in sezione.

3.1.6 CAMERA DI COMBUSTIONE: COMPONENTI

- DIFFUSORE
- ZONA PRIMARIA
- ZONA INTERMEDIA
- ZONA DI DILUIZIONE
- INIETTORI
- RAFFREDDAMENTO

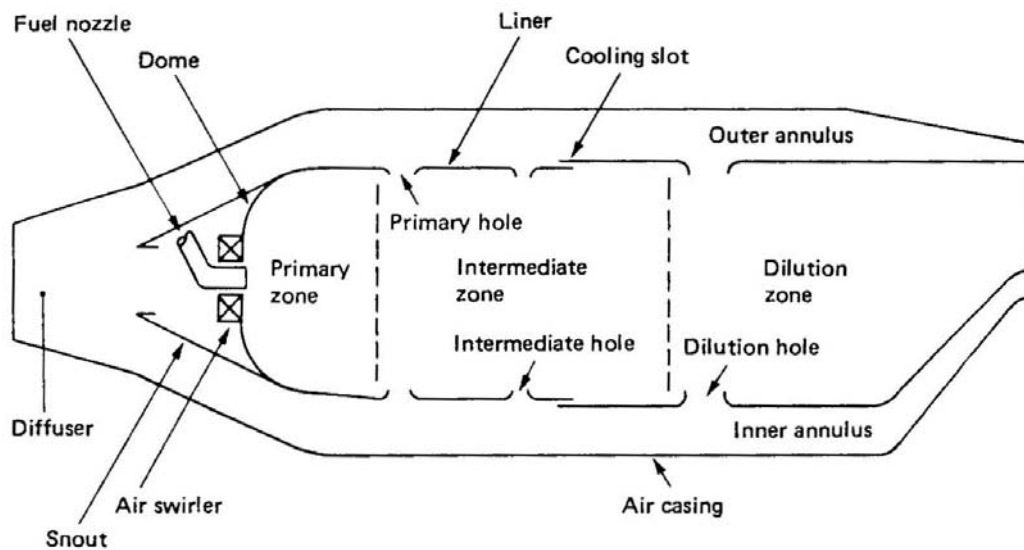


Figure 26: Componenti principali di una camera di combustione.

3.1.7 PERDITE NEL DIFFUSORE

- $$\Delta p = \Delta p_{cold} + \Delta p_{hot} \quad \left(\frac{dp}{p} \simeq \frac{dp_0}{p_0} = -\gamma M^2 \frac{dF}{\rho u^2 A} - \frac{\gamma M^2}{2} \frac{dQ}{h_0} \right)$$

- Δp_{cold} IN DIFFUSORE E *LINER* PERFORATO $\simeq 2 - 6 \%$
 AUMENTA CON M, T_4

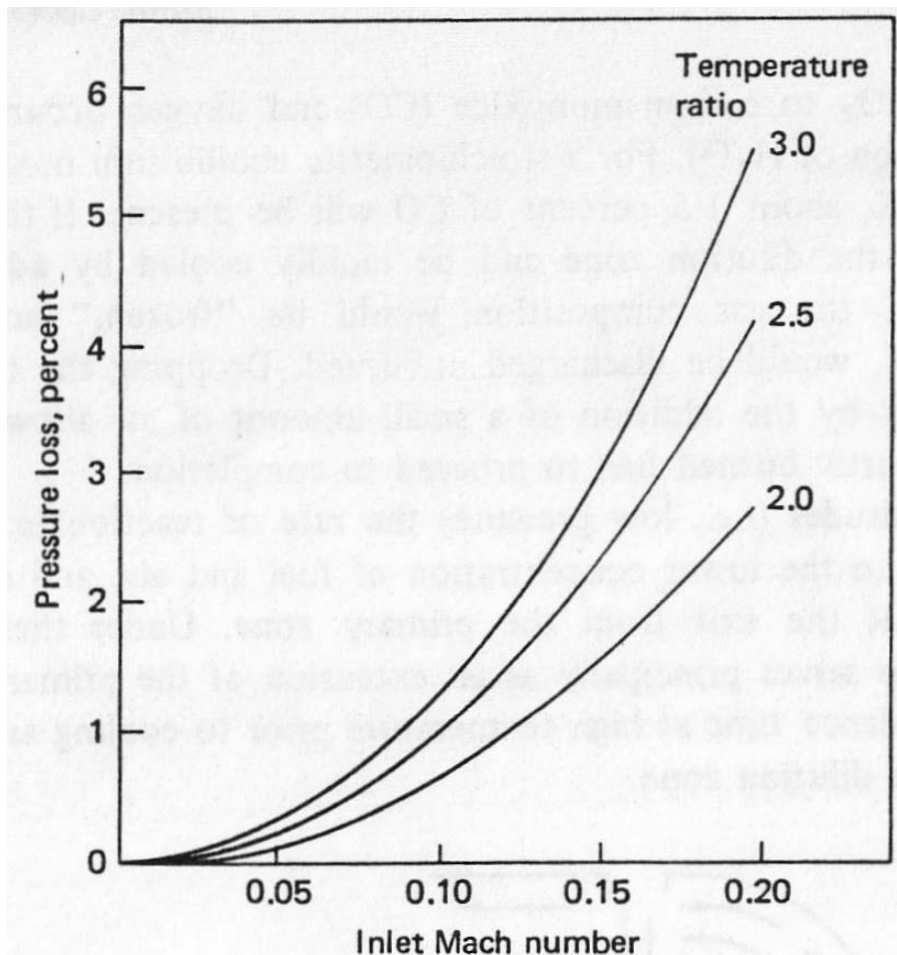


Figure 27: Caduta di pressione in camera dovuta all'addizione di calore.

3.1.8 TIPI DI DIFFUSORI

- DIFFUSORI:

- CONICI (BASSO ANGOLO DI SEMIAPERTURA → LUNGHI)
- *DUMP* (Δp PIÙ ALTO)

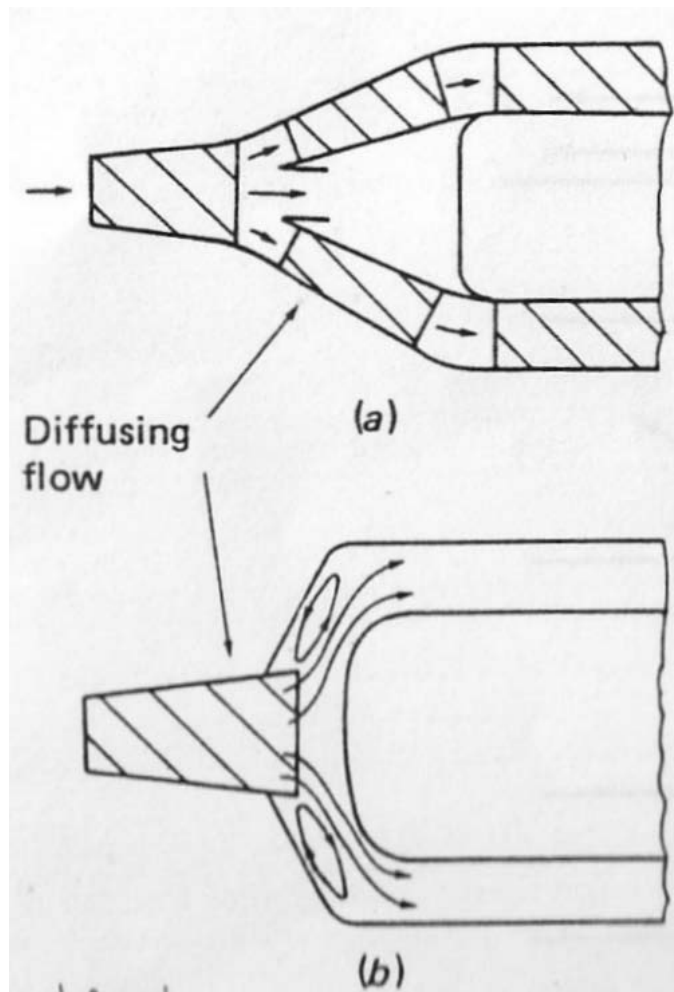


Figure 28: Diffusore conico (alto) e *dump* (basso).

3.1.9 ZONA PRIMARIA

- FORMA \simeq SEMICIRCOLARE
- ARIA PRIMARIA \simeq 40% DI \dot{m}_a
- IMMESSA DA *SWIRLERS* E GETTI
- RICIRCOLAZIONE:
 - POCHI GETTI DI GRANDE DIAMETRO \rightarrow PIÙ STABILE
 - MOLTI GETTI DI PICCOLO DIAMETRO \rightarrow EMISSIONI PIÙ BASSE, RILASCIO DI CALORE/UNITÀ DI VOLUME PIÙ ALTO
- COMBUSTIONE PROSSIMA ALLO STECHIOMETRICO
 $\rightarrow T = 2200 - 2500$ K
- PRESENZA DI PRODOTTI DI DISSOCIAZIONE (CO, OH, H, O, ...) E UHC (*Unburned HydroCarbons*)

3.1.10 ZONA INTERMEDIA

- ARIA INTERMEDIA $\simeq 20\%$ DI \dot{m}_a , IMMESSA DA FORI
- RICOMBINAZIONE DI CO, OH, H, O, ... A T INTERMEDIA
- AD ALTA QUOTA, p BASSA
 - TASSO DI REAZIONE $w \propto p^n$ BASSO
 - ZONA INTERMEDIA FA DA ESTENSIONE ALLA PRIMARIA
- $L_{zona\ intermedia} = 0.5 - 0.7 D_{liner}$, FINO AD 1 PER MOTORI PER AEREI AD ALTA AUTONOMIA ($TSFC$ PIÙ IMPORTANTE)

3.1.11 ZONA DI DILUIZIONE

- ARIA DI DILUIZIONE $\simeq 40\%$ DI \dot{m}_a , IMMESSA DA FORI
- *PATTERN FACTOR* MIGLIORA ALL'AUMENTARE DI $L_{zona\ diluizione}$, TENDENDO AD UN'ASINTOTO
- $L_{zona\ diluizione} = 1.5 - 1.8 D_{liner}$
- *PATTERN FACTOR* IMPORTANTE PER DURATA E T_4
- DISTRIBUZIONE IDEALE DI T IN USCITA NON PIATTA:
 T PIÙ BASSA ALLA RADICE (PER SFORZI) ED ALLA SOMMITÀ (PER LE TENUTE) DELLE PALE DELLA TURBINA

3.1.12 INIETTORI

- PIÙ LE GOCCIOLINE SONO PICCOLE, PRIMA EVAPORANO
- INFLUENZANO STABILITÀ, η_b , EMISSIONI UHC, CO, FUMO
- DEVONO ASSICURARE BUONE PRESTAZIONI SU UN AMPIO CAMPO DI \dot{m}_f E f (OPPURE $A/F = 1/f$)
- PRINCIPALI TIPI:
 - *PRESSURE-SWIRL*
 - *AIRBLAST*
 - *VAPORIZER*
 - *PREMIX-VAPORIZER*

3.1.13 INIETTORI PRESSURE-SWIRL

- ANGOLO CONO SPRAY DEVE ESSERE PROSSIMO A 90° PER MINIMIZZARE LUNGHEZZA
- $\Delta p_{iniettore} \propto \dot{m}_f^2$, MA \dot{m}_f PUÒ VARIARE COME 1:50
- DUPLEX: DUE GETTI CHE COALESCONO
- SVANTAGGI: POSSIBILITÀ BLOCCAGGIO PICCOLI PASSAGGI, TENDENZA A FORMARE SOOT AD ALTA p

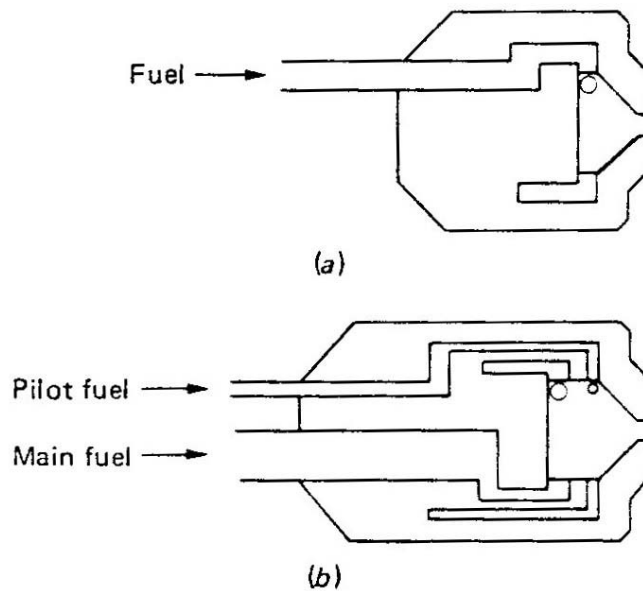


Figure 29: Iniettori simplex conico (alto) e duplex (basso).

3.1.14 INIETTORI AIRBLAST

- FILM DI COMBUSTIBILE STIRATO DA ARIA SU AMBO I LATI
- FORMANO POCO *SOOT* → BASSA RADIAZIONE E *COKING*
→ BASSA T_{liner}
- SVANTAGGI: STRETTO CAMPO DI STABILITÀ, SCARSA ATOMIZZAZIONE ALLO *START-UP*
- SOLUZIONE: PILOTA

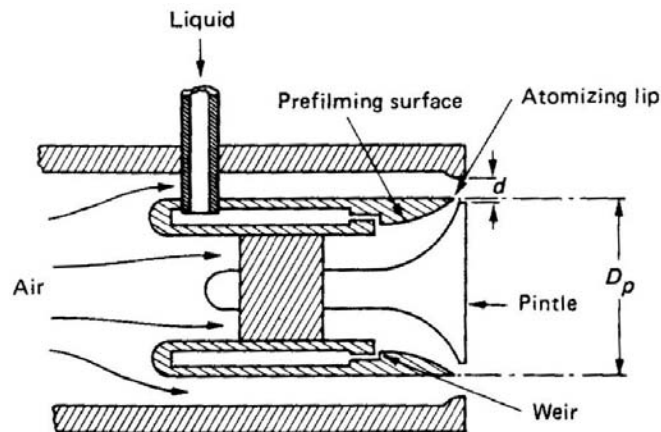


Figure 30: Iniettore *airblast*.

3.1.15 INIETTORI VAPORIZER

- COMBUSTIBILE 'VAPORIZZATO' DA ARIA CALDA DAL COMPRESSORE E DAL FLUSSO DI CALORE DALLA CAMERA
- VAPORIZZAZIONE IN REALTÀ NON COMPLETA

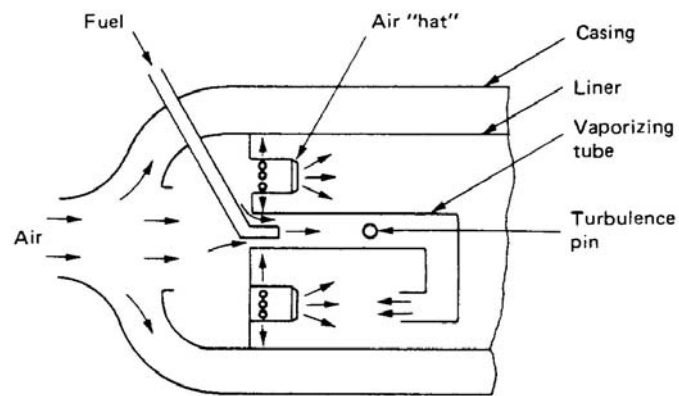


Figure 31: Iniettore vaporizer.

3.1.16 INIETTORI PREMIX-VAPORIZER

- COMBUSTIBILE FINEMENTE ATOMIZZATO INIETTATO IN ARIA AD ALTA VELOCITÀ → VAPORIZZAZIONE E MISCELAMENTO COMPLETI PRIMA DELL'ACCENSIONE
- T PIÙ UNIFORME → MENO INQUINANTI
- SVANTAGGI: *FLASHBACK*, *START-UP* → PILOTA

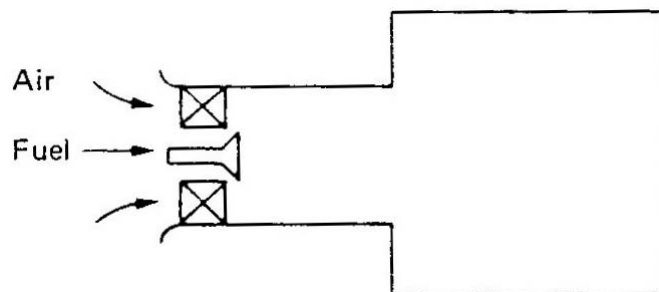


Figure 32: Iniettore *premix-vaporizer*.

3.1.17 RAFFREDDAMENTO

- *LINER*: CONTENERE COMBUSTIONE, DISTRIBUIRE ARIA
- DEVE RESISTERE SFORZI MECCANICI, TERMICI, FATICA TERMICA
- MATERIALI ALTA T , ARIA RAFFREDDAMENTO (FINO 50% \dot{m}_a)
- T_{liner} DA BILANCIO q ENTRANTE ED USCENTE (PER RADIAZIONE E CONVEZIONE)
- ALL'AUMENTARE DI β_o , T_3 PIÙ ALTA → RAFFREDDAMENTO PIÙ CRITICO
- *FILM-COOLING*, *CONVECTION-COOLING* (PARETI RUGOSE), *IMPINGEMENT-COOLING*, *TRANSPIRATION-COOLING*

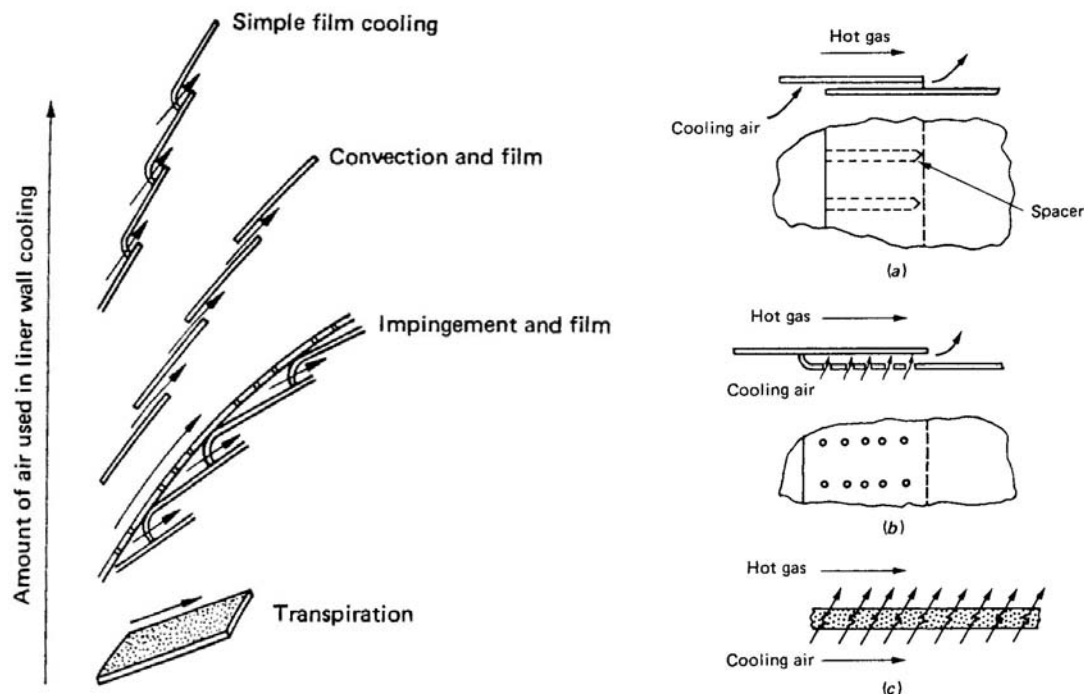


Figure 33: Tecniche di raffreddamento delle pareti.

3.1.18 ESEMPI DI CONFIGURAZIONI GE CF-6 50

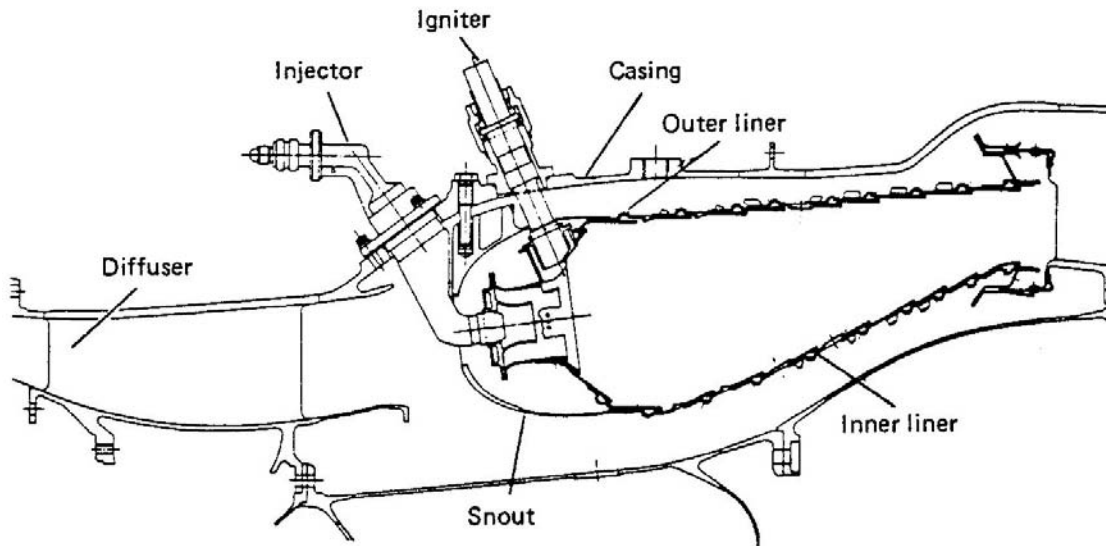


Figure 34: Combustore anulare del motore GE CF6-50.

3.1.19 ESEMPI DI CONFIGURAZIONI GE F-101

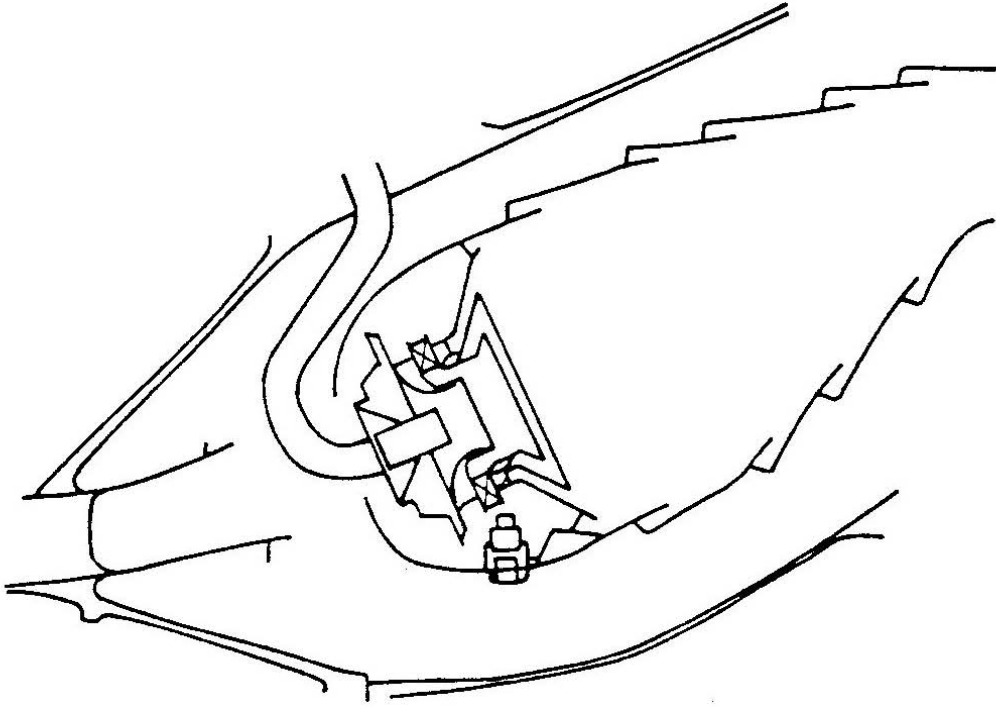


Figure 35: Combustore anulare del motore GE F101.

3.1.20 ESEMPI DI CONFIGURAZIONI RR RB-211

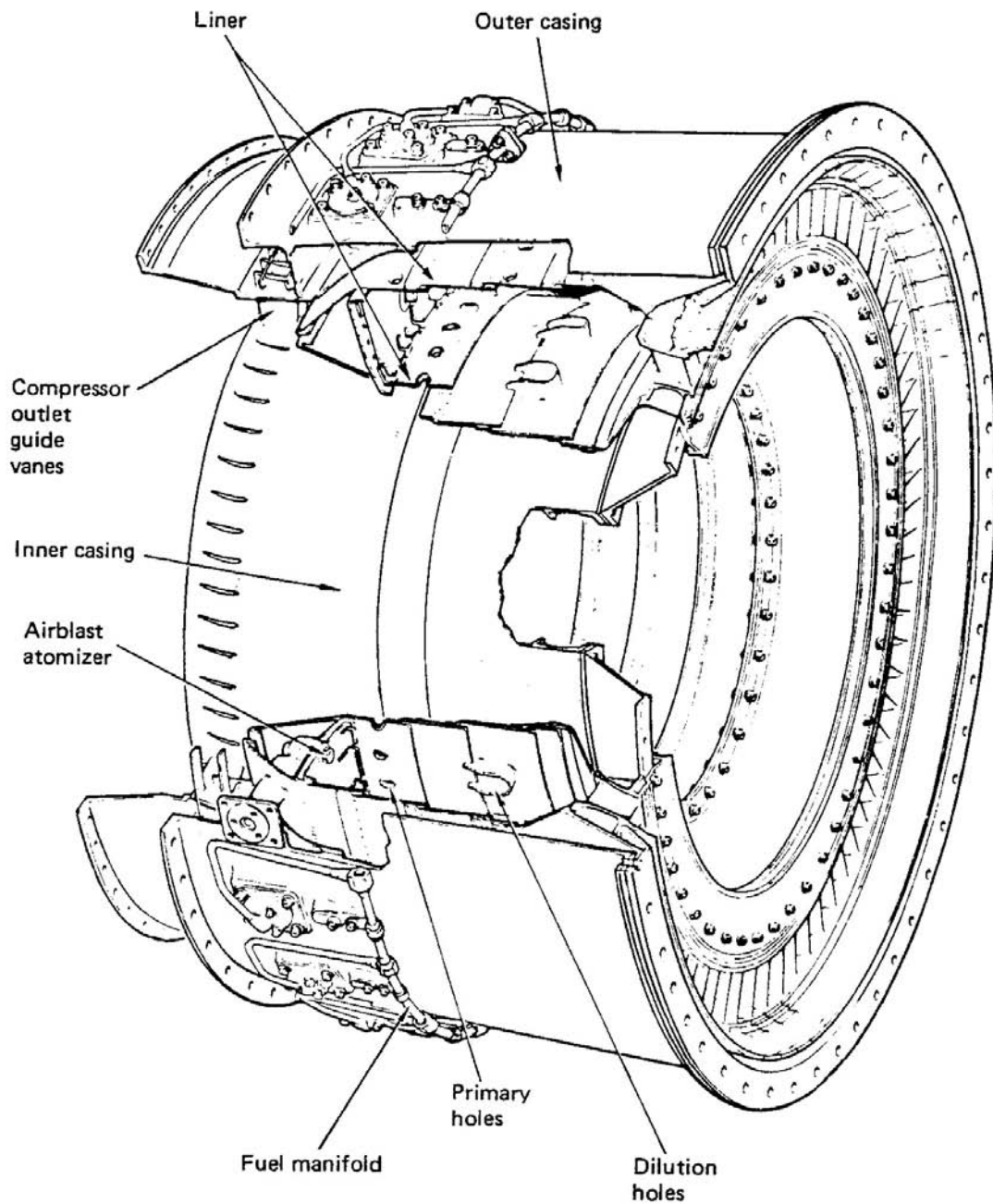


Figure 36: Combustore anulare del motore RB211.

3.1.21 COMBUSTORI 'STAGED'

- PER POTER OPERARE SU UN AMPIO CAMPO DI CONDIZIONI
- COMBUSTIONE CATALITICA (IN TEORIA)

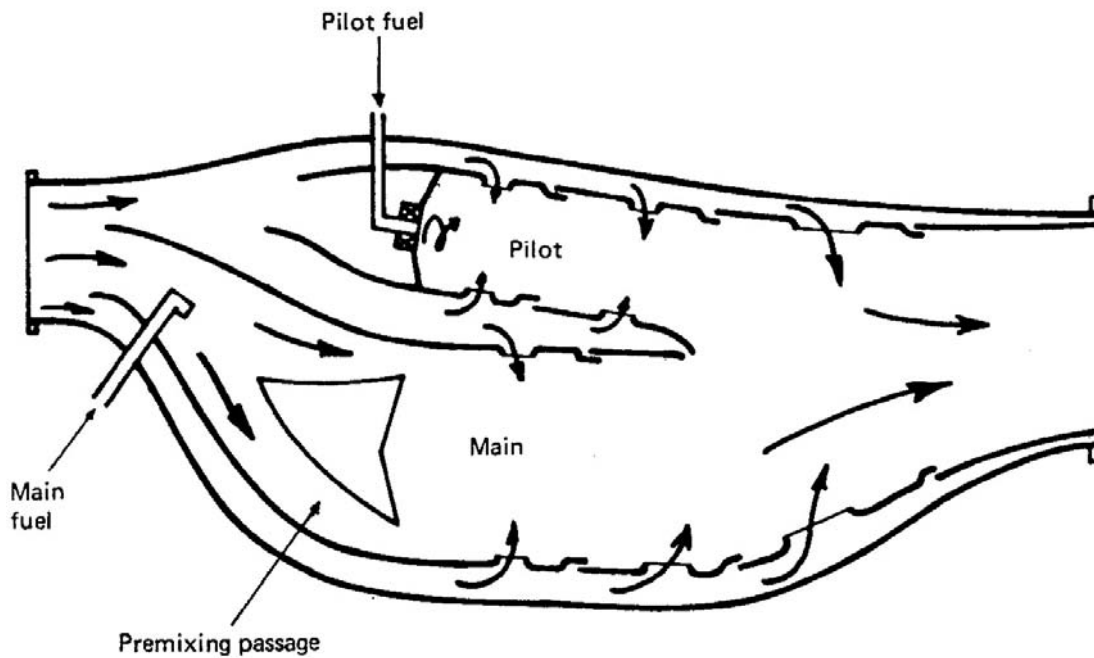


Figure 37: Combustore a due stadi.

3.2.1 CAMERE DI COMBUSTIONE: FONDAMENTI DI COMBUSTIONE

- REAZIONE ESOTERMICA TRA COMBUSTIBILE ED OSSIDANTE
- FIAMME:
 - NONPREMISCELATE (O DIFFUSIVE)
 - PREMISCELATE
 - PARZIALMENTE NONPREMISCELATE
- REGIMI:
 - LAMINARE
 - TURBOLENTO $\leftarrow Re \simeq 10^5$

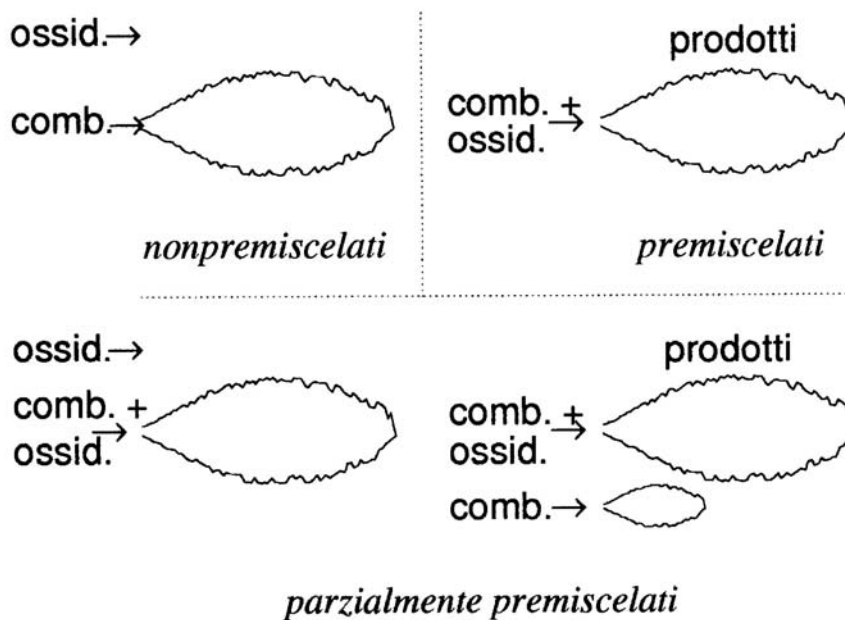


Figure 38: Fiamme con reagenti nonpremiscelati, premiscelati, parzialmente premiscelati.

3.2.2 FATTORI CONTROLLANTI

- CHIMICI:
 - TASSI DI REAZIONE

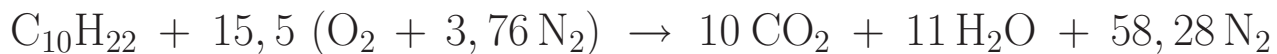
- FISICI:
 - EVAPORAZIONE GOCCIOLINE
 - MISCELAMENTO (TURBOLENTO)
 - DIFFUSIONE COMBUSTIBILE E ARIA (PER FIAMME NON-PREMISCELATE)
 - SCAMBIO DI CALORE

3.2.3 COMBUSTIONE STECHIOMETRICA

- ES.: *n*-DECANO $C_{10}H_{22}$ E ARIA
- $\mathcal{M}_{C_{10}H_{22}} = 142,287 \text{ kg/kmol}$
- COMPOSIZIONE ARIA (IN FRAZIONI MOLARI X_i):
 - N_2 78,08 % ($\mathcal{M}_{N_2} = 28,0134$)
 - O_2 20,95 % ($\mathcal{M}_{O_2} = 31,9988$)
 - Ar 0,934 % ($\mathcal{M}_{Ar} = 39,948$)
 - CO_2 0,037 % ($\mathcal{M}_{CO_2} = 44,00995$)
 - $\simeq 21\% O_2, 79\% N_2 \rightarrow 3,76$ MOLECOLE DI N_2 PER OGNI MOLECOLA DI O_2

$$\rightarrow \mathcal{M}_{aria} = \sum_i X_i \mathcal{M}_i = 28,9645 \simeq 29 \text{ kg/kmol}$$

- COMBUSTIONE STECHIOMETRICA:



- $X_{C_{10}H_{22},st} = 1 / (1 + 15,5 + 58,28) = 0,0134$
- $Y_{C_{10}H_{22},st} = 142,287 / (142,287 + 496 + 1632,6) = 0,0625$

3.2.4 LIMITI DI INFIAMMABILITÀ

- PER UNA MISCELA DI n -DECANO E ARIA, LA COMBUSTIONE PUÒ AVVENIRE SOLO SE $X_{C_{10}H_{22}}$ È COMPRESA TRA 0,75 E 5,6 $X_{C_{10}H_{22},st}$
- IN COMBUSTIONE NONPREMISCELATA, CI SARANNO SICURAMENTE ZONE OVE QUESTA CONDIZIONE È SODDISFATTA
- IN COMBUSTIONE PREMISCELATA, DIPENDE DALLA COMPOSIZIONE DELLA MISCELA (MENO STABILE)
- IN TERMINI DI RAPPORTO DI EQUIVALENZA ($Y_i = X_i \mathcal{M}_i / \mathcal{M} = X_i \mathcal{M}_i / \sum_i X_i \mathcal{M}_i$):

$$\varphi = \frac{F/O}{(F/O)_{st}} = \frac{Y_f/Y_o}{(Y_f/Y_o)_{st}} \implies 0,75 < \varphi < 6$$

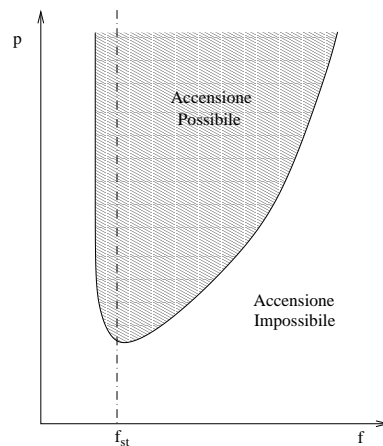


Figure 39: Limiti di infiammabilità di una miscela combustibile/aria.

3.2.5 FLASH POINT

- p_{vap} FUNZIONE CRESCENTE DI T
- **FLASH POINT:** T ALLA QUALE CONCENTRAZIONE VAPORI COMBUSTIBILE IN ARIA = LIMITE INFERIORE DI INFIAMMABILITÀ
- IL CAMPO DI INFIAMMABILITÀ SI RESTRINGE IN PRESENZA DI UN'INERTE (N_2 , $CO_2 \rightarrow$ SERBATOI)

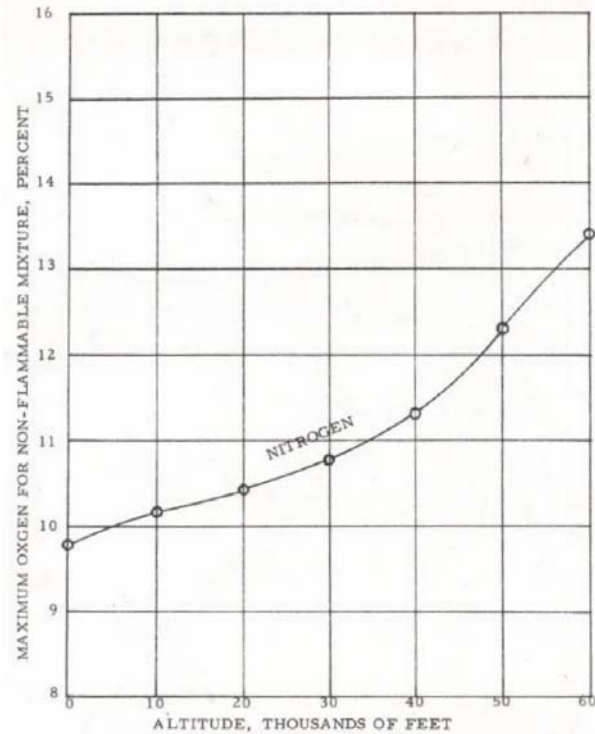
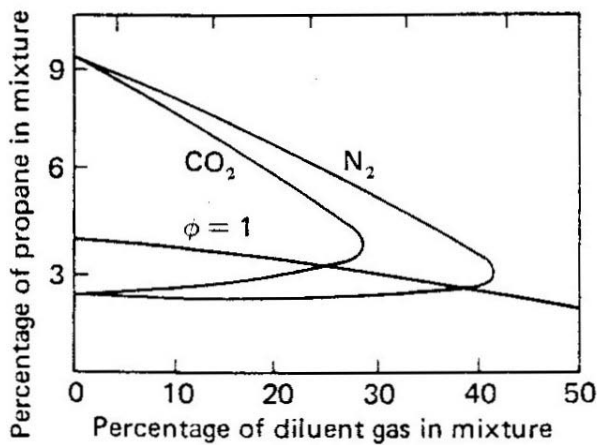


Figure 40: (sinistra) Limiti di infiammabilità di una miscela propano/aria diluita con CO_2 oppure N_2 , per $p = 1$ atm, $T = 298,15$ C; (destra) concentrazione di O_2 al disotto della quale l'accensione di una miscela contenente vapori di JP-4 è impossibile (diluyente N_2 ; 1 ft = 0,3048 m).

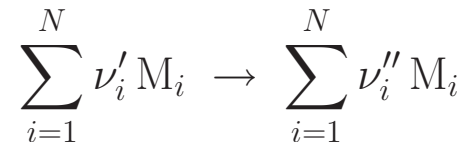
- SE NELLA MISCELA ARIA/VAPORI DI JP-4 RISULTA $X_{O_2} < 9\%$ \rightarrow ACCENSIONE IMPOSSIBILE A QUALSIASI p

3.2.6 DESCRIZIONE DELLA CHIMICA

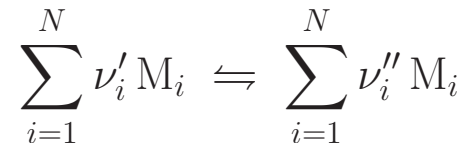


- FORMA GENERALE:

- PER PASSI ELEMENTARI DI REAZIONE:



- PER REAZIONI REVERSIBILI:



- LIVELLI DI DESCRIZIONE:

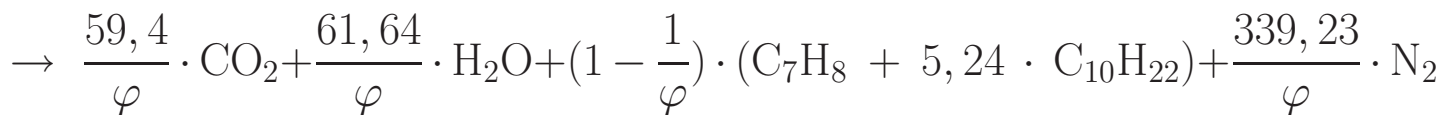
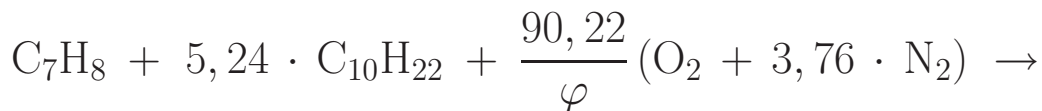
- COMBUSTIONE “*MIXED IS BURNT*”
 - COMBUSTIONE IN EQUILIBRIO CHIMICO
 - COMBUSTIONE CON CHIMICA A VELOCITÀ FINITA

3.2.7 COMBUSTIONE "MIXED IS BURNT"

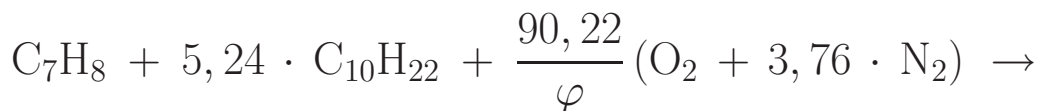
- ESEMPIO: COMBUSTIONE CHEROSENE/ARIA
- CHEROSENE \sim 89% *n*-DECANO $C_{10}H_{22}$, 11% TOLUOLO C_7H_8 (IN MASSA) $\longrightarrow \frac{n_{C_{10}H_{22}}}{n_{C_7H_8}} \simeq 5,24$
- ARIA \sim 79% N_2 , 21% O_2 (IN VOLUME) $\longrightarrow \frac{n_{N_2}}{n_{O_2}} \simeq 3,76$
- PER COMBUSTIONE STECHIOMETRICA ($\varphi = 1$):



- PER COMBUSTIONE RICCA ($\varphi > 1$):



- PER COMBUSTIONE POVERA ($\varphi < 1$):



3.2.8 COMBUSTIONE IN EQUILIBRIO CHIMICO

- PRESSIONE PARZIALE DELLA SPECIE i

$$p_i = X_i p$$

- ESEMPIO: $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

$$K_{p,\text{H}_2\text{O}}(T) = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2} (p_{\text{O}_2})^{1/2}}$$

$$\frac{X_{\text{H}_2\text{O}}}{X_{\text{H}_2} (X_{\text{O}_2})^{1/2}} = K_{p,\text{H}_2\text{O}}(T) \cdot p^{1/2} = K_{X,\text{H}_2\text{O}}(T, p)$$

- IN GENERALE $K_p(T) = \prod_{i=1}^N p_i^{\Delta\nu_i}$, CON $\Delta\nu_i = \nu_i'' - \nu_i'$
- p ESPRESSA IN UNITÀ DEL RIFERIMENTO p_0 (1 atm, 100 kPa)
- CODICE STANJAN, ww2.mne.ksu.edu/~chapman/thermo2/download.html
- FILES DATI SU dma.ing.uniroma1.it/STAFF/lentini/lentini.html (*Lecture Notes*):
 - jetaair.dat: COMBUSTIONE JET-A/ARIA, SENZA CHIMICA DELL'AZOTO
 - jetaairn.dat: COMBUSTIONE JET-A/ARIA, CON CHIMICA DELL'AZOTO (CHE PERÒ NON È IN EQUILIBRIO)

3.2.9 COMBUSTIONE CON CHIMICA A VELOCITÀ FINITA (SINGOLA REAZIONE)

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_l Y_i}{\partial x_l} = \frac{\partial}{\partial x_l} \left(\rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial x_l} \right) + w_i, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

- w_i TASSO DI PRODUZIONE DELLA SPECIE CHIMICA i [kg/(m³s)]:
DALLA LEGGE D'AZIONE DI MASSA

$$w_i = \Delta \nu_i \mathcal{M}_i \left\{ k_f \prod_{j=1}^N [M_j]^{\nu'_j} \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

- * {...} TASSO DELLA REAZIONE [n. reazioni/(N⁰m³s)]:

$$[M_j] = \frac{n_j}{V} = \frac{m_j / \mathcal{M}_j}{V} = \frac{Y_j m / \mathcal{M}_j}{V} = \frac{\rho Y_j}{\mathcal{M}_j}$$

- k_f 'COSTANTE' DELLA REAZIONE IN AVANTI:

$$k_f = B T^\alpha \exp \left(-\frac{E}{RT} \right)$$

- B FATTORE DI FREQUENZA, E ENERGIA DI ATTIVAZIONE
- $m = \sum_i \nu'_i$ MOLECOLARITÀ DELLA REAZIONE \implies

$$w_i = \mathcal{M}_i \Delta \nu_i \rho^m B T^\alpha \exp \left(-\frac{E}{RT} \right) \prod_{j=1}^N \left(\frac{Y_j}{\mathcal{M}_j} \right)^{\nu'_j}, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

3.2.10 COMBUSTIONE CON CHIMICA A VELOCITÀ FINITA (M REAZIONI)

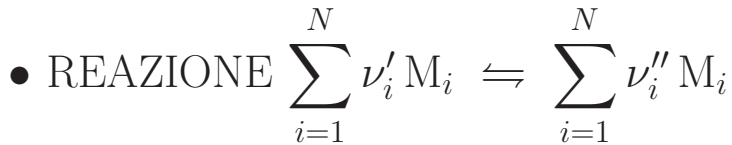
- IN PRESENZA DI M REAZIONI ($m_k = \sum_i \nu'_{i,k}$):

$$w_i = \mathcal{M}_i \sum_{k=1}^M \Delta \nu_{i,k} \rho^{m_k} B_k T^{\alpha_k} \exp\left(-\frac{E_k}{\mathcal{R}T}\right) \prod_{j=1}^N \left(\frac{Y_j}{\mathcal{M}_j}\right)^{\nu'_{j,k}}, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$\Delta \nu_{i,k} = \nu''_{i,k} - \nu'_{i,k}$$

- ESPRESSIONE DI ARRHENIUS
- B_k FATTORE DI FREQUENZA, E_k ENERGIA DI ATTIVAZIONE (T_k TEMPERATURA DI ATTIVAZIONE) DELLA REAZIONE k
- ESPRESSI IN UNITÀ cm, g, s, mol $\rightarrow w_i$ IN [g/(cm³ s)] \rightarrow $\times 1000$ PER OTTENERE w_i IN UNITÀ SI [kg/(m³ s)]
- CHIMICA A VELOCITÀ FINITA TALVOLTA INDICATA COME 'CHIMICA IN NONEQUILIBRIO' (DA EVITARE)

3.2.11 DERIVAZIONE DELLA COSTANTE DI EQUILIBRIO K_p



- FUNZIONE DI GIBBS $G = H - TS$ NON VARIA

$$\sum_{i=1}^N \Delta \nu_i \hat{g}_i = \sum_{i=1}^N \Delta \nu_i (\hat{h}_i - T \hat{s}_i) = 0$$

- $\hat{g}_i, \hat{h}_i, \hat{s}_i$ RIFERITE ALL'UNITÀ MOLARE

- $\hat{d}s_i = \hat{c}_{p,i} \frac{dT}{T} - \mathcal{R} \frac{dp_i}{p_i} \implies \hat{s}_i = \hat{s}_{0,i}(p_0, T) - \mathcal{R} \log \frac{p_i}{p_0}$

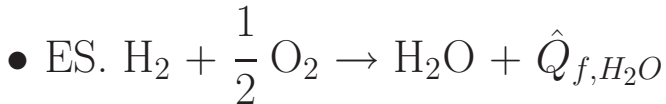
$$\sum_{i=1}^N \Delta \nu_i \left[\hat{h}_i - T \left(\hat{s}_{0,i} - \mathcal{R} \log \frac{p_i}{p_0} \right) \right] = 0$$

$$\sum_{i=1}^N \Delta \nu_i (\hat{h}_i - T \hat{s}_{0,i}) = -\mathcal{R} T \sum_{i=1}^N \Delta \nu_i \log \frac{p_i}{p_0}$$

$$\exp \left[-\frac{1}{\mathcal{R} T} \sum_{i=1}^N \Delta \nu_i (\hat{h}_i - T \hat{s}_{0,i}) \right] = \prod_{i=1}^N \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{\Delta \nu_i} = K_p(T)$$

3.2.12 ENTALPIA ASSOLUTA

- PER OGNI SPECIE CHIMICA SI DEFINISCE UN'ENTALPIA DI FORMAZIONE



- \hat{Q}_f CALORE DI FORMAZIONE = $-\Delta\hat{h}_{f,\text{H}_2\text{O}}$

- PER ELEMENTI ALLO STATO MOLECOLARE NEL LORO STATO DI AGGREGAZIONE STANDARD $\Delta\hat{h}_{f,i} = 0$

- ES. $\text{H}_2(\text{g}), \text{O}_2(\text{g}), \text{C}(\text{s}), \text{Hg}(\text{l}), \dots$

- PER UNITÀ DI MASSA $\Delta h_{f,i} = \Delta\hat{h}_{f,i}/\mathcal{M}_i = 0$

- $\Delta h_{f,i}$ RIPORTATO PER $T_0 = 298,15 \text{ K}, p_0 = 100 \text{ kPa}$ (O 1 atm)

- ENTALPIA ASSOLUTA: $h_i = \Delta h_{f,i} + \int_{T_0}^T c_{p,i}(T') dT'$

- ENTALPIA DI UNA MISCELA:

PER UNITÀ DI MASSA: $h = \sum_{i=1}^N Y_i h_i(T)$

PER UNITÀ MOLARE: $\hat{h} = \sum_{i=1}^N X_i \hat{h}_i(T)$

3.2.13 CHIMICA A VELOCITÀ FINITA: RELAZIONE TRA k_f , k_b , K_p

- PER REAZIONI REVERSIBILI

$$w_i = \mathcal{M}_i \sum_{k=1}^M \Delta\nu_{i,k} \left\{ k_{f,k} \prod_{j=1}^N [M_j]^{\nu'_{j,k}} - k_{b,k} \prod_{j=1}^N [M_j]^{\nu''_{j,k}} \right\} = \dots$$

- ALL'EQUILIBRIO (SISTEMI 0-D A STAZIONARIO):

$$k_{f,k} \prod_{j=1}^N [M_j]^{\nu_{j,k}'} = k_{b,k} \prod_{j=1}^N [M_j]^{\nu_{j,k}''} \implies \frac{k_{f,k}}{k_{b,k}} = \prod_{j=1}^N [M_j]^{\Delta\nu_{j,k}}$$

$$[M_j] = \frac{n_j}{V} = \frac{p_j}{\mathcal{R}T} = \frac{p_j/p_0}{\mathcal{R}T/p_0}$$

$$\frac{k_{f,k}}{k_{b,k}} = K_{p,k}(T) (\mathcal{R}T/p_0)^{-\sum_j \Delta\nu_{j,k}} = \frac{K_{p,k}(T)}{(\mathcal{R}T/p_0)^{n_k - m_k}}$$

- MOLECOLARITÀ PASSI DIRETTO/INVERSO $m_k = \sum_i \nu'_{i,k}$, $n_k = \sum_i \nu''_{i,k}$
- w_i PUÒ ESSERE ESPRESSO COME

$$w_i = \mathcal{M}_i \sum_{k=1}^M \Delta\nu_{i,k} k_{f,k} \prod_{j=1}^N [M_j]^{\nu'_{j,k}} \left\{ 1 - \frac{k_{b,k}}{k_{f,k}} \prod_{l=1}^N [M_l]^{\Delta\nu_{l,k}} \right\} =$$

$$= \mathcal{M}_i \sum_{k=1}^M \Delta\nu_{i,k} k_{f,k} \prod_{j=1}^N [M_j]^{\nu'_{j,k}} \left\{ 1 - \frac{(\mathcal{R}T/p_0)^{n_k - m_k}}{K_{p,k}} \prod_{l=1}^N [M_l]^{\Delta\nu_{l,k}} \right\} = \dots$$

3.2.14 TASSO DI PRODUZIONE ALL'EQUILIBRIO

$$w_i = \mathcal{M}_i \sum_{k=1}^M \Delta \nu_{i,k} \rho^{m_k} B_{f,k} T^{\alpha_k} \exp\left(-\frac{E_k}{\mathcal{R}T}\right) \prod_{j=1}^N \left(\frac{Y_j}{\mathcal{M}_j}\right)^{\nu'_{j,k}} \cdot \left\{ 1 - \frac{(\rho \mathcal{R} T / p_0)^{n_k - m_k}}{K_{p,k}} \prod_{l=1}^N \left(\frac{Y_l}{\mathcal{M}_l}\right)^{\Delta \nu_{l,k}} \right\}$$

- $\{\dots\} = 0$, MA PER RAGGIUNGERE EQUILIBRIO $B_{f,k} \rightarrow \infty$

→ $w_i = \infty \cdot 0$ INDETERMINATO – ARRHENIUS NON APPLICABILE

- w_i IN GENERALE *NON* NULLO ALL'EQUILIBRIO;
IN EQUILIBRIO GRANDEZZE DI STATO ESPRIMIBILI IN FUNZIONE DI 2 GRANDEZZE, ES. (p, T) , (p, h) , (h, s) , ...

$$w_i = \frac{\partial \rho Y_i(p, T)}{\partial t} + \frac{\partial \rho(p, T) u_l Y_i(p, T)}{\partial x_l} - \frac{\partial}{\partial x_l} \left[\rho(p, T) D_i \frac{\partial Y_i(p, T)}{\partial x_l} \right]$$

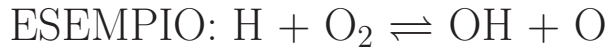
→ NON NULLO A MENO CHE $\partial/\partial x_k = 0$ (0-D), $\partial/\partial t = 0$ (STAZIONARIO)

- IN REALTÀ NESSUN SISTEMA È ALL'EQUILIBRIO
MA PUÒ APPROSSIMARLO SE $t_s \gg t_c$
 t_s TEMPO DI RESIDENZA, t_c TEMPO CARATTERISTICO REAZIONE

3.2.15 REAZIONE BE E DR

- REAZIONI DI SCAMBIO BINARIO (*BINARY EXCHANGE*):

$$m_k = n_k$$



- REAZIONI DI DISSOCIAZIONE-RICOMBINAZIONE (*DISSOCIATION-RECOMBINATION*): $m_k \neq n_k$



RICHIEDONO INTERVENTO DI UN TERZO CORPO PER SODDISFARE EQ. QDM ED ENERGIA

EFFICIENZA DI TERZO CORPO O *CHAPERON EFFICIENCY*



$$w_{\text{O}} = 2 \mathcal{M}_{\text{O}} \rho^2 B_f T^\alpha \exp\left(-\frac{E}{\mathcal{R}T}\right) \frac{Y_{\text{O}_2}}{\mathcal{M}_{\text{O}_2}} \sum_{i=1}^N \frac{\varepsilon_i Y_i}{\mathcal{M}_i}$$

M_i	ε_i
O_2	0,4
N_2	0,4
H_2O	6,54
CO_2	1,5
CO	0,75

3.2.16 MECCANISMI DI CINETICA CHIMICA

- DETTAGLIATI
- RIDOTTI/SEMPLIFICATI
- SEMI-GLOBALI
- GLOBALI

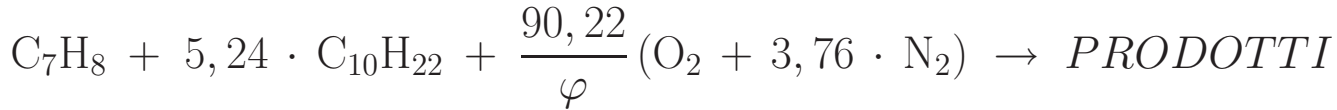
3.2.17 COMBUSTIONE ADIABATICA

- TUTTO IL CALORE GENERATO NELLA REAZIONE È UTILIZZATO PER INNALZARE LA T DEI PRODOTTI
- GLOBALMENTE $\Delta Q = 0 \Leftrightarrow \Delta h = 0$
- PER COMBUSTIONE IN EQUILIBRIO, CALCOLO A (p, h) ASSEGNATE
- T_{af} TEMPERATURA ADIABATICA DI FIAMMA

3.2.18 CONDIZIONI DI EQUILIBRIO

- IN EQUILIBRIO, LE PROPRIETÀ DELLA MISCELA REAGENTE SONO DETERMINATE QUANDO SONO ASSEGNATE:
 - UNA COPPIA DI VARIABILI DI STATO
ES. (p, T) , (p, h) , (h, s) , (p, Y_{H_2O}) , ...
 - LE PROPORZIONI DEI REAGENTI
ES. X_i , Y_i , n_i , ... (DELLE SPECIE)
O ANCHE LE MOLI DEGLI *ATOMI*

3.2.19 COMBUSTIONE CHEROSENE/ARIA



- NUMERO DI *ATOMI* DEI SINGOLI ELEMENTI:

$$- n_C = 7 + 5,24 \cdot 10 = 59,4$$

$$- n_H = 8 + 5,24 \cdot 22 = 123,28$$

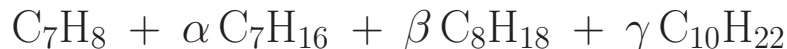
$$- n_O = 2 \cdot 90,22/\varphi = 180,44/\varphi$$

$$- n_N = 2 \cdot 3,76 \cdot 90,22/\varphi = 678,46/\varphi$$

$$\left(\frac{F}{O}\right)_{st} = \frac{\mathcal{M}_{\text{C}_7\text{H}_8} + 5,24 \cdot \mathcal{M}_{\text{C}_{10}\text{H}_{22}}}{90,22 (\mathcal{M}_{\text{O}_2} + 3,76 \cdot \mathcal{M}_{\text{N}_2})} = 0,0676$$

- NUMERO DI ATOMI DETERMINA UNIVOCAMENTE LA COMPOSIZIONE DEI REAGENTI:

- ES: CONSIDERANDO ANCHE C_7H_{16} , C_8H_{18}



$$n_C = 7 + 7\alpha + 8\beta + 10\gamma = 59,4$$

$$n_H = 8 + 16\alpha + 18\beta + 22\gamma = 123,28$$

- SOLUZIONE: $0,6\alpha + 0,4\beta = 0 \implies \alpha = \beta = 0$

3.2.20 ESEMPIO: COMBUSTIONE ADIABATICA DI CHEROSENE ED ARIA, $A/F = 50$

- CONDIZIONI DEL CF6-50 AL DECOLLO:

* $T_f = 288,15 \text{ K}$, $T_o = 852 \text{ K}$

* $p = 2,985 \text{ MPa} = 29,46 \text{ atm}$

* $A/F = 50 \rightarrow f = \frac{1}{A/F} \rightarrow \varphi = \frac{f}{f_{st}} = \frac{1/50}{0,0676} = 0,2958$

- $h = Y_f h_f(T_f) + Y_o h_o(T_o)$

- $Y_f = \frac{1}{1 + A/F} = 0,0196$; $Y_o = 1 - Y_f = 0,9804$

- STANJAN: $h_f(T_f) = -1495400 \text{ J/kg}$, $h_o(T_o) = 585120 \text{ J/kg}$

- $h = Y_f h_f(T_f) + Y_o h_o(T_o) = 544325 \text{ J/kg}$

- NUMERO DI *ATOMI* DEI SINGOLI ELEMENTI:

* $n_C = 7 + 5,24 \cdot 10 = 59,4$

* $n_H = 8 + 5,24 \cdot 22 = 123,28$

* $n_O = 2 \cdot 90,22/\varphi = 609,96$

* $n_N = 2 \cdot 3,76 \cdot 90,22/\varphi = 2293,468$

3.2.21 CALCOLO h_f MEDIANTE STANJAN p, T ASSEGNATE (1)

STANJAN chemical equilibrium solver, v 3.91 IBM-PC
(c) Stanford University 1981, 1984, 1985, 1986, 1987

Finds the equilibrium state for a system consisting of one or more phases. The gas phase is treated as a mixture of ideal gases, and condensed phases are treated as ideal solutions. Specific heats are temperature-dependent. Also handles constrained equilibrium or frozen composition.

You should be able to run STANJAN by responding to the prompts. Try it!

For more information or for help with difficult cases call the program author:

Prof. Wm. C. Reynolds
Department of Mechanical Engineering
Stanford University
Stanford, CA 94305-3030 (415)-723-3840

Do you want to be instructed?

Select a species data file or <return> if no file is desired.

Species data file? jetaair.dat

Getting species data file jetaair.dat

PLEASE WAIT!

H2

O2

H

O

OH

H2O

HO2

N2

CO

3.2.22 CALCOLO h_f MEDIANTE STANJAN p, T ASSEGNATE (2)

C02
CH0
CH20
C7H8
C7H16
C8H18
C10H22

Is this the file you wanted? y

Do you want to select REACTANTS or PRODUCTS (r/p)? p

Species data file: jetaair.dat

H2	O2	H	O	OH	H2O	HO2	N2
CO	CO2	CHO	CH20	C7H8	C7H16	C8H18	C10H22

PRODUCTS selection: each PHASE is a homogeneous mixture of PRODUCTS.

Type the species in phase 1, separated by commas or blanks; <return> = done.

* = all gas species # = all condensed species ? = help!

C7H8,C10H22

Species data file: jetaair.dat

H2	O2	H	O	OH	H2O	HO2	N2
CO	CO2	CHO	CH20	C7H8	C7H16	C8H18	C10H22

PRODUCTS selection: each PHASE is a homogeneous mixture of PRODUCTS.

Type the species in phase 2, separated by commas or blanks; <return> = done.

* = all gas species # = all condensed species ? = help!

3.2.23 CALCOLO h_f MEDIANTE STANJAN p, T ASSEGNATE (3)

Do you want to CHECK the ATOMS in the molecules?

Enter the mols of each ATOM after its name:

H : 123.28
C : 59.4

This is the CURRENT SETUP:

Atom	population
H	1.23280000E+02
C	5.94000000E+01

Product phase 1:
C7H8 C10H22

Do you want to CHANGE the SETUP?

Run options:

- 0 Abort and redo setup
- 1 Specified T and P
- 2 Specified T and V
- 3 Specified T and S
- 4 Specified P and V
- 5 Specified P and H
- 6 Specified P and S
- 7 Specified V and U
- 8 Specified V and H
- 9 Specified V and S
- 10 A matrix of specified P,T cases (LOTUS file option)

3.2.24 CALCOLO h_f MEDIANTE STANJAN p, T ASSEGNATE (4)

- 11 One of the above at specified composition
- 12 One of the above under specified linear constraints

Enter run option: 1

Enter T (K): 288.15

Enter P (atm): 29.46

The sound speed can be calculated, but then the calculations take longer.

Do you want the SOUND SPEED?

Do you want to SAVE the run OUTPUT in a file?

Do you want to MONITOR the run (probably not)?

Working; PLEASE WAIT!

OUTPUT READY

Use ctrl-s to stop/start the screen display.

Do you want to see the JANNAF data used?

On IBM-PC, use <ctrl-PrtSc> to start printer (optional).

Computed properties

Independent	population	element
atom		potential
H	1.23280000E+02	-14.8305
C	5.94000000E+01	15.9378

3.2.25 CALCOLO h_f MEDIANTE STANJAN p, T ASSEGNATE (5)

Products at T = 288.15 K P = 2.946E+01 atmospheres

species	mol fraction in the phase	mol fraction in mixture	mass fraction in mixture	mols*
phase 1: molal mass = 134.249 kg/kmol				
C7H8	.16026E+00	.16026E+00	.10998E+00	1.00000E+00
C10H22	.83974E+00	.83974E+00	.89002E+00	5.24000E+00

* Species mols for the atom populations in mols.

Mixture properties: molal mass = 134.249 kg/kmol

T = 288.15 K P = 2.9850E+06 Pa V = 5.9784E-03 m**3/kg

U = -1.5133E+06 J/kg H = -1.4954E+06 J/kg S = 3.5601E+03 J/kg-K

Made 0 (T,P) iterations; 1 equilibrium iterations; v 3.91 IBM-PC

3.2.26 CALCOLO h_o MEDIANTE STANJAN p, T ASSEGNATE (1)

STANJAN chemical equilibrium solver, v 3.91 IBM-PC

... OMISSIS ...

Do you want to be instructed?

... OMISSIS ...

Species data file? jetaair.dat

... OMISSIS ...

Is this the file you wanted? y

Do you want to select REACTANTS or PRODUCTS (r/p)?

... OMISSIS ...

Species data file: jetaair.dat

H2	O2	H	O	OH	H2O	H02	N2
CO	CO2	CHO	CH2O	C7H8	C7H16	C8H18	C10H22

PRODUCTS selection: each PHASE is a homogeneous mixture of PRODUCTS.

Type the species in phase 1, separated by commas or blanks; <return> = done.

* = all gas species # = all condensed species ? = help!

O2,N2

Species data file: jetaair.dat

H2	O2	H	O	OH	H2O	H02	N2
CO	CO2	CHO	CH2O	C7H8	C7H16	C8H18	C10H22

PRODUCTS selection: each PHASE is a homogeneous mixture of PRODUCTS.

Type the species in phase 2, separated by commas or blanks; <return> = done.

* = all gas species # = all condensed species ? = help!

Do you want to CHECK the ATOMS in the molecules?

3.2.27 CALCOLO h_o MEDIANTE STANJAN p, T ASSEGNATE (2)

... OMISSIS ...

Enter the mols of each ATOM after its name:

O : 1.

N : 3.76

... OMISSIS ...

Do you want to CHANGE the SETUP?

Run options:

0 Abort and redo setup

1 Specified T and P

2 Specified T and V

3 Specified T and S

4 Specified P and V

5 Specified P and H

6 Specified P and S

7 Specified V and U

8 Specified V and H

9 Specified V and S

10 A matrix of specified P,T cases (LOTUS file option)

11 One of the above at specified composition

12 One of the above under specified linear constraints

Enter run option: 1

Enter T (K): 852.

Enter P (atm): 29.46

... OMISSIS ...

3.2.28 CALCOLO h_o MEDIANTE STANJAN p, T ASSEGNATE (3)

Products at T = 852.00 K P = 2.946E+01 atmospheres

species	mol fraction in the phase	mol fraction in mixture	mass fraction in mixture	mols*
phase 1: molal mass = 28.851 kg/kmol				
O2	.21008E+00	.21008E+00	.23301E+00	5.00000E-01
N2	.78992E+00	.78992E+00	.76699E+00	1.88000E+00

* Species mols for the atom populations in mols.

Mixture properties: molal mass = 28.851 kg/kmol

T = 852.00 K P = 2.9850E+06 Pa V = 8.2255E-02 m**3/kg

U = 3.3959E+05 J/kg H = 5.8512E+05 J/kg S = 7.0087E+03 J/kg-K

Made 0 (T,P) iterations; 1 equilibrium iterations; v 3.91 IBM-PC

3.2.29 CALCOLO T_{af} MEDIANTE STANJAN h, p ASSEGNATE (1)

STANJAN chemical equilibrium solver, v 3.91 IBM-PC

... OMISSIS ...

Do you want to be instructed?

Select a species data file or <return> if no file is desired.

Species data file? jetaair.dat

... OMISSIS ...

Is this the file you wanted? y

Do you want to select REACTANTS or PRODUCTS (r/p)? p

... OMISSIS ...

PRODUCTS selection: each PHASE is a homogeneous mixture of PRODUCTS.

Type the species in phase 1, separated by commas or blanks; <return> = done.

* = all gas species # = all condensed species ? = help!

*

PRODUCTS selection: each PHASE is a homogeneous mixture of PRODUCTS.

Type the species in phase 2, separated by commas or blanks; <return> = done.

* = all gas species # = all condensed species ? = help!

Do you want to CHECK the ATOMS in the molecules?

Enter the mols of each ATOM after its name:

H : 123.28

O : 609.96

N : 2293.468

C : 59.4

... OMISSIS ...

3.2.30 CALCOLO T_{af} MEDIANTE STANJAN h, p ASSEGNATE (2)

Run options:

- 0 Abort and redo setup
- 1 Specified T and P
- 2 Specified T and V
- 3 Specified T and S
- 4 Specified P and V
- 5 Specified P and H
- 6 Specified P and S
- 7 Specified V and U
- 8 Specified V and H
- 9 Specified V and S
- 10 A matrix of specified P,T cases (LOTUS file option)
- 11 One of the above at specified composition
- 12 One of the above under specified linear constraints

Enter run option: 5

Enter P (atm): 29.46

Enter H (J/kg): 544325.5

Enter estimated T (K): 2000.

... OMISSIS ...

3.2.31 CALCOLO T_{af} MEDIANTE STANJAN h, p ASSEGNATE (3)

Products at T = 1539.38 K P = 2.946E+01 atmospheres

species	mol fraction in the phase	mol fraction in mixture	mass fraction in mixture	mols*
phase 1:	molal mass = 28.816 kg/kmol			
H2	.63256E-07	.63256E-07	.44255E-08	9.37791E-05
O2	.14485E+00	.14485E+00	.16085E+00	2.14750E+02
H	.12877E-08	.12877E-08	.45044E-10	1.90908E-06
O	.47519E-06	.47519E-06	.26385E-06	7.04488E-04
OH	.27212E-04	.27212E-04	.16061E-04	4.03437E-02
H2O	.41563E-01	.41563E-01	.25986E-01	6.16196E+01
HO2	.12769E-06	.12769E-06	.14627E-06	1.89304E-04
N2	.77349E+00	.77349E+00	.75195E+00	1.14673E+03
CO	.16661E-06	.16661E-06	.16195E-06	2.47000E-04
CO2	.40066E-01	.40066E-01	.61192E-01	5.93998E+01
CHO	.61661E-15	.61661E-15	.62096E-15	9.14154E-13
CH2O	.24674E-18	.24674E-18	.25713E-18	3.65797E-16
C7H8	.30097-138	.30097-138	.96227-138	4.46204-136
C7H16	.70440-176	.70440-176	.24493-175	1.04431-173
C8H18	.12033-200	.12033-200	.47701-200	1.78394-198
C10H22	.33064-246	.33064-246	.16327-245	4.90195-244

* Species mols for the atom populations in mols.

Mixture properties: molal mass = 28.816 kg/kmol

T = 1539.38 K P = 2.9850E+06 Pa V = 1.4880E-01 m**3/kg

U = 1.0017E+05 J/kg H = 5.4433E+05 J/kg S = 7.8244E+03 J/kg-K

WARNING! The thermochemical data for C7H16 are extrapolated above 1000 K.

Made 6 (T,P) iterations; 19 equilibrium iterations; v 3.91 IBM-PC

3.2.32 INCOMBUSTI (IN EQUILIBRIO)

- PER $A/F = 50$ ($\varphi = 0,2958$):

- $T_{af} = 1539,38$ K

- $\sum Y_{incombusti} = Y_{H_2} + Y_H + Y_{OH} + Y_{HO_2} + Y_{CO} + Y_{CHO} + Y_{CH_2O} + Y_{C_7H_8} + Y_{C_7H_{16}} + Y_{C_8H_{18}} + Y_{C_{10}H_{22}} = 0,00164$ %

- PER $A/F = 14,8$ ($\varphi = 1$):

- $T_{af} = 2642,38$ K

- $\sum Y_{incombusti} = Y_{H_2} + Y_H + Y_{OH} + Y_{HO_2} + Y_{CO} + Y_{CHO} + Y_{CH_2O} + Y_{C_7H_8} + Y_{C_7H_{16}} + Y_{C_8H_{18}} + Y_{C_{10}H_{22}} = 1,93$ %

- QUESTO ALL'EQUILIBRIO (IN REALTÀ $Y_{incombusti}$ SICURAMENTE MAGGIORE)

3.2.33 CALCOLO CON CHIMICA N (STANJANL) *h, p* ASSEGNATE (1)

STANJAN chemical equilibrium solver, v 3.93L IBM-PC

... OMISSIS ...

Do you want to be instructed?

Species data file? jetaairn.dat

Getting species data file jetaairn.dat

PLEASE WAIT!

H2

O2

H

O

OH

H2O

HO2

N2

CO

CO2

CHO

CH2O

C7H8

C7H16

C8H18

C10H22

N

NO

NO2

N2O

Is this the file you wanted? y

Do you want to select REACTANTS or PRODUCTS (r/p)? p

Species data file: jetaairn.dat

3.2.34 CALCOLO CON CHIMICA N (STANJANL) *h, p* ASSEGNATE (2)

H2	O2	H	O	OH	H2O	H02	N2
CO	CO2	CHO	CH2O	C7H8	C7H16	C8H18	C10H22
N	NO	NO2	N2O				

PRODUCTS selection: each PHASE is a homogeneous mixture of PRODUCTS.

Type the species in phase 1, separated by commas or blanks; <return> = done.

* = all gas species # = all condensed species ? = help!

*

Species data file: jetaairn.dat

H2	O2	H	O	OH	H2O	H02	N2
CO	CO2	CHO	CH2O	C7H8	C7H16	C8H18	C10H22
N	NO	NO2	N2O				

PRODUCTS selection: each PHASE is a homogeneous mixture of PRODUCTS.

Type the species in phase 2, separated by commas or blanks; <return> = done.

* = all gas species # = all condensed species ? = help!

... OMISSIS ...

Do you want to CHECK the ATOMS in the molecules?

... OMISSIS ...

Products at T = 1536.17 K P = 2.946E+01 atmospheres

3.2.35 CALCOLO CON CHIMICA N (STANJANL) *h, p* ASSEGNATE (3)

species	mol fraction in the phase	mol fraction in mixture	mass fraction in mixture	mols*
phase 1:	molal mass = 28.816 kg/kmol			
H2	.60866E-07	.60866E-07	.42582E-08	9.02354E-05
O2	.14418E+00	.14418E+00	.16011E+00	2.13753E+02
H	.12176E-08	.12176E-08	.42592E-10	1.80516E-06
O	.45483E-06	.45483E-06	.25254E-06	6.74290E-04
OH	.26468E-04	.26468E-04	.15621E-04	3.92394E-02
H2O	.41564E-01	.41564E-01	.25986E-01	6.16202E+01
HO2	.12434E-06	.12434E-06	.14242E-06	1.84333E-04
N2	.77284E+00	.77284E+00	.75131E+00	1.14576E+03
CO	.15953E-06	.15953E-06	.15507E-06	2.36512E-04
CO2	.40067E-01	.40067E-01	.61192E-01	5.93998E+01
CHO	.57026E-15	.57026E-15	.57427E-15	8.45424E-13
CH2O	.22778E-18	.22778E-18	.23737E-18	3.37685E-16
C7H8	.27722-138	.27722-138	.88633-138	4.10992-136
C7H16	.18887-175	.18887-175	.65672-175	2.79999-173
C8H18	.45327-200	.45327-200	.17968-199	6.71978-198
C10H22	.13235-245	.13235-245	.65351-245	1.96213-243
N	.24672E-13	.24672E-13	.11994E-13	3.65772E-11
NO	.12905E-02	.12905E-02	.13439E-02	1.91325E+00
NO2	.26646E-04	.26646E-04	.42543E-04	3.95036E-02
N2O	.37253E-06	.37253E-06	.56903E-06	5.52286E-04

* Species mols for the atom populations in mols.

Mixture properties: molal mass = 28.816 kg/kmol

T = 1536.17 K P = 2.9850E+06 Pa V = 1.4848E-01 m**3/kg

U = 1.0110E+05 J/kg H = 5.4433E+05 J/kg S = 7.8248E+03 J/kg-K

3.2.36 CONSIDERAZIONI SULLA CHIMICA DELL'AZOTO

- T_{af} SI ABBASSA DI SOLI 3,21 K QUANDO SI INCLUDONO N, NO, NO₂, N₂O
- $X_{NO,eq} = 0,129 \%$
- TUTTAVIA, CHIMICA N LENTA ($t_c \gg t_s$)
→ EQUILIBRIO NON APPLICABILE

3.2.37 FIAMME PREMISCELATE LAMINARI

- (REAGENTI ALLO STATO GASSOSO)
- VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DELLA FIAMMA $S_L \simeq 0,43$ m/s
($\varphi = 1$, p ATMOSFERICA)
- FATTORI CONTROLLANTI: CINETICA CHIMICA E DIFFUSIONE
(DI CALORE E SPECIE)
- DIPENDE DA p , φ , T_{in}
- u VELOCITÀ DEL FLUSSO:
 - * $u = S_L$ COMBUSTIONE STABILE
 - * $u > S_L$ FLAMEOUT
 - * $u < S_L$ FLASHBACK

3.2.38 FIAMME PREMISCELATE TURBOLENTE

- $S_T \gg S_L$ PERCHÉ IL FRONTE DI FIAMMA È CORRUGATO
- S_T AUMENTA CON L'INTENSITÀ DELLA TURBOLENZA
- INTENSITÀ: $u'/\bar{u} = (\text{RMS FLUTTUAZIONI DI VELOCITÀ})/(\text{VELOCITÀ MEDIA})$

3.2.39 FIAMME NONPREMISCELATE LAMINARI

- FATTORE CONTROLLANTE: DIFFUSIONE DELLE SPECIE
- *NON* ESISTE UNA VELOCITÀ INTRINSECA DI FIAMMA (COMBUSTIONE PIÙ STABILE)
 - OMOGENEE (REAGENTI GASSOSI – *JET FLAMES*)
 - ETEROGENEE (ES. COMBUSTIBILE LIQUIDO, OSSIDANTE GASSOSO)

3.2.40 FIAMME NONPREMISCELATE TURBOLENTE

- TRANSIZIONE PER $Re_j \simeq 8000$

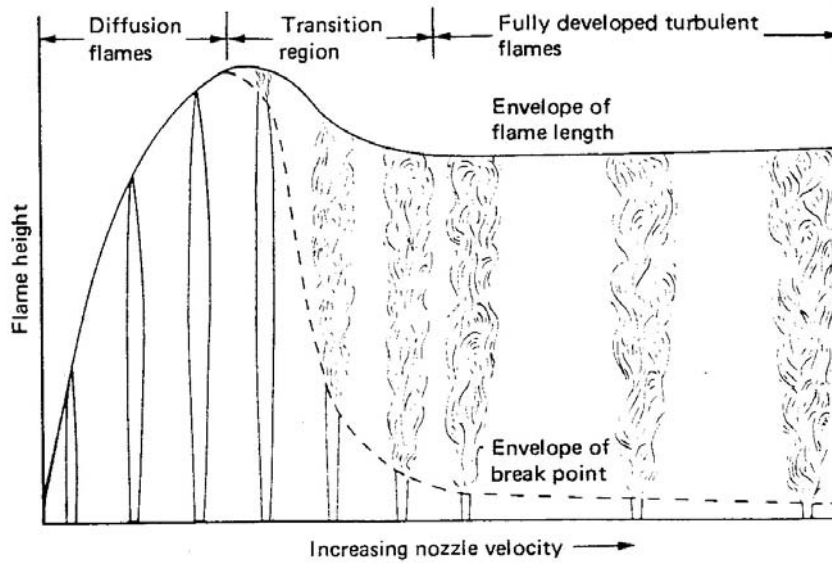


Figure 40: Modifica dell'aspetto di una fiamma nonpremiscelata al variare della velocità del getto di combustibile.

3.2.41 FIAMME ETEROGENEE: EVAPORAZIONE

- EVAPORAZIONE LEGATA A SCAMBIO TERMICO DAI PRODOTTI ALLE GOCCIOLINE

→ T_d AUMENTA, D_d DIMINUISCE (*DROPLET*)

3.3.1 CAMERE DI COMBUSTIONE: RENDIMENTO DI COMBUSTIONE η_b

- PER AVERE η_b ALTO \longrightarrow

$$t_s \geq t_e + t_m + t_c$$

- t_s TEMPO DI RESIDENZA IN CAMERA (*STAY*)
 - t_e TEMPO DI EVAPORAZIONE
 - t_m TEMPO DI MISCELAMENTO
 - t_c TEMPO CHIMICO CARATTERISTICO
- DIFFICILMENTE $t_e \simeq t_m \simeq t_c$
 - NORMALMENTE UNO DEI 3 TEMPI MOLTO MAGGIORE DEGLI ALTRI (FATTORE CONTROLLANTE)
 - *QUALE* DEI 3 TEMPI È CONTROLLANTE DIPENDE DALLE CONDIZIONI OPERATIVE (*IDLE*, DECOLLO, SALITA, CROCIERA)
 - IN SITUAZIONI 'DI CONFINE', 2 TEMPI POSSONO ESSERE \simeq MENTRE IL TERZO \ll

3.3.2 TEMPO DI EVAPORAZIONE

- DIPENDE DA DIMENSIONI GOCCE (SMD), INTENSITÀ DELLA TURBOLENZA, p_3
- SMD = SAUTER MEAN DIAMETER = $\sum n_i D_i^3 / \sum n_i D_i^2$
- n_i NUMERO DI GOCCIOLINE DI DIAMETRO D_i

3.3.3 EVAPORAZIONE: EFFETTO DEL DIAMETRO

- η_{ce} FRAZIONE DI COMBUSTIBILE VAPORIZZATO (IN MASSA)
 - t_{res} TEMPO DI RESIDENZA
- IMPORTANZA DI ATOMIZZARE FINEMENTE IL COMBUSTIBILE

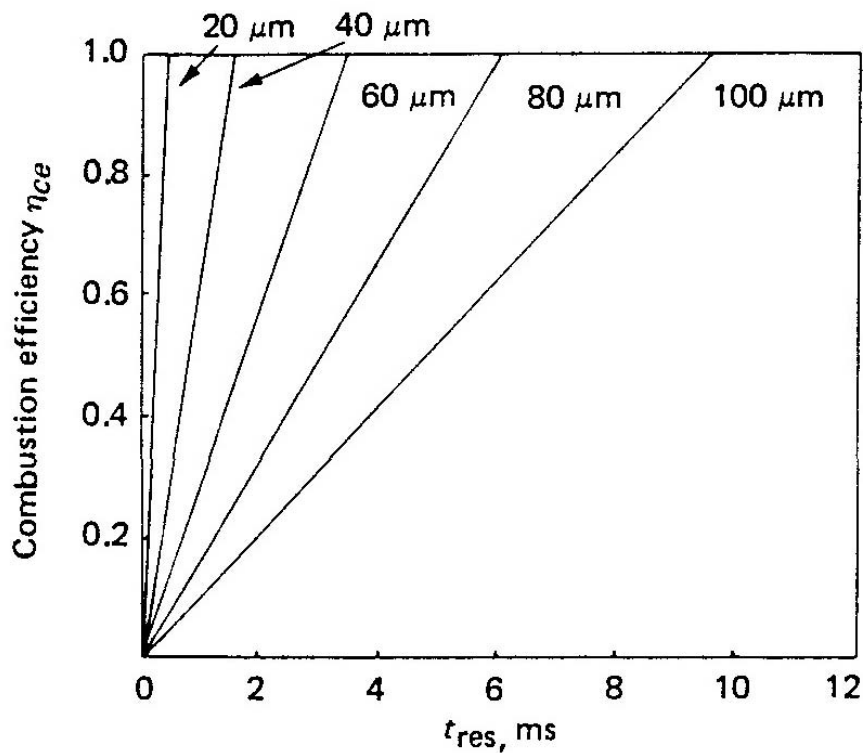


Figure 41: Frazione di combustibile (diesel) vaporizzato in funzione del tempo di residenza, per diversi valori del diametro medio di Sauter.

3.3.4 EVAPORAZIONE: EFFETTO DELLA TURBOLENZA E DELLA PRESSIONE

- PUÒ DIVENTARE FATTORE CONTROLLANTE A BASSE p_3

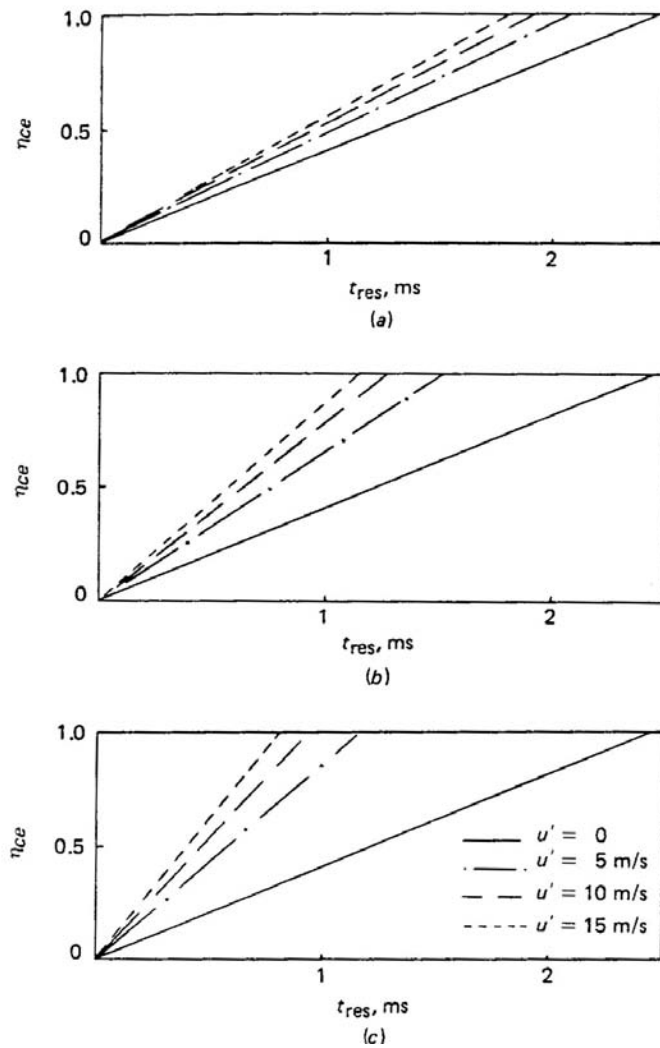


Figure 42: Frazione di combustibile (cherosene) vaporizzato in funzione del tempo di residenza, per $SMD = 60 \mu m$, e per diversi valori della pressione (a) 0,1 MPa, b) 1 MPa, c) 3 MPa) e della rms della velocità.

3.3.5 TEMPO DI MISCELAMENTO

- INVERSAMENTE PROPORZIONALE AL *TASSO DI MISCELAMENTO* \dot{m}_{mix} (kg/s DI REAGENTI CHE SI MESCOLANO)

$$\begin{aligned} \dot{m}_{mix} &\propto [\text{DIFFUSIVITÀ}] \cdot [\text{AREA}] \cdot [\text{GRADIENTE DI CONCENTRAZIONE}] \\ &\propto [\rho u_j l] \cdot [l^2] \cdot [1/l] = \rho u_j l^2 \end{aligned}$$

* N.B. [DIFFUSIVITÀ] *TURBOLENTA*

* $\rho = \rho_3 = p_3 / (R T_3)$

* $u_j \simeq (2 \Delta p_{liner} / \rho)^{1/2}$ VELOCITÀ GETTI ARIA (BERNOUILLI)

* l DIMENSIONE CARATTERISTICA DELLA CAMERA

$$\begin{aligned} \dot{m}_{mix} &\propto \rho \sqrt{\frac{\Delta p_{liner}}{\rho}} l^2 = \sqrt{\rho \Delta p_{liner}} l^2 = \sqrt{\frac{p_3}{R T_3}} \sqrt{\Delta p_{liner}} l^2 \\ &\propto \frac{p_3}{\sqrt{T_3}} \sqrt{\frac{\Delta p_{liner}}{p_3}} l^2 \end{aligned}$$

- FISSATI l , T_3 , $\Delta p_{liner} / p_3 \rightarrow \dot{m}_{mix} \propto p_3$

$$\Rightarrow t_m \propto \frac{1}{p_3}$$

3.3.6 TEMPO CHIMICO CARATTERISTICO

- INVERSAMENTE PROPORZIONALE AL *TASSO DI REAZIONE* w_i (P. ES., kg/s DI COMBUSTIBILE CHE BRUCIANO)
- MAGGIOR PARTE REAZIONI HANNO MOLECOLARITÀ $m_k = 2$
- SE LA CINETICA CHIMICA È CONTROLLANTE → TERMINE *BACKWARD* \simeq TRASCURABILE

$$w_i = \mathcal{M}_i \sum_{k=1}^M \Delta \nu_{i,k} \rho^{m_k} B_k T^{\alpha_k} \exp\left(-\frac{E_k}{\mathcal{R}T}\right) \prod_{j=1}^N \left(\frac{Y_j}{\mathcal{M}_j}\right)^{\nu'_{j,k}}$$

- FISSATE TEMPERATURE E CONCENTRAZIONI →

$$w_i \propto \rho^2 \propto p_3^2$$

- DATI SPERIMENTALI: $w_i \propto p_3^{1,75} \div p_3^{1,8}$

$$\implies t_c \propto \frac{1}{p_3^{1,75}}$$

3.3.7 ANDAMENTO DI t_c , t_m AL VARIARE DELLA PRESSIONE p_3

- TIPICAMENTE PER $p_3 < 100$ kPa: $t_c \gg t_m, t_e$
- TIPICAMENTE PER $p_3 > 300$ kPa: $t_m \gg t_c, t_e$
- PER 100 kPa $\leq p_3 \leq 300$ kPa: $t_c \sim t_m \gg t_e$

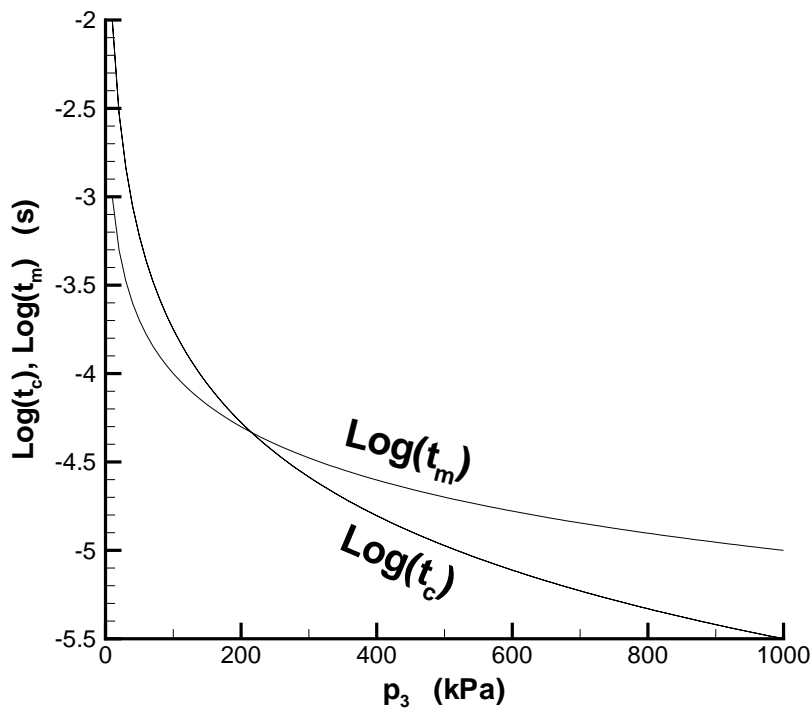


Figure 43: Andamento tipico del tempo chimico caratteristico e del tempo di miscelamento, in funzione della pressione in camera.

3.3.8 ANDAMENTO TEORICO DI η_b AL VARIARE DI $p_3^{1,75}$

- DATO $t_s \rightarrow$

$$\eta_b \propto \frac{1}{\max(t_e, t_m, t_c)}$$
- GRAFICANDO η_b IN FUNZIONE DI $p_3^{1,75} \rightarrow$
 TRATTO RETTILINEO PER $p_3 < 100$ kPa,
 CURVA $\propto p_3 = (p_3^{1,75})^{1/1,75} = (p_3^{1,75})^{0,57}$ PER $p_3 > 300$ kPa
- $p_3^{1,75}$ PARAMETRO DI CARICO θ (PUÒ ANCHE INCLUDERE DIPENDENZA DA T_3, \dot{m}_a , DIMENSIONI)

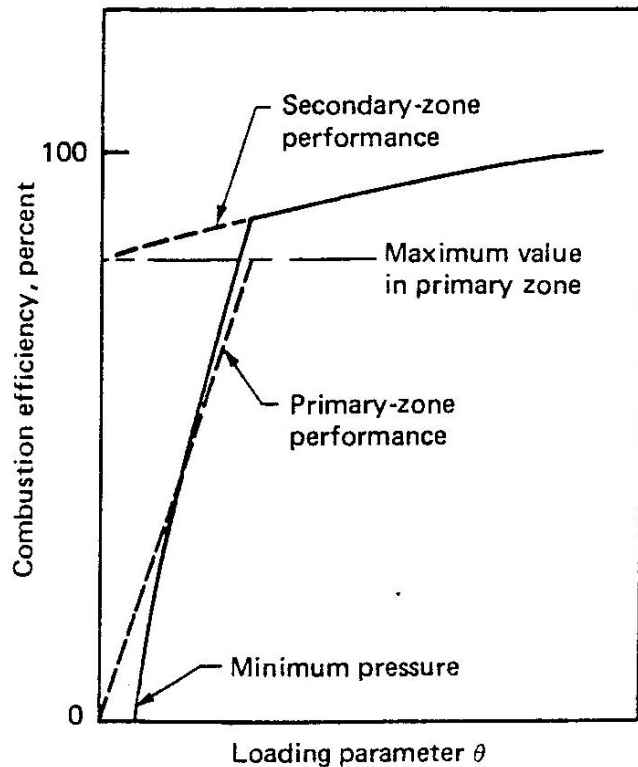


Figure 44: Curva teorica del rendimento di combustione.

- MA LA CURVA EFFETTIVA NON SCENDE FINO A $p_3 = 0$

3.3.9 ANDAMENTO EFFETTIVO DI η_b AL VARIARE DI θ

- LA CURVA EFFETTIVA NON SCENDE FINO A $p_3 = 0$ PER:
 - LIMITI INFIAMMABILITÀ
 - SCAMBIO TERMICO (MAGGIOR PESO A BASSE p_3)
 - ATOMIZZAZIONE (t_e PIÙ LUNGHI A BASSE p_3)
- DIFFICOLTÀ DI RIACCENSIONE IN QUOTA

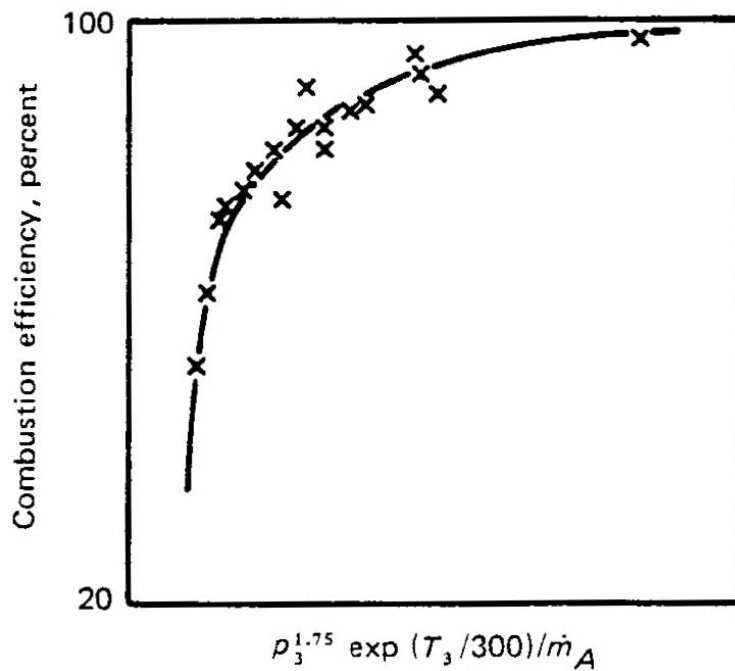


Figure 45: Curva effettiva del rendimento di combustione.

3.3.10 PER AVERE ALTO η_b

- *LINER* LUNGO (MA AUMENTA IL PESO...)
 - RIDURRE LA QUANTITÀ DI ARIA USATA PER IL RAFFREDDAMENTO DELLE PARETI (IL COMBUSTIBILE NON BRUCIA COMPLETAMENTE A BASSE T)
- RAFFREDDAMENTO PER TRASPIRAZIONE

3.4.1 CAMERE DI COMBUSTIONE: COMBUSTIBILI

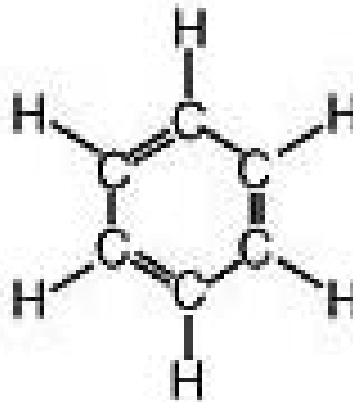
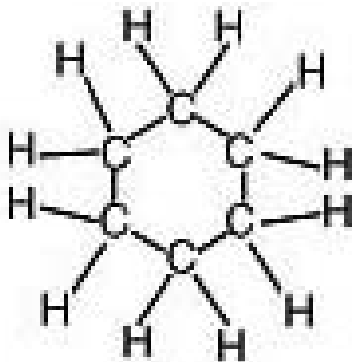
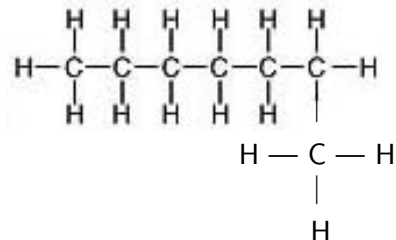
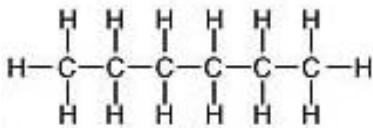
- ORIGINE DEI COMBUSTIBILI FOSSILI:
- REAZIONE DI FOTOSINTESI



- $(\text{CH}_2\text{O})_n$ CARBOIDRATI:
 - CELLULOSA
 - ZUCCHERI
- CONVERTITI IN GRASSI $(\text{CH}_2)_n\text{O}_m$ DA PIANTE (SEMI) ED ANIMALI
- $m \ll n \rightarrow (\text{CH}_2)_n\text{O}_m \sim (\text{CH}_2)_n, \text{H/C} \sim 2$

3.4.2 CLASSIFICAZIONE DEGLI IDROCARBURI

1. PARAFFINE (ALIFATICI) C_nH_{2n+2} (METANO CH_4 , ETANO C_2H_6 , PROPANO C_3H_8 , n -BUTANO C_4H_{10} , ..., n -EPTANO C_7H_{16} , n -OTTANO C_8H_{18} , ..., n -DECANO $C_{10}H_{22}$, ...)
2. ISOPARAFFINE (ISOALIFATICI) C_nH_{2n+2} , $n \geq 3$ (i -BUTANO C_4H_{10} , ...)
3. CICLOPARAFFINE (CICLOALIFATICI, NAFTENI) C_nH_{2n} (CICLOPROPANO C_3H_6 , ...)
4. AROMATICI C_nH_{2n-6} (BENZENE C_6H_6 , TOLUOLO C_7H_8 , ...)



3.4.3 COMPOSIZIONE TIPICA DEL CHEROSENE

- DIPENDE DALLA FONTE DI APPROVVIGIONAMENTO, E DAL TRATTAMENTO:
 - * 35 – 45% PARAFFINE (ALTO H/C, NO *COKE*, POCO *SOOT*)
 - * 35 – 45% CICLOPARAFFINE (ALTO H/C, NO *COKE*, POCO *SOOT*)
 - * < 22 – 25% AROMATICI (RIDOTTO H/C, MOLTO *SOOT*, IGROSCOPICI, SOLVENTI SU GOMMA)

3.4.4 PROPRIETÀ DI ALCUNI IDROCARBURI

	MASSA MOLARE	CALORE VAPORIZ	POTERE CALORIF	MISCELA STECH	LIMITI COMBUST	TEMP IGNIZ STECH	TEMP ADIAB FIAMMA STECH
	kg/kmol	MJ/kg	MJ/kg	vol %	% STECH	C	K
METANO CH ₄	16,0	0,509	50	9,48	46 – 164	900	2232
<i>n</i> -BUTANO C ₄ H ₁₀	58,1	0,386	45,7	3,12	54 – 330	700	2238
TOLUOLO C ₇ H ₈	92,1	0,363	40,9	2,27	43 – 322	840	2327
<i>n</i> -OTTANO C ₈ H ₁₈	114,2	0,300	44,8	1,65	51 – 425	510	2279
<i>n</i> -DECANO C ₁₀ H ₂₂	142,3	0,277	44,6	1,33	45 – 356	495	2269



⇒ RAPPORTI H/C BASSI ↔ BASSO Q_f

3.4.5 CONTAMINANTI DEL COMBUSTIBILE

- GOMME
- ACQUA
- ZOLFO
- SODIO
- VANADIO
- (SEDIMENTI)
- (CENERI)

3.4.6 ADDITIVI

- PREVENZIONE GOMME
- ANTIRUGGINE
- ANTIGHIACCIO
- ANTISTATICI
- LUBRIFICANTI
- BIOCIDI
- (ANTIFUMO)

3.4.7 COMBUSTIBILI PER AVIAZIONE

- SPECIFICHE: PUNTO DI CONGELAMENTO, *FLASH POINT*, VOLATILITÀ, FLUIDITÀ, CORROSIVITÀ, STABILITÀ, CONTENUTO DI CONTAMINANTI, ...
- JET-A1, JP-5, JP-8 (CHEROSENE)

COMBUSTIBILE	IMPIEGO	CONGELAMENTO	FLASH
JET-A	USA	-40 C	38 C
JET-A1	INTERNAZIONALE	-47 C	38 C
JP-5	PORTAEREI	-46 C	60 C
JP-6	XB-70	-54 C	...
JP-7	SR-71	-43 C	60 C
JP-8	MILITARE	-47 C	38 C

- JET-B, JP-4 (MISCELA BENZINA-CHEROSENE; IN FASE DI SOSTITUZIONE)

COMBUSTIBILE	IMPIEGO	CONGELAMENTO	FLASH
JET-B	CANADA, ALASKA	-51 C	(-29 C)
JP-4	MILITARE	-72 C	(-29 C)

4.1 FORMAZIONE DI INQUINANTI E CONTROLLO DELLE EMISSIONI

- INQUINAMENTO:
 - PRESSO AEROPORTI
 - DA EMISSIONI NELLA STRATOSFERA
- FUMO (*SOOT* – PARTICOLATO)
- UHC, VOC
- SO_x
- NO_x
- CO
- CO₂, H₂O (CONTAMINANTI)

4.2 STRATEGIE PER IL CONTROLLO DELLE EMISSIONI

- CONTROLLO (IN GENERALE):
 - PRE-TRATTAMENTO COMBUSTIBILE
 - MODIFICA DEL PROCESSO DI COMBUSTIONE
 - POST-TRATTAMENTO FUMI

- (DISPERSIONE)

4.3.1 PARTICOLATO

- TERMINOLOGIA:
 - AEROSOL (GENERALE, LIQUIDO O SOLIDO DISPERSO IN ATMOSFERA)
 - POLVERI (PART. SOLIDE DA MACINAZIONE/FRANTUMAZIONE)
 - FUMO (PARTICELLE SOLIDE DA CONDENSAZIONE DI VAPORI. SE CARBONIO → *SOOT*)
 - NEBBIE (PARTICELLE LIQUIDE SOSPESE IN ATMOSFERA)
 - SMOG (PART. DI DIAMETRO ~ LUNGHEZZA D'ONDA LUCE)
- PARTICOLATI PRODOTTI DI COMBUSTIONE PRIMARI:
 - *SOOT*
 - CENERI (NELLA COMBUSTIONE DI CARBONE: OSSIDI DI Si, Ca, Al + TRACCE ALTRI MINERALI)
- PARTICOLATI SECONDARI (PRODOTTI DA REAZIONI IN ATMOSFERA):
 - SMOG

4.3.2 PARTICELLE PRIMARIE E SECONDARIE

- PRIMARIE:
 - CARBONE POLVERIZZATO (50 – 150 μm)
 - SOOT ($\sim 1 \mu\text{m}$, PRODOTTO NELLA COMBUSTIONE DI HC):
 - * PARTICOLATO (PIENO)
 - * CENOSFERE (VUOTE)
 - CENERI (COMBUSTIONE DEL CARBONE) VOLANTI, DI FONDO
- SECONDARIE:
 - FORMATE IN PRESENZA DI HC, NO_x, SO_x, NH₃

4.3.3 DIMENSIONI E CARATTERISTICHE DELLE PARTICELLE IN SOSPENSIONE

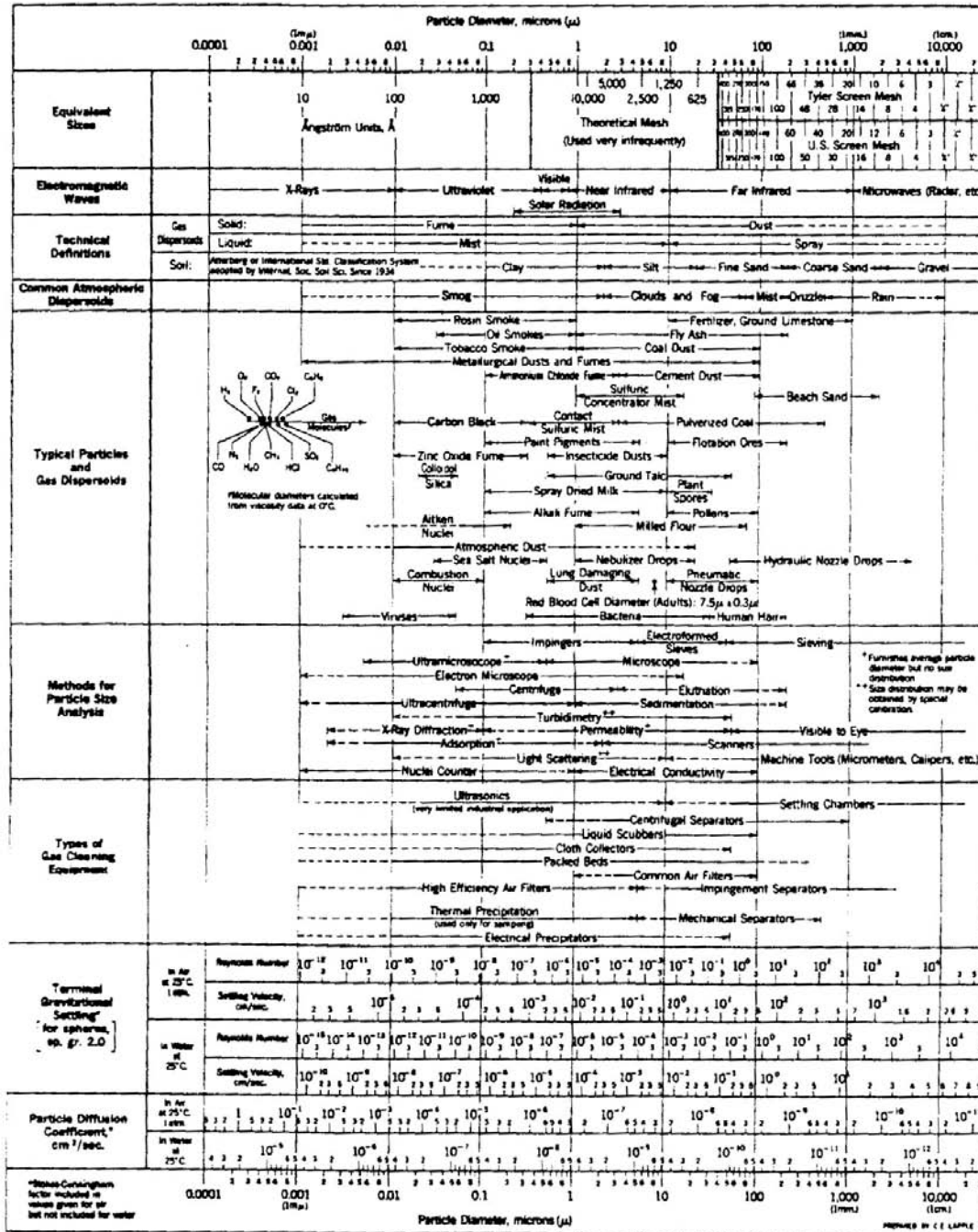


Figure 47: Dimensioni e caratteristiche delle particelle sospese.

4.3.4 PARTICELLE FINI

- PM10: PARTICELLE DI DIAMETRO $< 10 \mu\text{m}$ (STANDARD 1987)
- PM2,5: PARTICELLE DI DIAMETRO $< 2,5 \mu\text{m}$ (STANDARD 1997, PIÙ RAPPRESENTATIVO)
- PARTICELLE DI DIAMETRO $> 10 \mu\text{m}$
FILTRATE DA NASO E GOLA
- PARTICELLE DI DIAMETRO $5 - 10 \mu\text{m}$
RIMOSSE DA TRACHEA E BRONCHI
- PARTICELLE INALABILI: DIAMETRO $< 10 \mu\text{m}$
- PARTICELLE RESPIRABILI: DIAMETRO $< 3,5 \mu\text{m}$
- PARTICELLE FINI: DIAMETRO $< 2,5 \mu\text{m}$
- PARTICELLE DANNOSE PER I POLMONI:
DIAMETRO $0,5 - 5 \mu\text{m}$
- LA MAGGIOR PARTE DELLE PARTICELLE FINI NELL'ARIA SONO SECONDARIE

4.3.5 SOOT

- VISIBILE COME FUMO
- SI FORMA NELLA COMBUSTIONE DI TUTTI GLI HC
- PARTICELLE SOLIDE CONTENENTI C ($\sim 96\%$ IM MASSA), H,O
- RENDE LA FIAMMA GIALLA E BRILLANTE (RADIAZIONE)
- RAPPRESENTA UN INCOMBUSTO

4.3.6 FORMAZIONE DEL *SOOT*

- FORMAZIONE FAVORITA IN PRESENZA DI HC CON BASSO RAPPORTO H/C (AROMATICI)
 - PARAFFINE:
 1. IDROCARBURO SI SPEZZA FINO A FORMARE CH, CHE POI POLIMERIZZA FORMANDO ACETILENE $C_2H_2 \rightarrow SOOTING$
 - HC AROMATICI:
 1. (COME SOPRA)
 2. ANELLI AROMATICI CONDENSANO IN UNA STRUTTURA TIPO GRAFITE
 - *D* PRIME PARTICELLE ~ 1 nm, SUCCESSIVA AGGLOMERAZIONE FINO A $\sim 1 \mu m$
 - ACCRESCIMENTO CONTRASTATO DA OSSIDAZIONE DA O_2 ED OH (ANCHE O, H_2O , CO_2)
- MAGGIOR PARTE DEL *SOOT* SI FORMA NELLA ZONA PRIMARIA, POI CONSUMATO NELLE ZONE INTERMEDIA E DI DILUIZIONE
- FORMAZIONE COMUNQUE DOMINATA PIÙ DA PROCESSI FISICI (ATOMIZZAZIONE, MISCELAMENTO) CHE CHIMICI
 - (IL METANO CH_4 FORMA MOLTO POCO *SOOT*)

4.3.7 EFFETTO DI φ , p SU CONVERSIONE C \rightarrow SOOT

- SOOT SI FORMA SOLO PER $\varphi > 1,2 - 1,3$, E PER $p_3 > 0,6$ MPa
- SEMPRE PRESENTE IN COMBUSTIONE NONPREMISCELATA ($0 \leq \varphi_{locale} \leq \infty$)
- TEORICAMENTE ELIMINABILE DEL TUTTO IN COMBUSTIONE PREMISCELATA...
- ... MA IN PRATICA IN TURBINE A GAS SI PUÒ ARRIVARE SOLO A COMBUSTIONE *PARZIALMENTE* PREMISCELATA

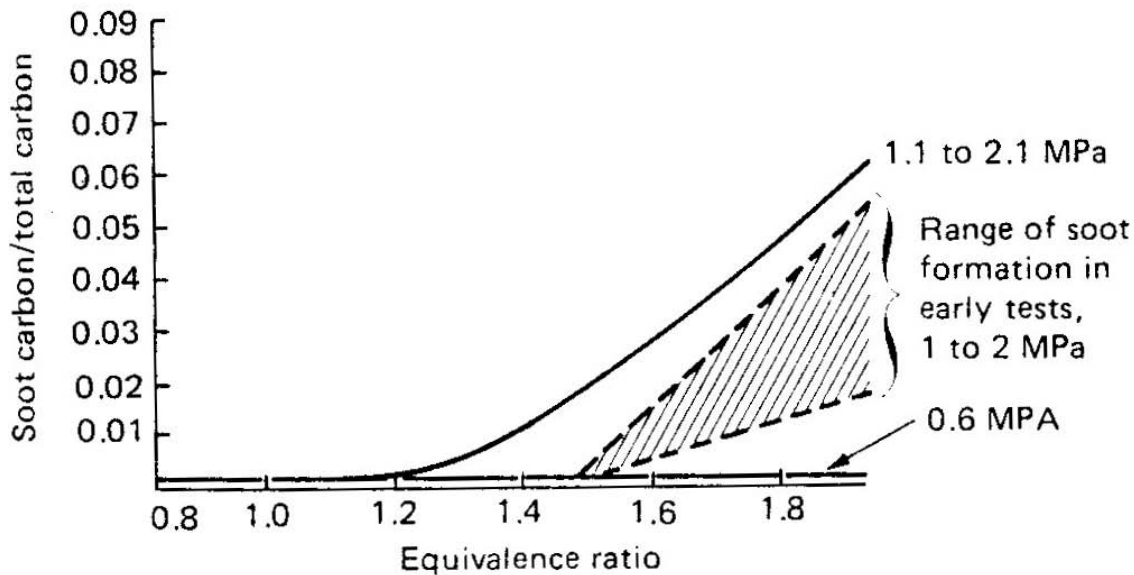


Figure 48: Formazione di soot in combustione premiscelata cherosene/aria.

4.3.8 EFFETTO DI p SU EMISSIONI DI FUMO

- ALL'AUMENTARE DI p_3 SI ALLARGANO I LIMITI DI INFIAMMABILITÀ → COMBUSTIONE POSSIBILE ANCHE PER $\varphi \gg 1$ → *SOOTING*
- NEGLI INIETTORI *PRESSURE-SWIRL*, SI RIDUCE L'APERTURA DEL CONO DELLO SPRAY (φ LOCALMENTE PIÙ ALTO)
- INIETTORI *AIRBLAST* MENO SENSIBILI (E COMUNQUE PRODUCONO MENO *SOOT*)

• ...

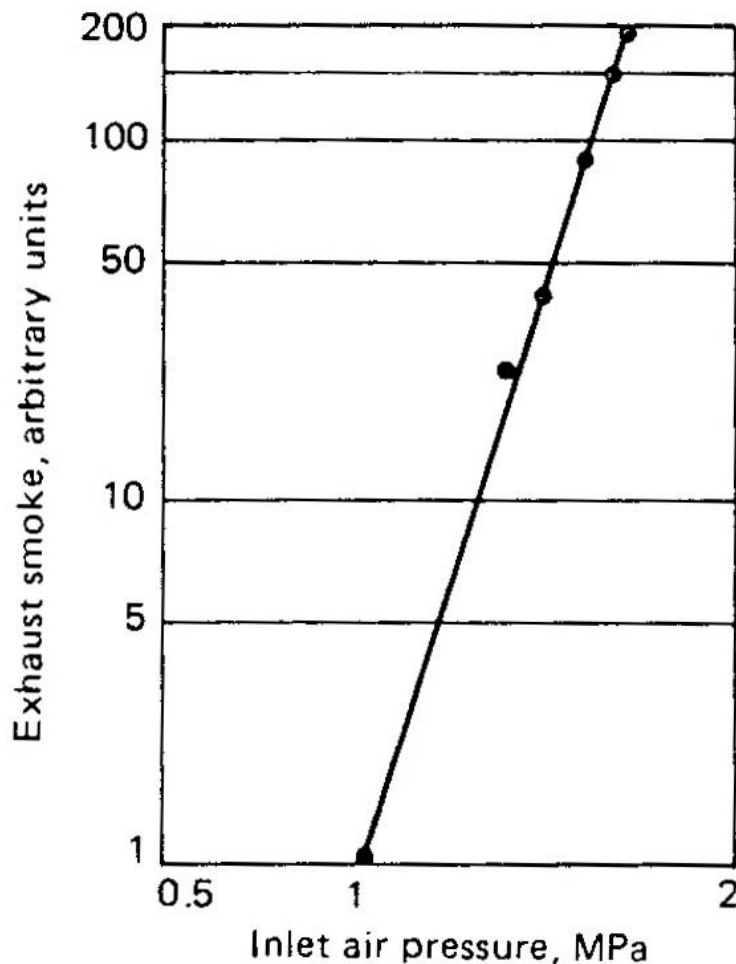


Figure 49: Effetto di p_3 sulle emissioni di fumo.

4.3.9 CONTROLLO DEL PARTICOLATO PRIMARIO

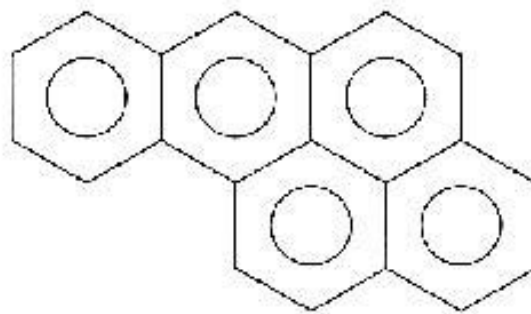
- RIMOZIONE (IN IMPIANTI DI TERRA)
 - MODIFICA DEL PROCESSO DI COMBUSTIONE (φ)
- INTERAZIONE CON EMISSIONI NO_x E CO
- MIGLIORE ATOMIZZAZIONE:
 - SE D_d PICCOLO, COMBUSTIONE LOCALMENTE \sim PREMISCELATA
 - SE D_d GRANDE, COMBUSTIONE LOCALMENTE COMUNQUE NONPREMISCELATA

4.3.10 RIMOZIONE DEL PARTICOLATO PRIMARIO

- IN IMPIANTI DI TERRA:
 - CAMERE DI SEDIMENTAZIONE (GRAVITÀ)
 - CICLONI (FORZA CENTRIFUGA)
 - PRECIPITATORI ELETTROSTATICI (ESP – FORZA ELETTROSTATICA)
 - FILTRI A MANICA
 - TORRI DI LAVAGGIO
 - *SCRUBBER* VENTURI
- EFFICIENZA FUNZIONE DEL DIAMETRO DELLE PARTICELLE

4.4.1 COMPOSTI ORGANICI VOLATILI (COV/VOC)

- LIQUIDI O SOLIDI VOLATILI CONTENENTI CARBONIO ORGANICO (C LEGATO A C, H, N, S – NON CaCO_3 , CaC_2 , CO, CO_2)
- ALCUNI TOSSICI E CANCEROGENI (BENZENE C_6H_6 , IPA/PAH), MA PER LO PIÙ NON, O POCO TOSSICI
- PARTECIPANO ALLA FORMAZIONE DI OZONO TROPOSFERICO, SMOG/PARTICOLATO SECONDARIO (FINE)
- ALCUNI COV CONTRIBUISCONO ALL'EFFETTO SERRA
- IL METANO CH_4 È RELATIVAMENTE POCO REATTIVO → NMVOCs (NON-METHANE VOCs)
- FONTI PRINCIPALI: SOLVENTI E VEICOLI A MOTORE
- IPA/PAH IDROCARBURI POLICICLICI AROMATICI



Benzopyrene

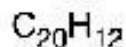
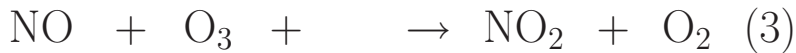
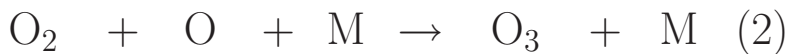
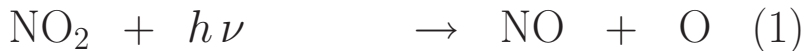


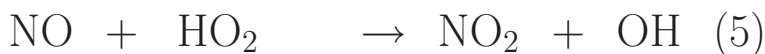
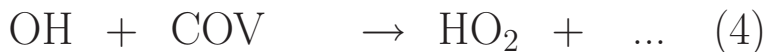
Figure 50: Struttura del benzopirene, esempio di IPA.

4.4.2 FORMAZIONE DI OZONO TROPOSFERICO

- NO EMESSO DAI MOTORI SI OSSIDA A NO₂ IN ATMOSFERA
- SOTTO L'EFFETTO DI UN FOTONE DI FREQUENZA ν (ENERGIA $h\nu$, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J · s COSTANTE DI PLANCK):



- LA REAZIONE (3) RIMUOVE NO ED OZONO
- LA REAZIONE (2) RICHIEDE UN TERZO CORPO PER SODDISFARE IL BILANCIO ENERGETICO; NELLA (1) L'ENERGIA È FORNITA DAL FOTONE
- IN PRESENZA DI COV SI AGGIUNGE ALLE PRECEDENTI UN'ALTRA SERIE DI REAZIONI CHE IN SINTESI DANNO:



- (5) RIMUOVE NO SENZA DISTRUGGERE OZONO $\rightarrow X_{\text{O}_3}$ SALE
- SE INFATTI IN PRIMA APPROSSIMAZIONE SI ASSUME LA (3) IN EQUILIBRIO:

$$K_{p,3}(T) = \frac{p_{\text{NO}_2} p_{\text{O}_2}}{p_{\text{NO}} p_{\text{O}_3}} = \frac{X_{\text{NO}_2} X_{\text{O}_2}}{X_{\text{NO}} X_{\text{O}_3}}$$

- X_{NO_2} SALE, X_{NO} SCENDE, $X_{\text{O}_2} \simeq \text{cost} \rightarrow X_{\text{O}_3}$ SALE

4.4.3 FORMAZIONE DI PARTICOLATO SECONDARIO

- PER EFFETTO DELLA PRESENZA DI NO_x , SO_x , COV, NH_3
- NH_3 DERIVA DA FONTI BIOLOGICHE (ALLEVAMENTO, AGRICOLTURA)
- IN PRESENZA DI UMIDITÀ ATMOSFERICA:
 $\text{NO}_2 \rightarrow \text{HNO}_3$, $\text{SO}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$
- IN PRESENZA DI $\text{NH}_3 \rightarrow$
 NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ IN FASE CONDENSATA
- IN MODO SIMILE, L'OSSIDAZIONE DEI COV NELL'ATMOSFERA PORTA ALLA FORMAZIONE DI SPECIE MENO VOLATILI, CHE QUINDI CONDENSANO

4.4.4 PRESSIONE DI VAPORE COMPORTAMENTO IN RECIPIENTE APERTO

- $p_v > p_{atm} \rightarrow$ EBOLLIZIONE VIGOROSA, RAFFREDDANDOSI FINO AD UNA $T : p_v(T) = p_{atm}$
- $p_v = p_{atm} \rightarrow$ EBOLLIZIONE, CON TASSO DIPENDENTE DAL CALORE FORNITO
- $p_v < p_{atm} \rightarrow$ LENTA EVAPORAZIONE

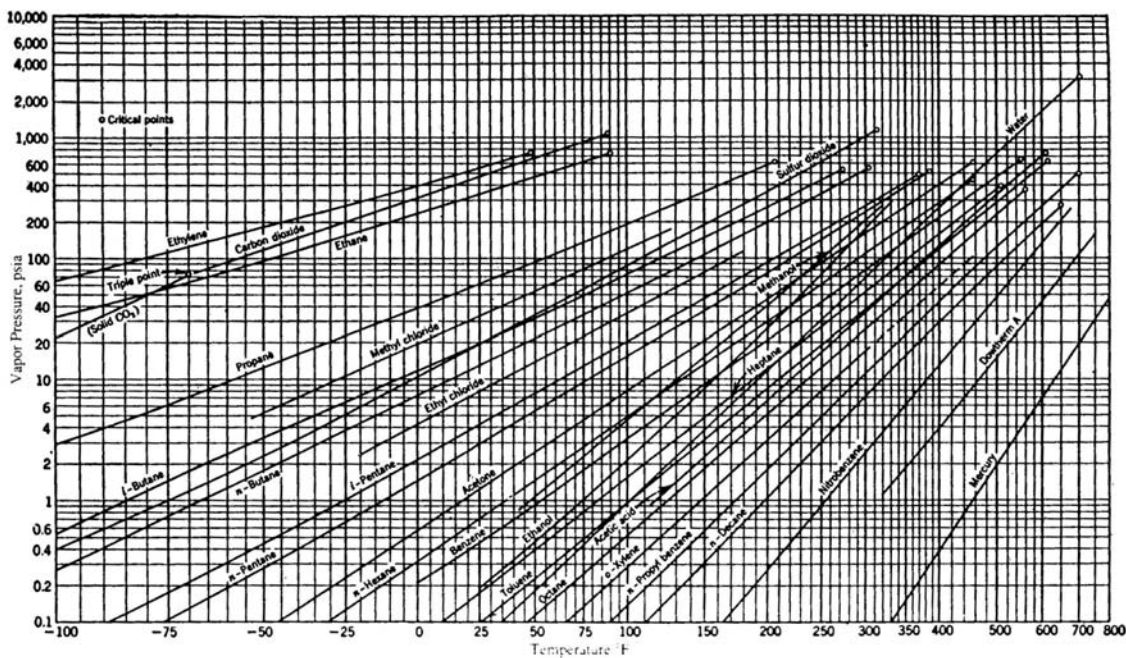


Figure 51: Pressione di vapore di diverse specie chimiche in funzione della temperatura; 1 psia = 6,9 kPa; $T(C) = 5 \cdot [T(F)-32]/9$.

4.4.5 COMPORTAMENTO IN RECIPIENTE CHIUSO

- LIQUIDO VOLATILE EVAPORA FINCHÉ LA SUA PRESSIONE PARZIALE p_i EGUAGLIA $p_v(T)$
- $p_i = X_i p$
- SE T SALE, p_i SALE (QUINDI ANCHE p)

4.4.6 COMPORTAMENTO DI ALCUNI COV

- ETANO C_2H_6 , PROPANO C_3H_8 , *n*-BUTANO C_4H_{10} :

$$p_v(T_{\text{ambiente}}) > p_{\text{atm}}$$

- [Cd, Zn, As, Sb:

$p_v(T_{\text{inceneritore}}) \sim p_{\text{atm}} \rightarrow$ SUCCESSIVA CONDENSAZIONE IN PARTICELLE TOSSICHE FINI]

4.4.7 DEFINIZIONE DI COV

- LIQUIDI/SOLIDI ORGANICI TALI CHE:
 $p_v(T_{\text{ambiente}}) \geq 0,0007 \text{ atm}, T_{eb} < 260 \text{ C}$
- MAGGIOR PARTE DEI COMPOSTI ORGANICI CON MENO DI 12 ATOMI C

4.4.8 PERDITE DI RIEMPIMENTO, RESPIRAZIONE, SVUOTAMENTO

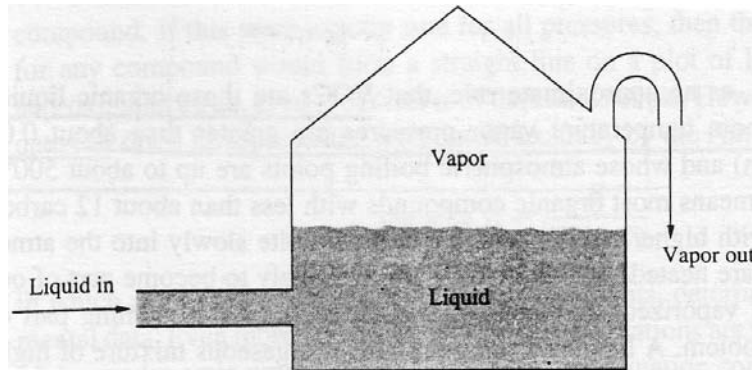


Figure 52: Meccanismo delle perdite di riempimento.

- SERBATOIO VENTILATO PER EVITARE SOVRA/SOTTOPRESSIONI
- PERDITE DI RESPIRAZIONE LEGATE A VARIAZIONI DI T_{ambiente}
- VALVOLE DI RITENZIONE DEI VAPORI
(SOPPORTANO $-0,043 < \Delta p < 0,034$ atm)

4.4.9 SERBATOI A TETTO FLUTTUANTE

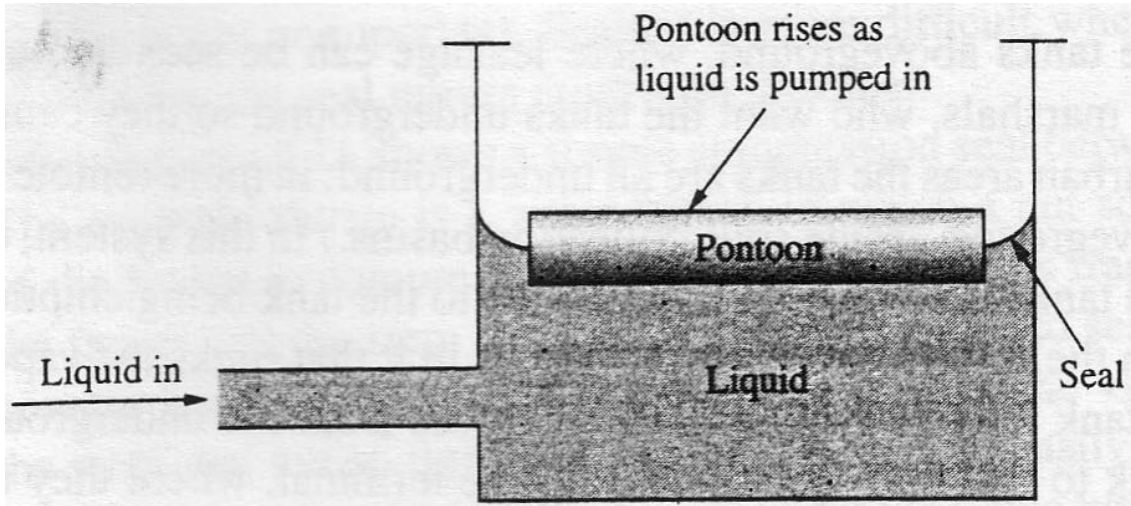


Figure 53: Serbatoio a tetto flottante.

4.5.1 OSSIDI DI ZOLFO (SO_x)

- IRRITANTI RESPIRATORI
- FORMANO PARTICELLE SECONDARIE
- CAUSANO PIOGGE ACIDE
- INNALZANO IL PUNTO DI RUGIADA DEI FUMI

4.5.2 CHIMICA DELLO ZOLFO

- OSSIDAZIONE S (OSSIGENO ATMOSFERICO) $\rightarrow \text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_3$
 - + UMIDITÀ ATMOSFERICA $\rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$
 - + AMMONIACA ATMOSFERICA \rightarrow PARTICELLE DI SOLFATI
($0.1 - 1 \mu\text{m} \rightarrow$ SCATTERING)
- RIDUZIONE S (IDROGENO) $\rightarrow \text{H}_2\text{S}$
- CONCENTRAZIONI IN ATMOSFERA NON INQUINATA:
 - ANIDRIDE SOLFOROSA SO_2 0.2 ppb
 - AMMONIACA NH_3 10 ppb

4.5.3 FLUSSI DI ZOLFO DA ATTIVITÀ UMANE

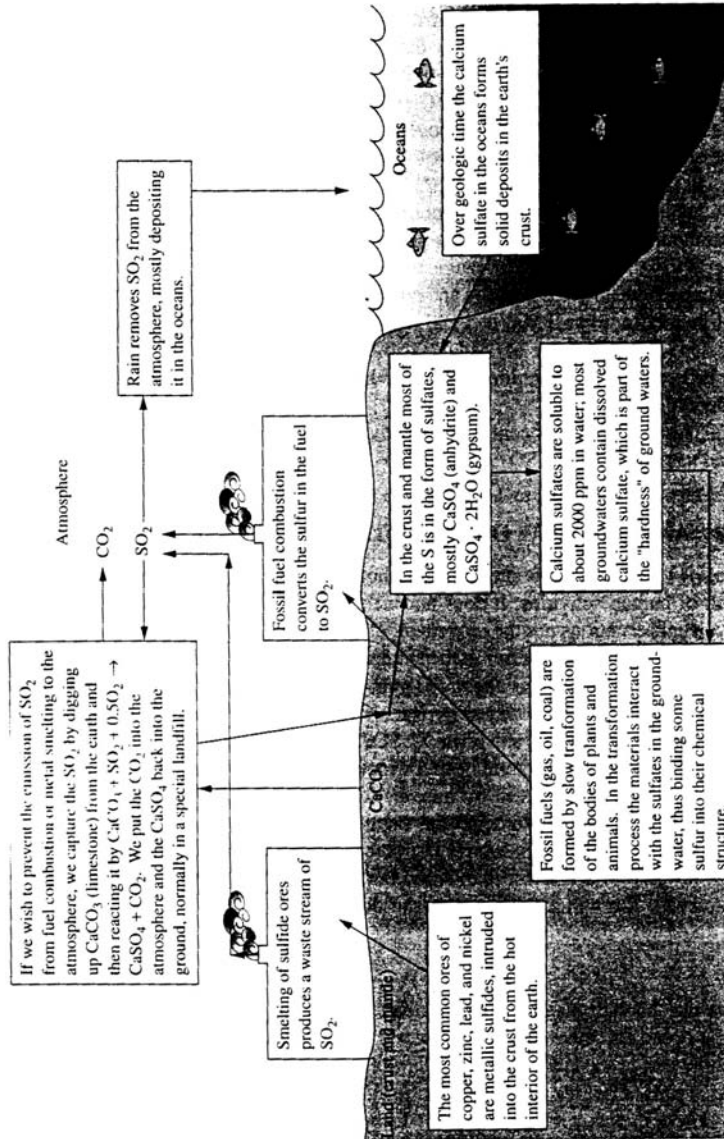


Figure 54: Flussi di zolfo da attività umane (con esclusione quindi di eruzioni vulcaniche e crescita/decadimento delle piante).

4.5.4 FONTI DI EMISSIONE

- COMBUSTIBILI:

- LEGNA $\sim 0.1\%$ S
- BENZINA $\sim 0.03\%$ S
- OLIO PESANTE $\sim 0.5\text{--}1\%$ S
- CARBONE $\sim 0.5\text{--}3\%$ S

- TRATTAMENTO DI MINERALI:

- CALCOPIRITE $\text{CuFeS}_2 + 2.5 \text{O}_2 \rightarrow \text{Cu} + \text{FeO} + 2 \text{SO}_2$

4.5.5 CONTROLLO EMISSIONI DI SO_x

- GRANDI IMPIANTI DI TERRA: TRATTAMENTO FUMI
- FONTI MOBILI (AUTOMOBILI, AEROPLANI, ...):
USO DI COMBUSTIBILI A BASSO TENORE DI S

4.5.6 DESOLFORAZIONE DEGLI IDROCARBURI

- IDRODESOLFORAZIONE CATALITICA
- $(\text{HC} + \text{S}) + \text{H}_2 \rightarrow \text{HC} + \text{H}_2\text{S}$
- CATALIZZATORE: Ni o Co, PROMOSSI CON Mo o W
- POI $\text{H}_2\text{S} + 0.5 \text{O}_2 \rightarrow \text{S} + \text{H}_2\text{O}$
- CONTROLLARE IL FLUSSO DI O_2 PER EVITARE REAZIONE
 $\text{H}_2\text{S} + 1.5 \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

4.6.1 OSSIDI DI AZOTO (NO_x)

- FORMANO PARTICELLE SECONDARIE ED O_3 IN PRESENZA DI HC
- CAUSANO PIOGGE ACIDE
- ATTACCANO L'OZONO STRATOSFERICO
- NO_2 IRRITANTE RESPIRATORIO (~ 1 ppb IN ARIA NON INQUINATA)
- N_2O AGENTE DI SERRA

4.6.2 FLUSSI DI AZOTO DA ATTIVITÀ UMANE

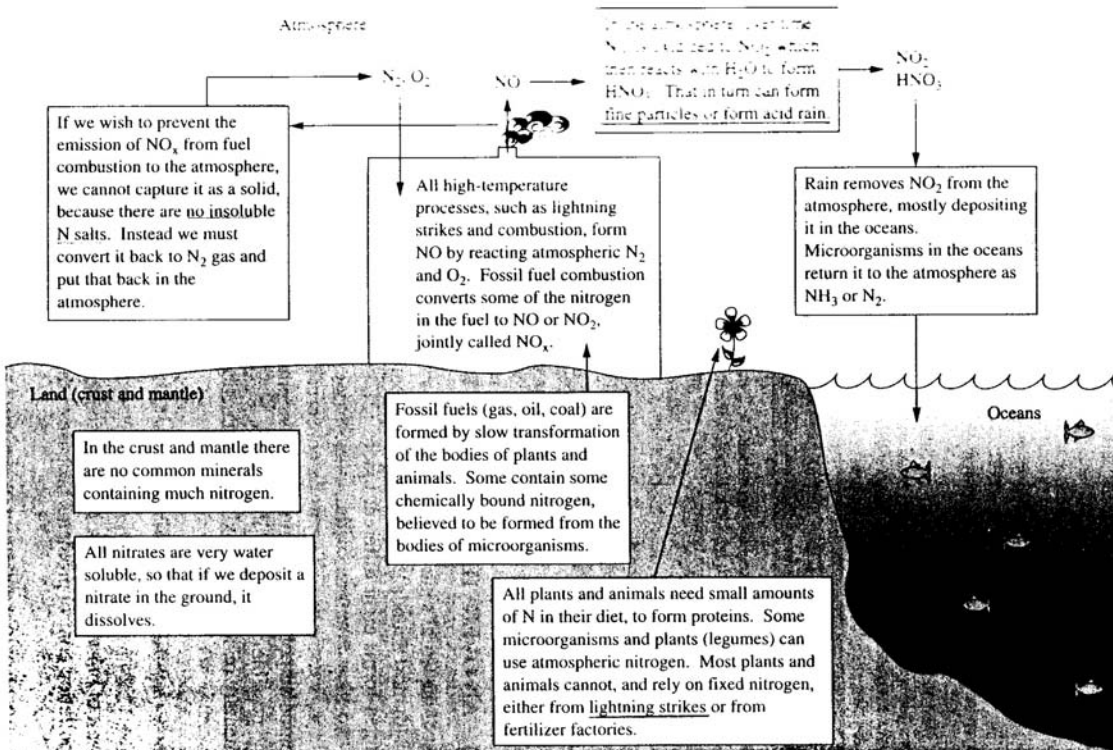


Figure 55: Flussi di azoto da attività umane.

4.6.3 FONTI DI EMISSIONE

- VEICOLI (AUTOMOBILI, AEROPLANI,...)
- COMBUSTIONE IN IMPIANTI (CARBONE IN PARTICOLARE)

4.6.4 DIFFERENZE RISPETTO A SO_x

- VEICOLI A MOTORE IMPORTANTE FONTE DI NO_x ,
MA PICCOLA DI SO_x
- SO_x FORMATO DA CONTAMINANTI, NO_x DA ATMOSFERA
(PRINCIPALMENTE)
- FORMAZIONE NO_x PUÒ ESSERE CONTROLLATA VARIANDO
 T , t , X_{O_2} (SO_x NO)

4.6.5 REAZIONI ATMOSFERICHE

- MONOSSIDO DI AZOTO NO INCOLORE, POCO DANNOSO
- BLOSSIDO DI AZOTO NO₂ BRUNO, IRRITANTE
- NO_x EMESSO COME NO, CONVERTE A NO₂ A T AMBIENTE
- SPESSO NO_x ESPRESSO COME NO₂
- $\text{NO} + \text{HC} + \text{O}_2 + \text{LUCE SOLARE} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_3$
- OZONO O₃ FORTEMENTE IRRITANTE

4.6.6 EQUILIBRIO NO/NO₂

T (K)	RAPPORTO X_{NO_2}/X_{NO}
300	300000
800	0,14
1400	0,0035

4.6.7 CONCENTRAZIONI DI EQUILIBRIO DI NO E NO₂

- CONTENUTO DI O₂ NEI PRODOTTI TIPICAMENTE ~ 10 – 15%

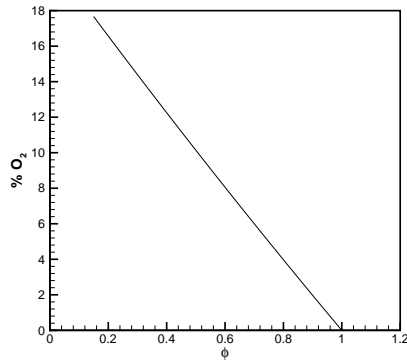


Figure 56: Percentuale di ossigeno nei prodotti di combustione cherosene/aria.

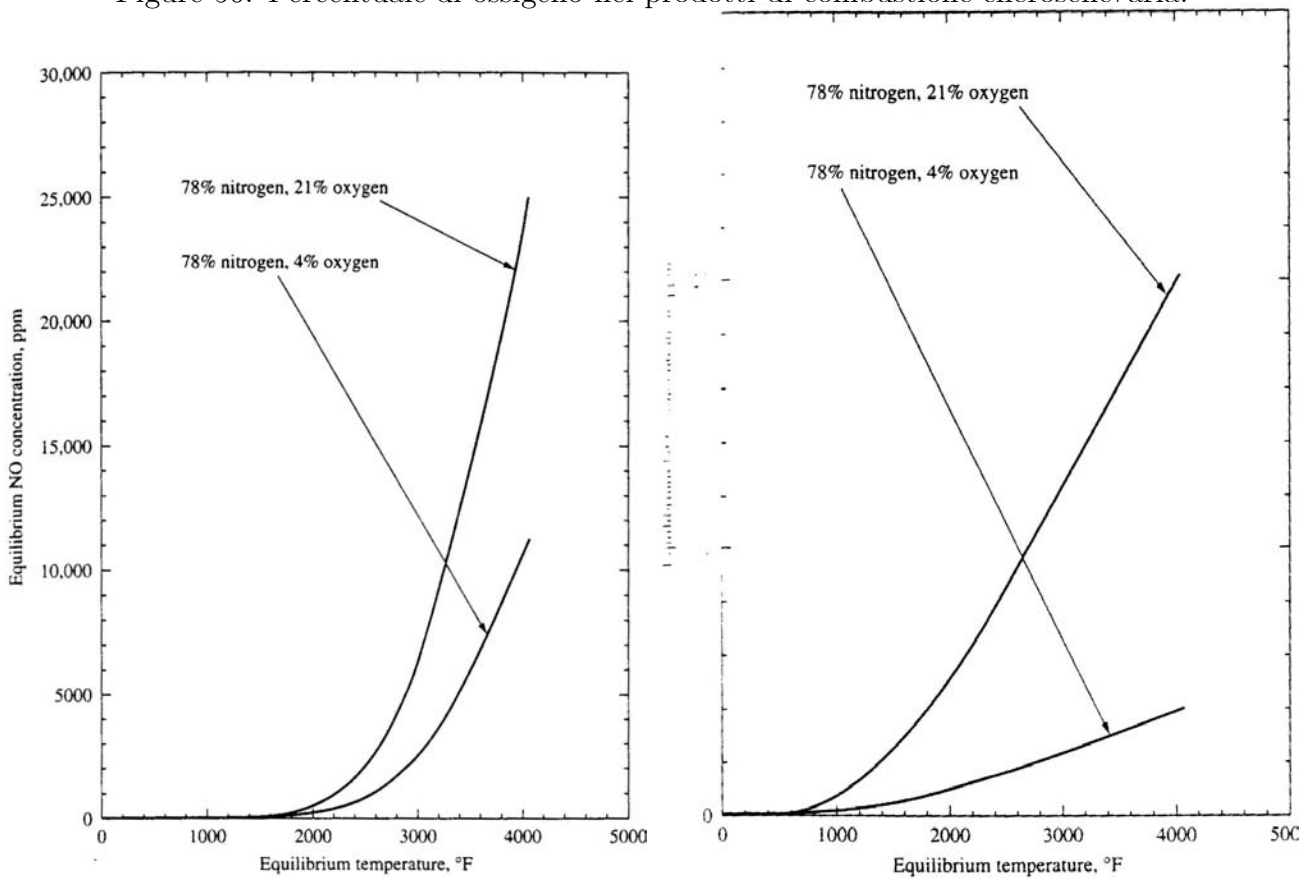
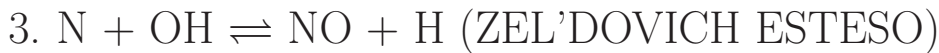
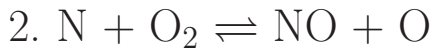
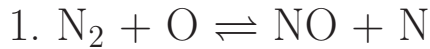


Figure 57: (sinistra) Concentrazione di equilibrio di NO (sinistra) e NO₂ (destra) per due diversi contenuti di ossigeno dei prodotti; pressione atmosferica, $T(C) = 5 \cdot [T(F)-32]/9$.

4.6.8 MECCANISMI DI FORMAZIONE DI NO_x

1. TERMICO (ZEL'DOVICH)
 2. PROMPT (FENIMORE)
 3. AZOTO LEGATO AL COMBUSTIBILE (FUEL-N)
 4. PROTOSSIDO D'AZOTO N₂O
 5. ALTRI (NNH, N₂H₃, NO₂,...)
- ESPRESSIONE CONCISA (APPROSSIMATIVA) DEL TASSO DI PRODUZIONE RICAVABILE SOLO PER MECCANISMO TERMICO

4.6.9 MECCANISMO TERMICO (ZEL'DOVICH)



- REAZIONE 1. MOLTO LENTA ($\sim 0,02$ s) \rightarrow CONTROLLANTE, NO SI FORMA A VALLE DELLA FIAMMA
- N FORMATOSI PRODUCE UN'ALTRA MOLECOLA NO ATTRAVERSO 2. OPPURE 3. (PIÙ RAPIDE)
- REAZIONE 3. MENO IMPORTANTE (CONCENTRAZIONE OH RELATIVAMENTE BASSA)
- GLOBALMENTE $N_2 + O_2 \rightleftharpoons 2 NO$; SOTTO OPPORTUNE IPOTESI:

$$w_{NO} = 2,44 \cdot 10^{10} \rho^2 \exp\left(-\frac{38370}{T}\right) Y_O Y_{N_2}$$

- w_{NO} IN $kg/(m^3 s)$, T IN K, ρ IN kg/m^3
- SE $O_2 + M \rightleftharpoons O + O + M$ IN EQUILIBRIO (M TERZO CORPO)

$$\rightarrow w_{NO} = 7,75 \cdot 10^{12} \rho^{3/2} T^{-0,0675} \exp\left(-\frac{67915}{T}\right) \sqrt{Y_{O_2}} Y_{N_2}$$

- MAX w_{NO} PER $\varphi \sim 0,8$ (T ALTA, Y_{O_2} RELATIVAMENTE ALTA)
- MA $Y_O \gg Y_{O,eq} \rightarrow$ FORMULA PRECEDENTE MOLTO PIÙ ACCURATA

4.6.10 EFFETTO DELLA TEMPERATURA

- | | |
|---|--|
| 0. $N_2 + M \rightleftharpoons 2 N + M$ | $T_k = E_k/\mathcal{R} = 114000 \text{ K}$ |
| 1. $N_2 + O \rightleftharpoons NO + N$ | $T_k = 38370 \text{ K}$ |
| 2. $N + O_2 \rightleftharpoons NO + O$ | $T_k = 3500 \text{ K}$ |
| 3. $N + OH \rightleftharpoons NO + H$ | $T_k = 69 \text{ K}$ |

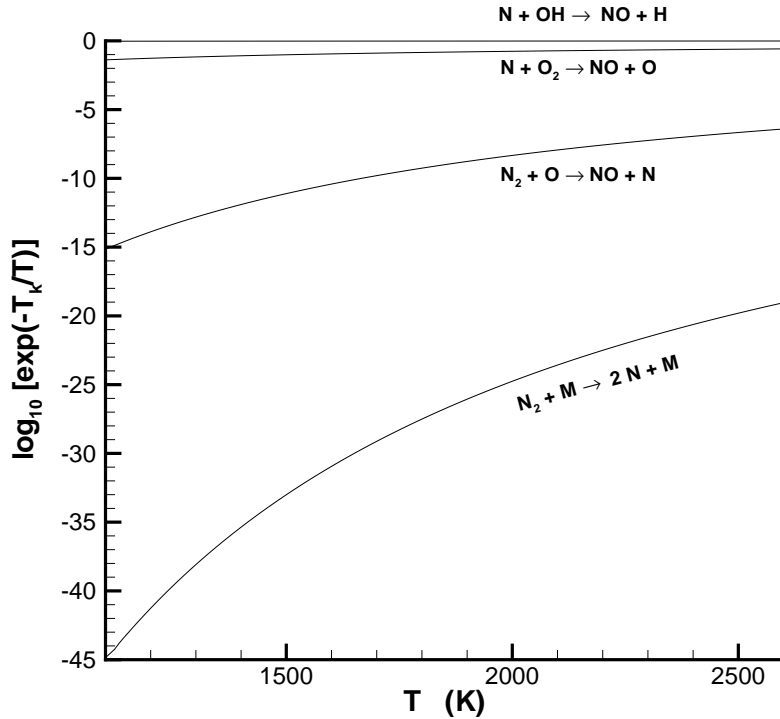
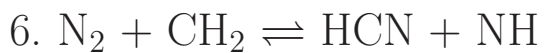
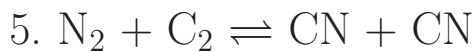
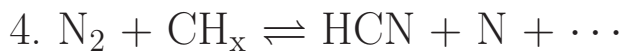
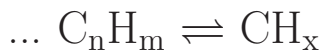


Figure 58: Effetto della temperatura sulle reazioni potenzialmente coinvolte nel meccanismo di Zel'dovich.

4.6.11 MECCANISMO PROMPT (FENIMORE)

- COINVOLGE FORMAZIONE ACIDO CIANIDRICO HCN
- IMPORTANTE IN TUTTI GLI IDROCARBURI
- RELATIVAMENTE VELOCE (NO SI FORMA NELLA ZONA DI FIAMMA)

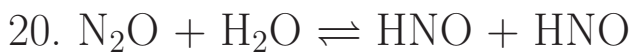
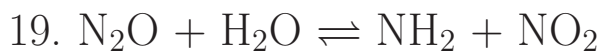
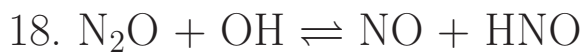
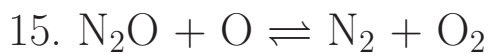
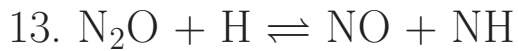
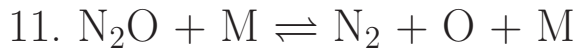


- ATTIVO IN REGIONI RICCHE
- IMPORTANTE QUANDO TERMICO È DEPRESSO
- CONTRIBUTO DECRESCHE ALL'AUMENTARE DI p

4.6.12 MECCANISMO FUEL-N

- AZOTO LEGATO IN FORMA NH_2 , NH_3
 - BENZINA E CHEROSENE CONTENGONO $< 0,06\%$ AZOTO LEGATO
 - OLII COMBUSTIBILI DA 0,5 FINO A 1,8%
 - CARBONE FINO AL 2%
 - IMPLICA FORMAZIONE DI HCN E NH_3
7. $\text{HCN} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{NO} + \dots$
8. $\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{NO} + \dots$
- IN COMPETIZIONE CON
9. $\text{HCN} + \text{NO} \rightleftharpoons \text{N}_2 + \dots$
10. $\text{NH}_3 + \text{NO}_2 \rightleftharpoons \text{N}_2 + \dots$
- PIÙ VELOCE DEL MECCANISMO TERMICO
 - TIPICAMENTE DAL 20% AL 50% DELL'AZOTO LEGATO CONVERTITO IN NO

4.6.13 MECCANISMO DEL N₂O



- PRODUZIONE DI N₂O ATTRAVERSO PASSI INVERSI DI 11, 14–16
- CONVERSIONE A NO ATTRAVERSO PASSI DIRETTI DI 12, 13, 18, 21
- AZOTO LEGATO (NH₂, NH₃) DECOMPOSTO A NH, CONVERTITO A N₂O ATTRAVERSO PASSI INVERSI DI 13, 17, 19
- CONTRIBUTO CRESCE ALL'AUMENTARE DI p
- N₂O AGENTE DI SERRA, ATTACCA L'OZONO STRATOSFERICO (LUNGA VITA MEDIA)

4.6.14 CRESCITA NO TERMICO

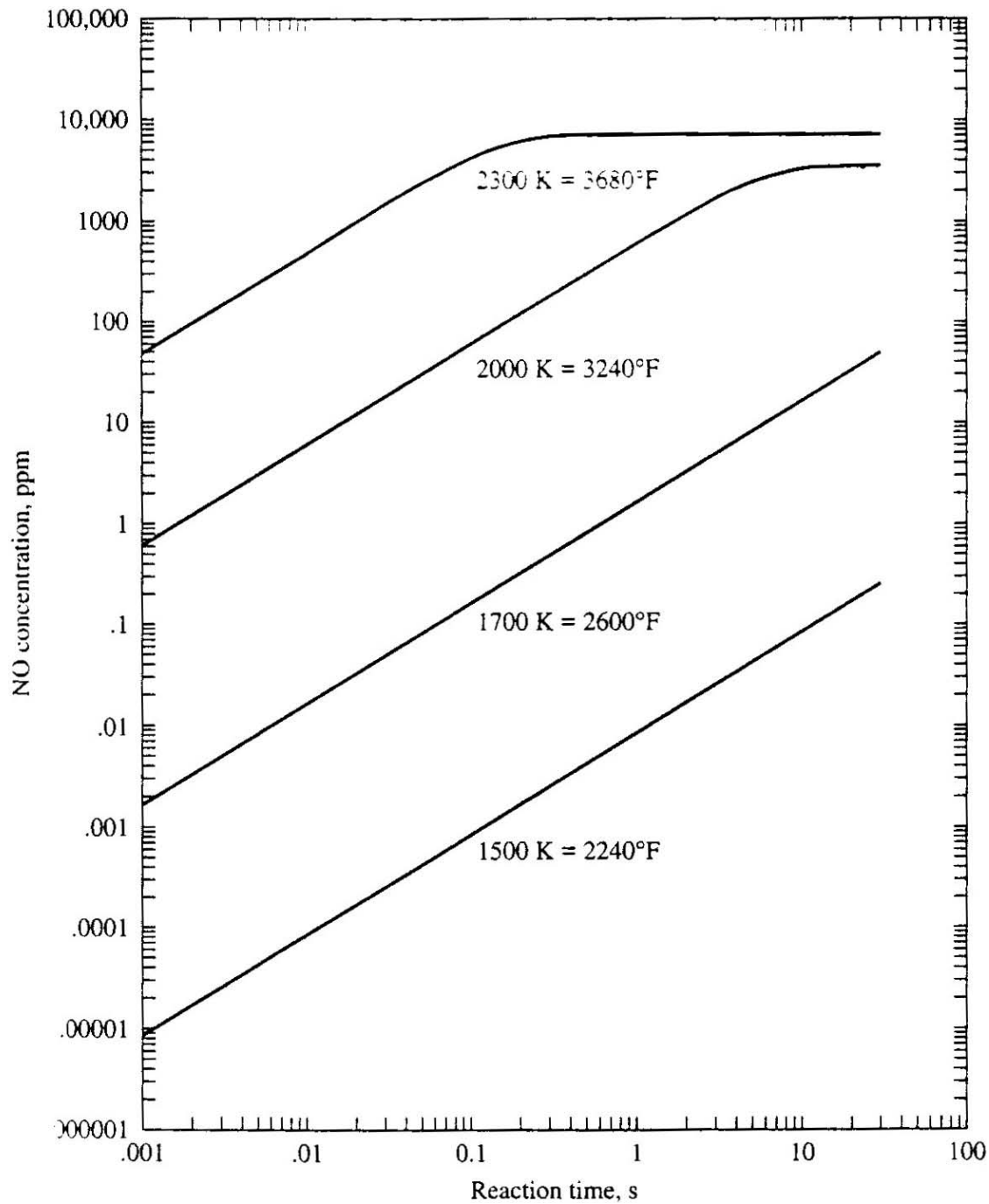


Figure 59: Crescita della concentrazione di NO termico in prodotti contenenti 78% N₂, 4% O₂, in funzione del tempo.

4.6.15 CONFRONTO NO TERMICO EQUILIBRIO/VELOCITÀ FINITA

- TASSO DI PRODUZIONE GENERALMENTE \ll EQUILIBRIO
- CONCENTRAZIONE NO RESTA 'CONGELATA' AL DIMINUIRE DI T (CAUSA CHIMICA LENTA)

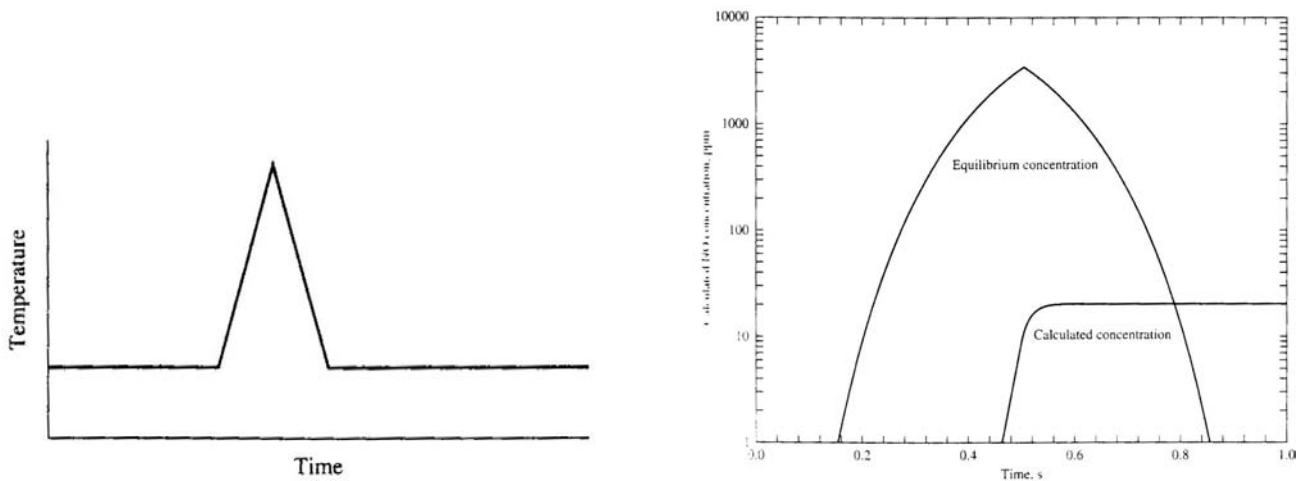


Figure 60: (sinistra) Variazione di temperatura nel tempo ipotizzata; (destra) concentrazioni di NO calcolate in equilibrio e con chimica a velocità finita.

4.6.16 COMBUSTIONE DEL CARBONE

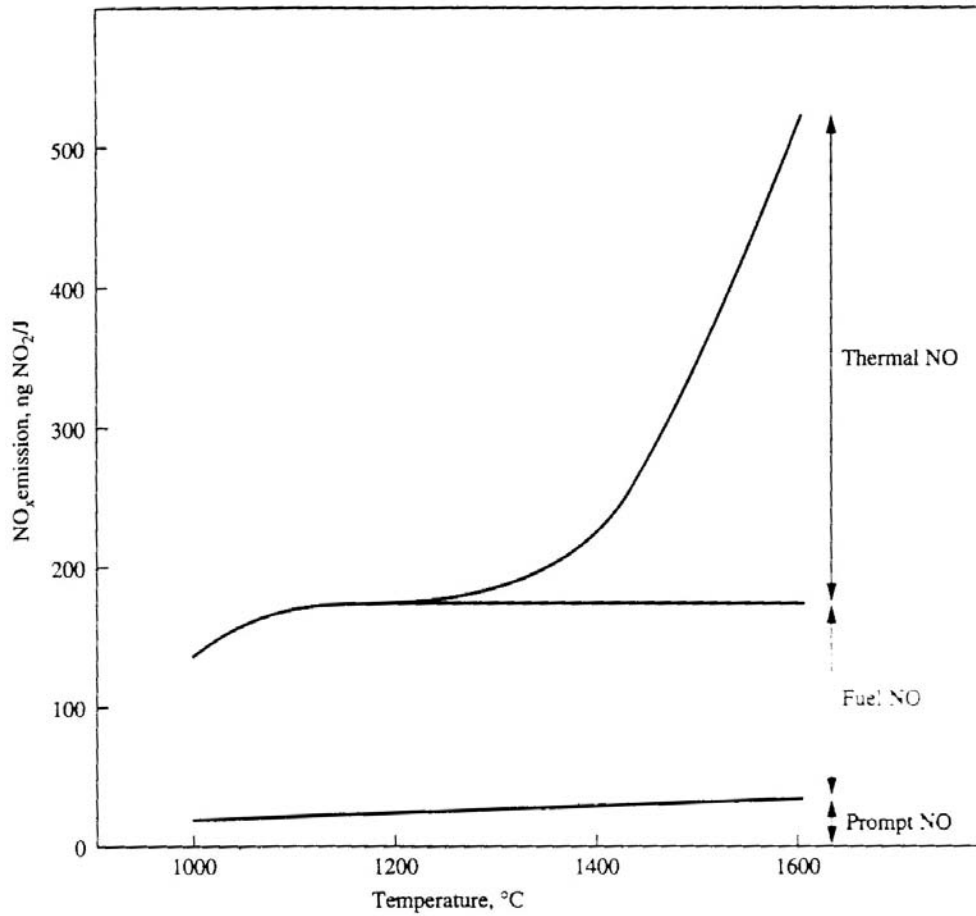


Figure 61: Contributo dei diversi meccanismi alla formazione di NO, in funzione della temperatura.

4.6.17 COMBUSTIONE IN TURBINE A GAS

- MECCANISMO TERMICO DOMINANTE (ALTA T)
- MECCANISMO *PROMPT* RELATIVAMENTE POCO IMPORTANTE
- MECCANISMO $N_2O \sim 10 - 15 \%$

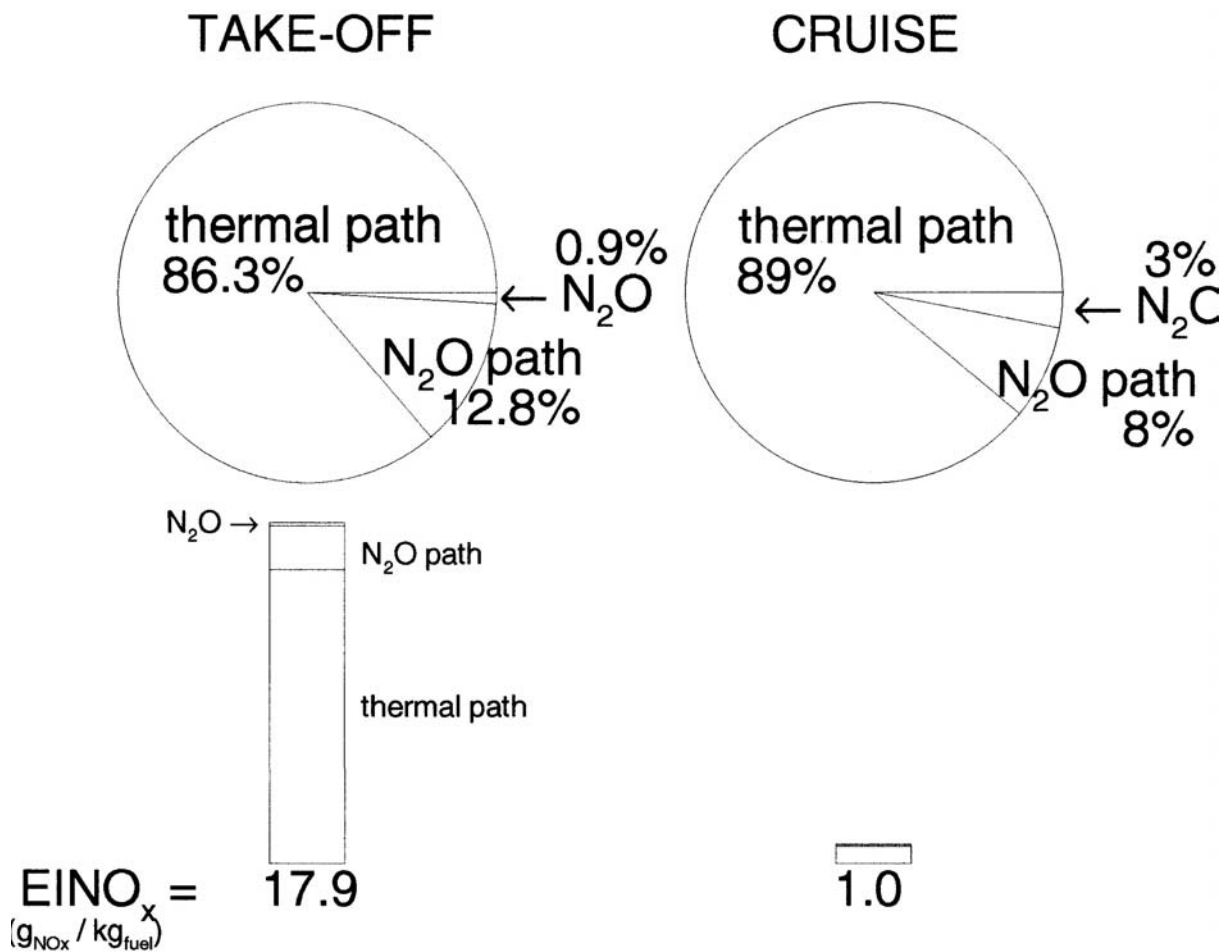


Figure 62: Contributo dei diversi meccanismi alla formazione di NO_x in un motore aeronautico, in condizioni di decollo e volo di crociera.

4.6.18 CONTROLLO DELLE EMISSIONI DI NO_x

1. PREVENZIONE DELLA FORMAZIONE (MODIFICA DEL PROCESSO DI COMBUSTIONE)
2. TRATTAMENTO DEI FUMI (IN IMPIANTI DI TERRA)
 - SCRUBBING OSTACOLATO DA BASSISSIMA SOLUBILITÀ

4.6.19 MODIFICA DEL PROCESSO DI COMBUSTIONE

- RIDURRE T , t , TIME-AT-TEMPERATURE, X_{O_2}
- COMBUSTIONE IN DUE STADI (REBURNING)
- (FLUE GAS RECIRCULATION – FRG)
- (USARE O_2 PURO COME OSSIDANTE)
- RIDUZIONE NO_x GENERALMENTE COMPORTA AUMENTO CO

4.7.1 MONOSSIDO DI CARBONIO (CO)

- PRODOTTO IN MASSIMA PARTE DA VEICOLI A MOTORE
- CONCENTRAZIONI MASSIME IN CITTÀ
- NEI PRESSI DEGLI AEROPORTI, CIRCA IL 50% EMESSO DA AEREI (IL RESTO DA TRAFFICO VEICOLARE)
- CO \rightleftharpoons INCOMBUSTI

4.7.2 CHIMICA DEL CO

- OSSIDAZIONE DEL C DEGLI IDROCARBURI A CO VELOCE
- OSSIDAZIONE DEL CO A CO₂:

$\text{CO} + \text{OH} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}$ (RELATIVAMENTE LENTA A BASSA T
PERCHÉ, NONOSTANTE T_k MOLTO BASSA, CONCENTRAZIONE
[OH] DIPENDE FORTEMENTE DA T)

- FORTE CORRELAZIONE CON EMISSIONI DI IDROCARBURI
INCOMBUSTI (UHC)

4.7.3 EMISSIONI DI CO DA COMBUSTORI DI TURBINE A GAS EFFETTO DI ϕ

- MINIMO PER $\phi \sim 0,8$

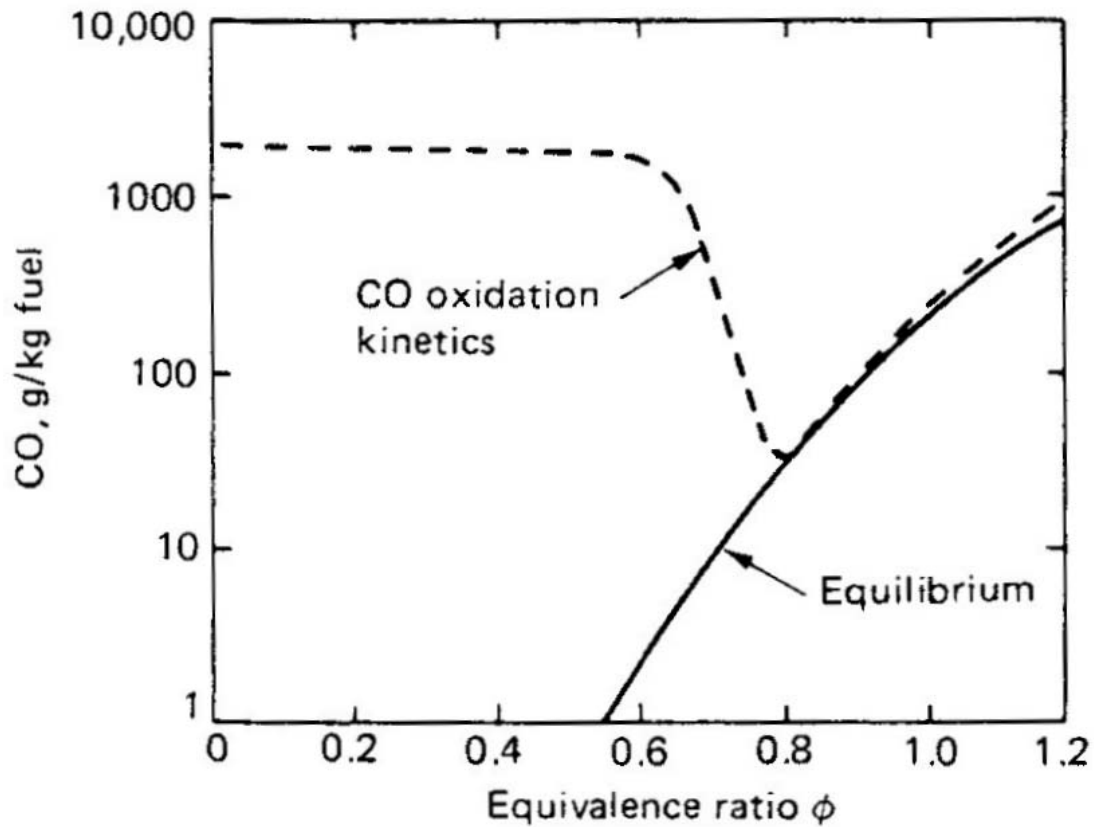


Figure 63: Andamenti tipici della concentrazione di CO in funzione del rapporto di equivalenza, sotto le ipotesi di equilibrio e di chimica a velocità finita.

4.7.4 CORRELAZIONE EMISSIONI CO E UHC DA COMBUSTORI DI TURBINE A GAS

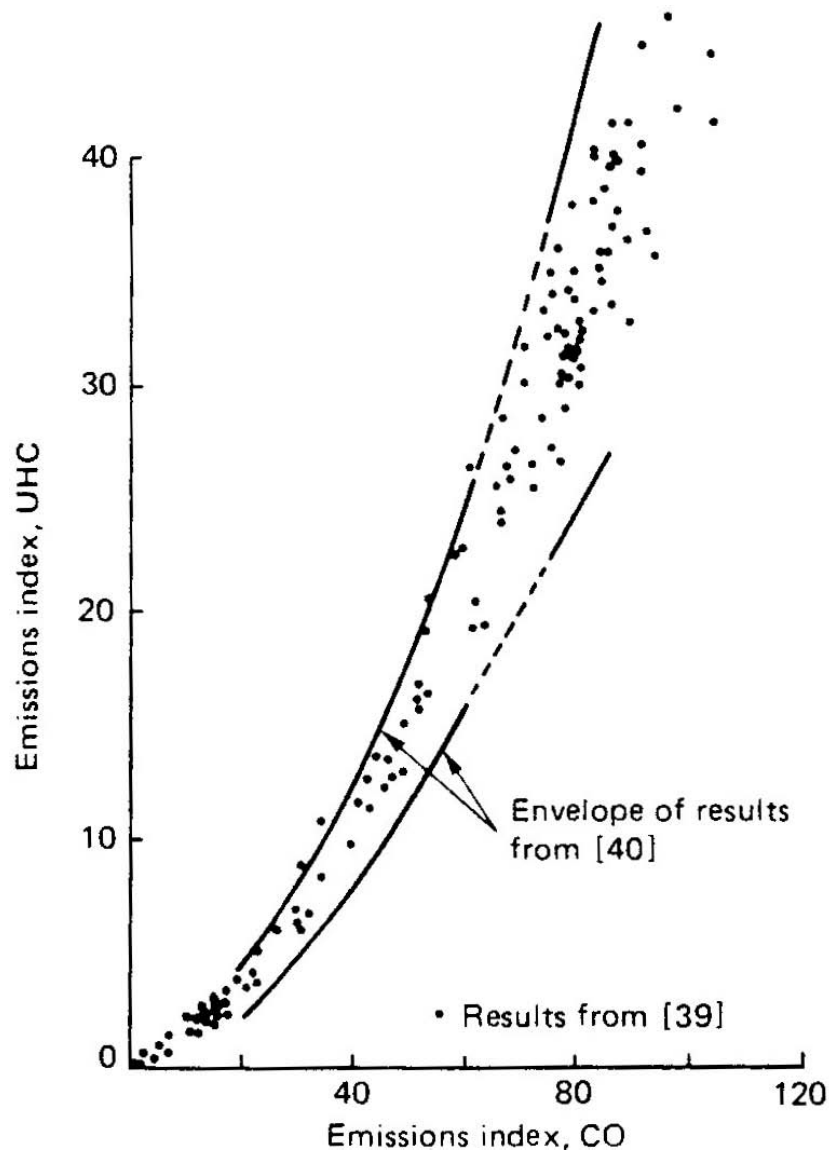


Figure 64: Correlazione tra emissioni di CO e UHC.

4.7.5 CORRELAZIONE EMISSIONI CO E UHC CON RENDIMENTO DI COMBUSTIONE PER TURBINE A GAS

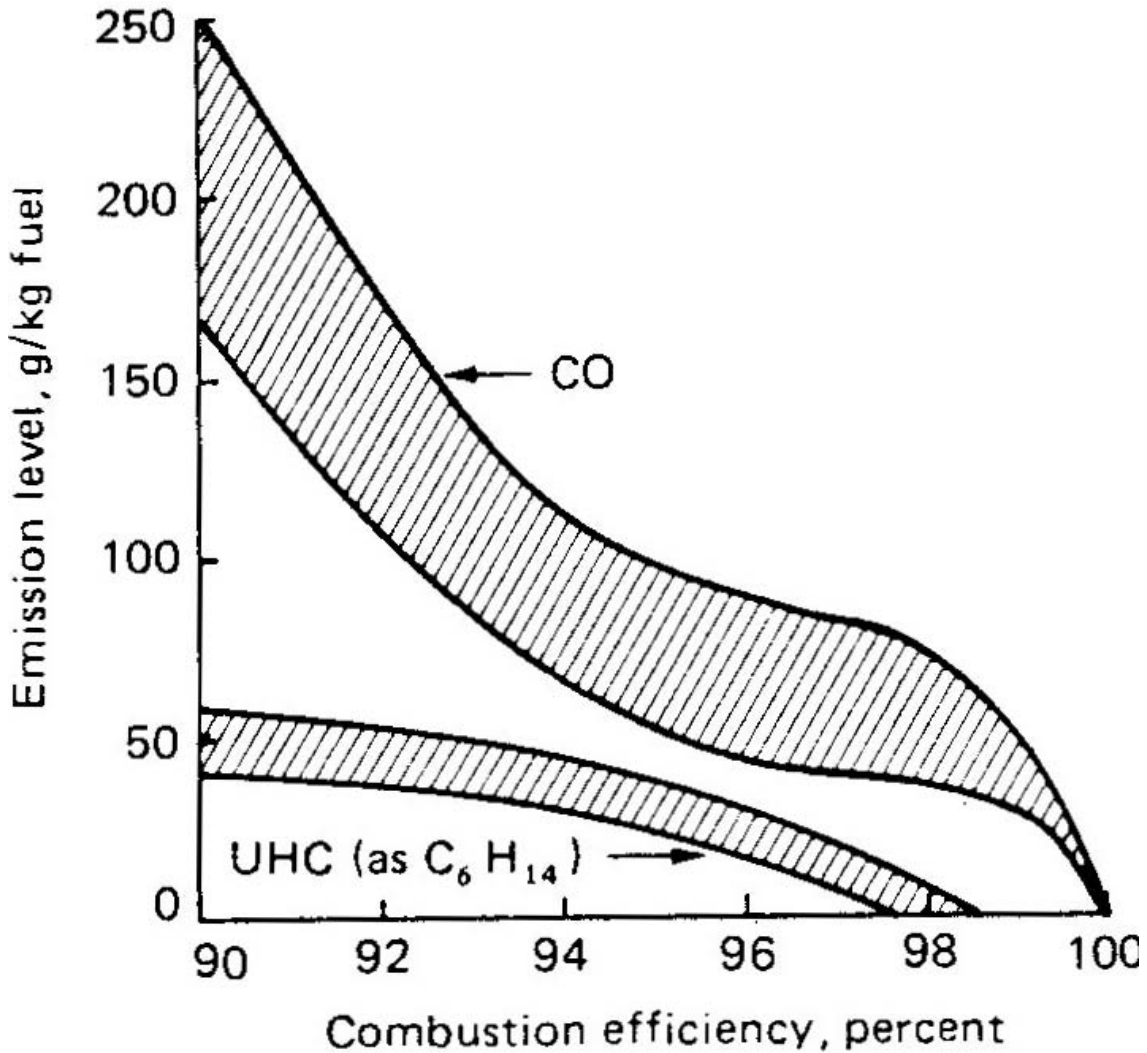


Figure 65: Correlazione tra emissioni di CO e rendimento del combustore.

4.7.6 EFFETTO p SU EMISSIONI DA COMBUSTORI DI TURBINE A GAS

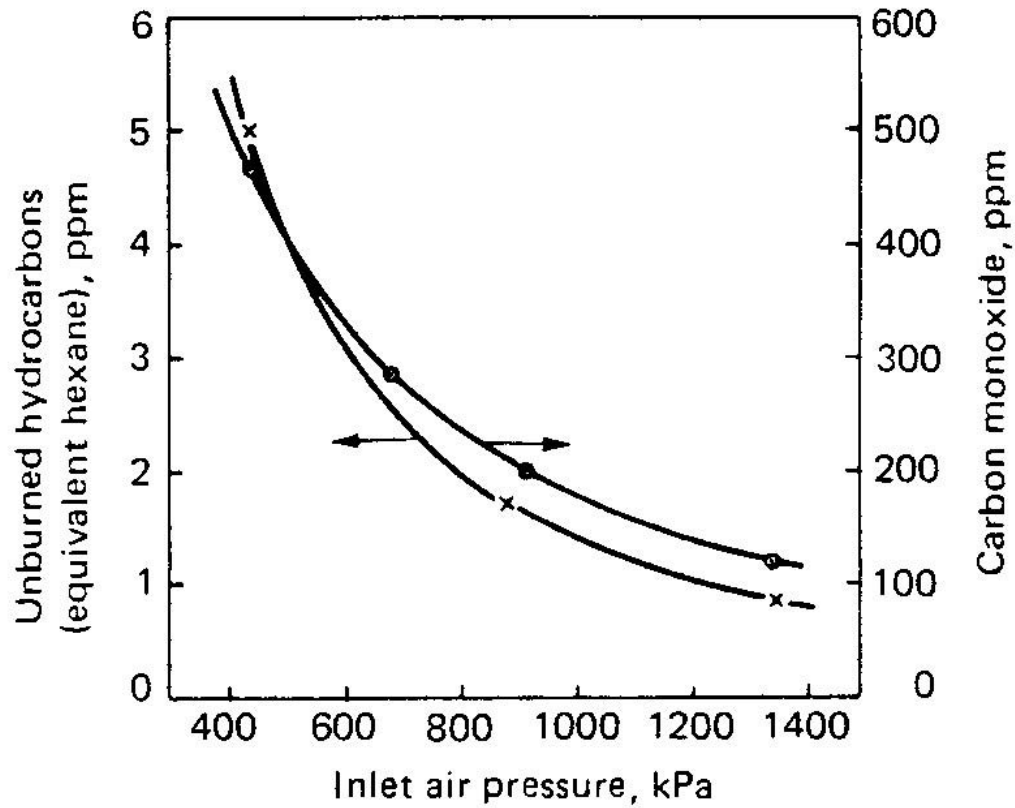


Figure 66: Effetto della pressione sulle emissioni di CO da una turbina a gas.