



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 1440A -

ANNO: 2015

A P P U N T I

STUDENTE: Vitrotti

MATERIA: Energetica, Prof.Barbero

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**



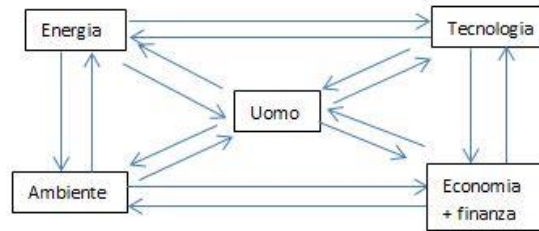
Ingegneria della Produzione Industriale

Appunti di

Energetica

(Prof. Barbero)

Luca Vitrotti



Fonti di energia

Per fonte di energia si intende o l'insieme di oggetti all'interno dei quali è conservata l'energia, o i fenomeni fisici (combustibile, scorrimento dei fiumi, campo magnetico) ed oggetti esterni al nostro pianeta (sole) da cui si può ricavare energia. L'importante è saperle usare al meglio. Le fonti di energia si dividono in:

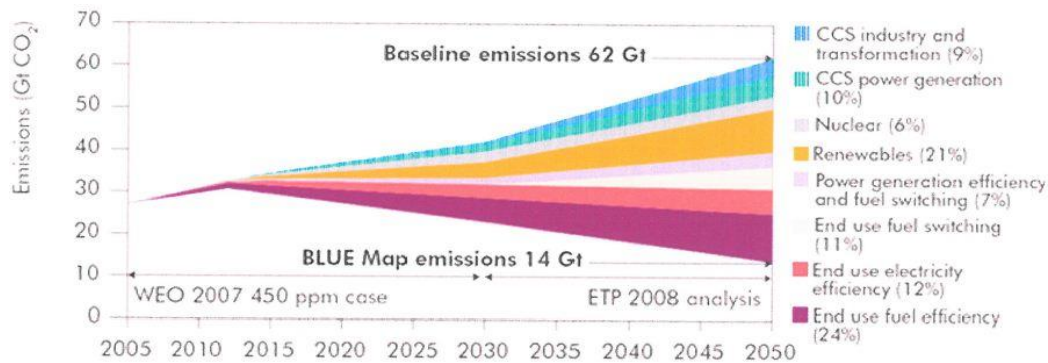
- **Fonti rinnovabili:** fonti che, a mano a mano che vengono utilizzate, si rigenerano velocemente (il giorno dopo). Comprendono l'energia:
 1. Solare-termica
 2. Fotovoltaica
 3. Solare-termodinamica (stabilimenti a energia solare)
 4. Solare-elettromagnetica
 5. Derivata dalle biomasse
 6. Eolica (scatenata dal fenomeno del riscaldamento da parte del Sole)
 7. Idroelettrica (legata al ciclo della pioggia)
 8. Mareomotrice (variazione del livello del mare, dovuta all'azione della Luna).
- **Fonti non rinnovabili:** si intende un accumulo di energia (es petrolio, gas, carbone) che si è accumulato nel corso di 150 milioni di anni, denominate non rinnovabili in quanto non possono rinnovarsi nel periodo di utilizzo → per rigenerarsi, impiegano un arco temporale troppo lungo per la vita di un singolo uomo. Esse comprendono:
 1. Combustibili fossili
 2. Uranio
 3. Geotermico.

Alla base di tutte le energie rinnovabili vi è il sole e i suoi effetti (esclusa la mareomotrice), ma anche alla base di quelle non rinnovabili perché derivano da vegetazione o condizioni climatiche precedenti, sempre influenzate dal sole.

Energy Source Comparison

Energy Source	Pros	Cons	Energy Source	Pros	Cons
Solar Energy  Nonpolluting Most abundant energy source available Systems last 15-30 years		High initial investment Dependent on sunny weather Supplemental energy may be needed in low sunlight areas Requires large physical space for PV cell panels Limited availability of polysilicon for panels Output is proportional to wind speed	Biomass  Fewer emissions than fossil fuel sources Can be used in diesel engines Auto engines easily convert to run on biomass fuel		drilling/transporting Source must be near usage to cut transportation costs Emits some pollution as gas/liquid waste Increases emissions of nitrogen oxides, an air pollutant Uses some fossil fuels in conversion Emits major greenhouse gases/acid rain
Wind Energy  No emissions Affordable Little disruption of ecosystems Relatively high output No emissions		Not feasible for all geographic locations High initial investment/ongoing maintenance costs Extensive land use	Coal  Abundant supply Currently inexpensive to extract Reliable and capable of generating large amounts of power		High environmental impact from mining and burning, although cleaner coal-burning technology is being developed Mining can be dangerous for miners Higher capital costs due to safety, emergency, containment, radioactive waste, and storage systems
Hydropower  Reliable Capable of generating large amounts of power Output can be regulated to meet demand Widely available		Environmental impacts by changing the environment in the dam area Hydroelectric dams are expensive to build Dams may be affected by drought Potential for floods	Uranium  No greenhouse gases or CO2 emissions Efficient at transforming energy into electricity Uranium reserves are abundant		Problem of long-term storage of radioactive waste Heated waste water from nuclear plants harms aquatic life Potential nuclear proliferation issue
Natural Gas  Cleanest-burning fossil fuel Often used in combination with other fuels to decrease pollution in electricity generation Made safe by adding artificial odor so that people can easily smell the gas in case of a leak		Transportation costs are high Lack of infrastructure makes gas resources unavailable from some areas Burns cleanly, but still has emissions Pipelines impact ecosystems	Geothermal  Efficient Power plants have low emissions Low cost after the initial investment		Geothermal fields found in few areas around the world Expensive start-up costs Wells could eventually be depleted
Petroleum  Efficient transportation fuel for the world Basis of many products, from prescription drugs to plastics Economical to produce		High CO2 emissions Found in limited areas Supply may be exhausted before natural gas/coal resources Possible environmental impact from			

Tra il 2013 ed il 2030 è previsto un incremento dell'utilizzo dell'energia del 45% circa, di cui il 33% (di questo 45%) sarà di carbone. Di tutti i gas con effetto serra, (tralasciando i peggiori in assoluto che vengono già monitorati) la CO₂ è quella che ha la maggior influenza sul riscaldamento globale; attualmente ne vengono emesse circa 28 Gton e per il 2050 è previsto un incremento di ulteriori 34 Gton, arrivando dunque ad un totale di 62 Gton. Se si prendessero dei provvedimenti, si emetterebbero non più 28 Gton, ma 14 Gton; tuttavia si è già in ritardo rispetto a quest'ultima ipotesi.

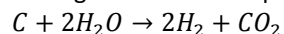


Come si può ridurre l'emissione di CO₂? Nucleare e rinnovabili (di per se non producono CO₂, ma le loro filiere sì, che comunque sono inferiori a molte altre fonti di energia), miglioramento dell'efficienza dell'energia elettrica e cambio dei combustibili (anziché carbone, il metano che contiene il 75% di carbonio); cambio di combustibili nell'uso finale ovvero per usi che non prevedono la generazione di energia elettrica (es. uso domestico o civile); efficienza nell'uso finale dell'energia elettrica (es. lampade a minor consumo energetico); efficienza nell'uso finale dei combustibili (motori ad alto rendimento); il **CCS** (cattura e stoccaggio della CO₂, pratica molto difficile non ancora utilizzata).

Le tecniche CCS, ossia Carbon Capture & Storage, permettono di catturare e stoccare la CO₂ emessa dai grandi impianti di combustione di centrali energetiche, ma anche di impianti industriali.

La cattura della CO₂ può avvenire:

- **Prima** della combustione, trattando il carbone mediante gassificazione e ottenendo così syngas (miscela di H₂ e CO₂). Perché avvenga la gassificazione bisogna introdurre vapore acqueo. Così, si ottiene la reazione:



Il syngas (= "gas di sintesi") permette di utilizzare l'idrogeno per produrre energia e di catturare direttamente la CO₂ dalla reazione che senza il trattamento si disperderebbe nell'aria a seguito di una normale combustione. Al momento è una tecnologia piuttosto futurista;

- **Dopo** la combustione. La CO₂ può essere catturata dai fumi di combustione esausti. L'utilizzo di un solvente chimico adatto permette l'assorbimento della CO₂. Essa viene poi separata dal solvente e compressa per poter essere trasportata e stoccata;
- **Dopo** la combustione **con O₂** (ossicombustione). L'ossigeno viene separato dall'aria prima del processo di combustione e viene miscelato con il combustibile direttamente in una caldaia ad alta pressione. L'ossigeno puro limita la formazione di fumi, (a differenza dell'ossigeno normale, aria normale, dove l'ossigeno è presente al 24% e l'azoto al 76% circa) e facilita la cattura di CO₂ → viene "diluita" in una massa di fumi. Questo tipo di combustione produce solo vapore e anidride carbonica concentrata, più semplice da trattare e inviare allo stoccaggio.

Lo stoccaggio della CO₂ catturata, invece, può avvenire:

- In **formazioni saline, pozzi esauriti** di metano o petrolio, o viene fatta assorbire da carbone che non verrà utilizzato (**stratificazione del carbone**);
- **Iniettandola** in pozzi attivi di petrolio o gas. In questo modo si aumenta la pressione e si ottiene anche il vantaggio che il petrolio/gas escono meglio dal giacimento → principale utilizzo della CO₂ catturata;
- Per **biofissazione**, ossia coltivazione di piante "artificiali" (alghe) create apposta per catturare la CO₂ e utilizzarle successivamente come combustibile;
- Per **confinamento**, ossia tramite la mineralizzazione della CO₂ in soluzioni solide, grazie a particolari reazioni chimiche.

Danni da filiera

Per ogni tipo di combustibile (tranne nucleare e solare che non sono combustibili tradizionali) vi è un danno percentuale per chi lavora nella filiera (addetti) e per il pubblico/popolazione (meno esposto direttamente agli incidenti, ma essendo più numeroso è molto più soggetto a malattia).

Si scalda il greggio intorno ai 400°C, che man mano che sale in un serbatoio in cui sono inseriti dei piatti (a diverse temperature di condensazione), si trasforma in gas, in modo da suddividere la materia in classi:

- Residuo: bitumi, asfalti stradali;
- Olio combustibile: si presenta scuro e molto viscoso;
- Olio lubrificante;
- Gasolio: serve per il riscaldamento e per le macchine diesel;
- Cherosene: combustibile per aerei a reazione;
- Nafta: usata come materia prima per l'industria della plastica;
- Benzine per autotrazione: pistoni a combustione interna;
- Benzina avio: motori per aerei di tipo alternativo (molto raffinata, per evitare problemi di intasamento da combustione interna);
- Gas raffinato: GPL.

Si noti che a 25° si ottiene il gas raffinato, ovvero il GPL (Gas di Petrolio Liquefatto), che in realtà si può estrarre anche dai pozzi petroliferi. Esso si divide in *butano* (PC = 29500-32000 kCal/kg) e *propano* (PC = 22200-24200 kCal/kg). I componenti del GPL sono in fase gassosa a temperatura ambiente e a pressione atmosferica, ma vengono liquefatti mediante compressione per ridurre l'ingombro e rendere più economico il trasporto (inodore, per cui si aggiungono odorizzanti). Il GPL è meno leggero dell'aria, e in caso di perdita scende verso il basso/suolo.

Combustibili solidi naturali

Sono combustibili generati per reazioni anaerobiche di elementi vegetali/naturali sviluppatasi ad alte temperature e pressioni sulla superficie terrestre, in epoche più o meno remote. Sono essenzialmente i carboni (a differenza del petrolio, i combustibili fossili non sono un miscuglio di sostanze). L'energia chimica che possiedono è quella derivata dall'ossidazione tra C (che si ossida) e O₂ (che si riduce), ossia dalla **combustione**. [C'è da dire, a questo proposito, che tutte le sostanze chimiche generano energia per combustione. La combustione può avvenire con combustibili in fase gassosa (come il gas naturale), in fase solida o in fase solida e gassosa (come, per l'appunto i combustibili solidi naturali). Non si possono bruciare combustibili direttamente allo stato liquido, ma prima della combustione c'è bisogno di far evaporare il liquido. Il gas ottenuto può bruciare tranquillamente. Tuttavia, spesso troviamo combustibili in fase liquida (es.: benzina) poiché, essendo la fase liquida di un composto chimico più densa della propria fase gassosa, a parità di volume occupato, si riesce a stoccare e a trasportare più combustibile (con conseguente risparmio economico)].

Per tali combustibili, l'elemento caratterizzante da prendere in considerazione per la combustione è il carbonio. I più comuni, in ordine crescente di data di formazione, contenuto di carbonio e potere calorifero, sono:

- **Torbe** (55-65% di carbonio, 80-90% di umidità): derivano dalla trasformazione anaerobica del legno, di piante erbacee, di muschi e giunchi. Oggi sono poco usate vista la disponibilità di combustibili meno problematici e più redditizi, in quanto il loro contenuto energetico, e quindi potere calorifero, è molto basso.
- **Ligniti** (65-75% di carbonio): analoghe alle torbe ma in uno stato di trasformazione/evoluzione più avanzato. Hanno umidità che varia fino al 40%. Non hanno un potere calorifero inferiore o superiore ma si tratta di un unico valore, in quanto non essendoci acqua non vi è idrogeno e di conseguenza non lo si deve estrarre. Sono poco usate perché non sono abbondanti in natura e sono un materiale molto polveroso e frantumabile. A seconda della % di umidità e del potere calorifico si dividono in:
 - *Ligniti torbose*: 25-40% di umidità, 3800-5000 kCal/kg di PC;
 - *Ligniti xilodi*: 30% di umidità, 5500 kCal/kg di PC;
 - *Ligniti picee*: 20% di umidità, 5500-7300 kCal/kg di PC;
- **Litantraci** (75-90% di carbonio, 2-3% di umidità): hanno aspetto compatto, bruno con zone opache e lucenti. Sono i carboni più usati in assoluto, e costituiscono quello che viene chiamato **carbon fossile**. Sono molto pregiati ma poco utilizzati, in quanto non molto abbondanti. Potere calorifero: 7000 kcal/kg.
- **Antraciti** (90-95% di carbonio, 15% di umidità): sono il carbone più pregiato e sono neri e lucenti, tuttavia non sono molto utilizzati poiché sono poco presenti in natura. Potere calorifero: 8500 kcal/kg.
- **Grafiti**: sono carbonio puro e non trovano impiego come combustibile, ma vengono utilizzati per estrarre il carbon coke (carbonio puro) utilizzato nella creazione di acciai.

Oggi come oggi si cerca di trovare utilizzazioni dei carboni che possano prescindere dalla combustione, poiché, qualsiasi essa sia, genera l'emissione di ceneri e inquinanti. Oggi non si brucia più il carbone in grossa pezzatura, ma si utilizzano tecnologie che permettono di bruciare le polveri o carboni delle dimensioni di un gessetto, tecnologie che però non sono ancora state sviluppate del tutto. Queste due tecnologie sono meno inquinanti ma non del tutto pulite. Le utilizzazioni pulite del carbone sono:

- ❖ **Gassificazione del carbone:** processo il cui obiettivo non è quello di ricavare combustibile solido (coke), ma quello di produrre gas utilizzabili a scopi energetici, o come materia prima per sintesi chimiche. Il carbone viene trattato con acqua (vapore acqueo nella combustione), per ottenere il Syngas, che è un gas di sintesi che contiene H_2+CO_2 . Ciò permette di bruciare l'H, che è un gas combustibile: $C + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2 + \text{calore}$
- ❖ **Liquefazione del carbone:** attraverso determinati processi si trasforma il Syngas ottenuto precedentemente in un combustibile liquido (benzina, nafta)

La **cokeria**: stabilimento in cui si produce il carbon coke (che è quello che serve negli altiforni) attraverso la distillazione del carbon fossile. Si produce portando ad altissima temperatura il carbone, in assenza di ossigeno, in modo da ottenere carbonio puro, eliminando tutto ciò che non è carbonio. Tra le sostanze che rilascia vi sono quelle della volatizzazione del carbone (gas) che vengono intercettate e usate per l'alimentazione degli impianti stessi (elementi gassosi da cokeria). [vedi slide 14 doc a2]

Biomasse e Biocombustibili (combustibili rinnovabili, non fossili)

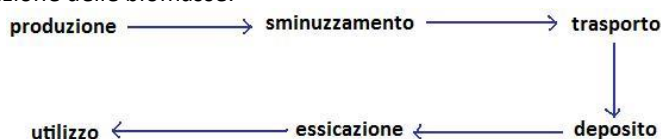
Una BIOMASSA è ogni materiale di origine biologica, e quindi rinnovabile, escluso il materiale incorporato in formazioni geologiche e trasformato in fossile (cioè combustibili fossili, i quali erano delle biomasse ma hanno subito un'evoluzione di processi molto più lunghi), che, previa trattamenti, può essere usato come combustibile solido. Le biomasse si classificano in:

- Biomassa legnosa di alberi, arbusti, cespugli;
- Biomassa erbacea di vegetali di fusto non legnoso;
- Biomassa da frutti (parti commestibili di alberi e che contengono semi);
- Miscela e miscugli di biomasse, materiali di diversa origine mescolati in modo intenzionale o non intenzionale (ossia mix delle 3 precedenti).

La biomassa, dal punto di vista energetico ed ambientale è una sorgente energetica che può sostituire una parte dei combustibili fossili. L'utilizzo delle biomasse presenta molti vantaggi:

- Sono sorgenti di energia rinnovabili (ricrescono periodicamente, anche nel corso di un anno);
- Le emissioni di CO₂ sono praticamente nulle, molto basse alle quali però vanno sommate quelle emesse dalla filiera;
- Possono essere costituite anche dai Rifiuti Solidi Urbani (RSU), che attraverso la raccolta differenziata possono essere accumulati e usati come combustibile anziché depositati in discariche;
- Il compost generato da biomasse viene utilizzato al posto di altre sostanze per la concimazione del terreno avendo un impatto ambientale minore. Tuttavia non viene molto utilizzato a causa del prezzo piuttosto caro;
- Contenuto minimo di zolfo e la CO₂ emessa serve alle piante per produrre O₂ → bilancio compensato di ossigeno;
- Miglioramento delle condizioni microclimatiche e idrogeologiche a causa della coltivazione di piante da cui derivano le biomasse;
- Miglioramento del contesto socio-economico in quanto genera occupazione/lavoro.

Ciclo di utilizzazione delle biomasse:



Le biomasse legnose hanno il seguente processo di combustione:

1. **Essiccazione.** In questa fase, tramite un processo endotermico, l'acqua contenuta nel legno evapora. L'essiccamento arriva fino a circa 100°C, temperatura di transizione dell'acqua da liquido a vapore [l'essiccazione rappresenta un costo finanziario, in quanto seppur si possieda la biomassa non la si può

I **BIOCOMBUSTIBILI** sono prodotti che si ottengono, direttamente o indirettamente, dalle biomasse attraverso processi non solo meccanici, ma anche termici, fisici e chimici (la biomassa “canna da zucchero”, non basta tagliarla per ottenere biocombustibile. Devo applicare un processo chimico per trasformarla in bioetanolo, che è invece un biocombustibile). Possono essere sotto forma solida (se origine vegetale) ma anche liquida e gassosa (se animale). I biocombustibili possono essere:

- **Di prima generazione**, cioè quelli generati da biomasse agroalimentari (mais, canna da zucchero, ...). Sono i più diffusi. Proprio per questo, si è aperto un dibattito intorno al loro utilizzo poiché se tali materie prime venissero devolute solo al settore agroenergetico, il mercato alimentare ne risentirebbe non poco;
- **Di seconda generazione**, cioè derivati da biomasse ligno-cellulose e non da prodotti alimentari. Essi risolvono il problema del mercato alimentare, ma hanno un certo impatto sulla % di terreno destinato a scopi energetici e non al settore agricolo-boschivo;
- **Di terza generazione**, cioè derivati dall'utilizzo di alghe. Essi hanno il minor impatto ambientale, in quanto non si danneggia l'ecosistema terrestre poiché non vanno a sottrarre terreno potenzialmente destinato ad altre attività. Nonostante ciò rimane ancora una via per lo più sperimentale.

I biocombustibili più comuni sono:

- **Brichette**, biocombustibile densificato in forma di parallelepipedo o cilindro ottenuto comprimendo biomassa polverizzata con o senza aiuto di additivi di pressatura, generalmente ottenuto con pressa a pistone;
- **Pellet**, biocombustibile densificato in forma di cilindro ottenuto comprimendo biomassa polverizzata con o senza aiuto di additivi di pressatura, generalmente ottenuto con estrusore a trafilatura;
- **Segatura, Cortecchia, Cippato, Fascine** ...[vedi slide 7 doc a3].
- Il **BIOETANOLO** è fondamentalmente alcool etilico, viene estratto e prodotto attraverso la fermentazione di zuccheri e amidi (canna da zucchero, mais, frumento e barbabietola oppure dalla cellulosa). È quello comunemente presente nelle bevande alcoliche (non quello metilico che invece sarebbe cancerogeno). Esso può essere di *prima generazione*: prodotto direttamente da sostanze alimentari (sia per l'uomo che per gli animali, principalmente da canna o barbabietola da zucchero); di *seconda generazione*: ottenuto dalla cellulosa e infine di *terza generazione*: ottenuto dalle alghe. Si tende ad andare maggiormente verso quello di terza generazione, perché la produzione di quello di prima generazione causerebbe uno spreco alimentare (→ si produce cibo che non viene consumato); si cerca di evitare/limitare quello di seconda generazione in quanto la coltivazione di vegetali per l'estrazione del bioetanolo toglierebbe spazio fisico da poter destinare all'agricoltura. Il bioetanolo può essere usato sotto forma:
 - **pura** (E100, E96), data la quasi assenza di benzina nella miscela, può ridurre le emissioni di gas serra di una % compresa tra il 20% e il 100%.
 - **miscela bioetanolo puro e benzina** (E10 o E85: dove E rappresenta la benzina e la cifra seguente rappresenta la percentuale di bioetanolo presente nella miscela). Per bruciare il bioetanolo miscelato (dall'E10 in poi) servono appositi motori poiché esso vaporizza male a basse temperature e può corrodere i metalli e gli elastomeri. Tuttavia, ci sono determinati motori, detti Flexi-Fluel Vehicols (FFVs), che bruciano sia miscele con alto contenuto di bioetanolo, sia miscele inferiori all'E5, ossia benzina quasi pura a cui viene aggiunto un additivo, l'ETBE (EtilTerButilEtere), derivato dal bioetanolo. Tale ETBE è oggi utilizzato al posto del piombo-tetraetile per aumentare gli ottani della benzina (e conseguentemente il rendimento del motore) senza però essere pericoloso com'era il piombo-tetraetile. [In Europa vi è una legge che obbliga le case produttrici di benzina ad inserire nella miscela almeno il 3% di biocombustibile (non ETBE presente nella benzina)].

Dato che il bioetanolo è prodotto allo stato gassoso, il futuro di questa tecnologia è tentare di liquefarlo, poiché è più facile e più economico da trasportare (a parità di volume ho più molecole in un liquido che in un gas e quindi più PC → a parità di PC ho un volume minore).

Pro	Contro
Migliora il rendimento della benzina (come additivo)	50% in meno di contenuto energetico (suppongo, rispetto alla benzina)
È rinnovabile	Spesso sono richieste modifiche sul motore che lo adattino a bruciare il bioetanolo
Minori emissioni di gas serra sul suo ciclo vita	Problemi a freddo, soprattutto in termini di evaporazione
I FFVs sono molto flessibili	Corrode elastomeri e metalli
In miscela con il diesel, si ottiene l'E-Diesel	Se usato su motori non adatti, fa decadere la garanzia

Motori termici a combustione interna

Alla base di tutto c'è l'energia chimica. Grazie alla combustione che si svolge nella camera di combustione interna del motore si genera energia termica contenuta nei fumi caldi. L'energia termica ricavata dai fumi viene convertita, nel motore, in lavoro meccanico (con un rendimento attorno che va dal 20% al 30%). Il lavoro meccanico sarà poi convertito in energia cinetica e in energia necessaria a vincere gli attriti. Queste due energie diventeranno, come tutte le energie, energia termica a basse temperature.

Tutto questo ha significato se vi è un utilizzo costante, senza accelerazioni o comunque variazioni dei giri del motore troppo alte, perché altrimenti aumenterebbero troppo i consumi per la combustione (viene immesso più combustibile del dovuto) → dev'esserci un rapporto equilibrato tra ciò a cui si mira (energia) e quello che viene messo a disposizione (combustibile) in modo da utilizzare l'energia finale il più possibile.

Forno

Alla base di tutto c'è l'energia chimica. Grazie alla combustione che si svolge nella camera di combustione del forno si genera energia termica sotto forma di fumi caldi. Nel laboratorio del forno, cioè il "luogo" dove si inserisce il materiale che dev'essere trattato grazie al forno (ad esempio, il forno per l'austenizzazione dell'acciaio), l'energia termica (sempre sotto forma di fumi caldi) viene trasferita al suddetto materiale che in tal modo verrà trattato. Il materiale accumulerà l'energia rilasciandola pian piano sotto forma di energia termica a basse temperature, dovuta al suo raffreddamento naturale o non (come nel caso della tempra). Il forno ha un rendimento compreso tra il 30% e il 90%. Quest'intervallo così ampio permette di regolare e scegliere il rendimento a seconda della temperatura che serve per il trattamento del materiale, limitando così l'eventuale dispersione di energia termica nell'atmosfera.

Tutte queste trasformazioni usano direttamente l'energia termica dei fumi caldi, tuttavia ci sono dei casi in questo non può avvenire, come ad esempio quello civile, il quale invece sfrutta il passaggio dell'energia termica dei fumi ad un fluido termovettore, ovvero una sostanza allo stato fluido che accumula e trasporta il calore. Nel nostro caso è vapore acqueo. L'acqua (si intende la molecola H₂O indipendentemente dal suo stato fisico) è il fluido termovettore principale. Essa può trovarsi sotto forma di:

- **acqua liquida**, scaldata a meno di 100 °C a 1 atm, o a più di 100 °C e a più di 1 atm (acqua liquida in pressione). In entrambi i casi, pur essendo calda, l'acqua liquida non diventa vapore acqueo;
- **vapore surriscaldato**, ossia vapore acqueo non a contatto con acqua liquida;
- **vapore saturo**, ossia una miscela di acqua liquida e vapore acqueo. Sia il vapore surriscaldato che quello saturo sono prodotti nei generatori di vapore (vedi dopo).

Gli impianti di nostro interesse che utilizzano il passaggio di energia termica dai fumi al fluido termovettore sono:

Impianto termoelettrico

Alla base di tutto c'è l'energia chimica. Grazie alla combustione che si svolge nella camera di combustione si genera energia termica sotto forma di fumi caldi. Volendo utilizzare i cicli a vapore, si usa uno scambiatore che trasforma l'energia termica dei fumi in energia termica fluida (acqua, ovvero si ottiene vapore acqueo ad alta temperatura come fluido termovettore) con un rendimento del 95%.

Il vapore acqueo viene portato ad alta temperatura ed incanalato in turbine a vapore, il cui funzionamento, per ciclo Rankine, genera lavoro meccanico. Il rendimento di tale ciclo è del 40-42%. Il lavoro viene convertito da un alternatore (che ha un rendimento del 95% sul 40-42% di energia resa disponibile dal ciclo Rankine) in energia elettrica. Il rendimento totale sarà il 95% del 40-42%, cioè 38-40%. L'energia prodotta potrà esse destinata a:

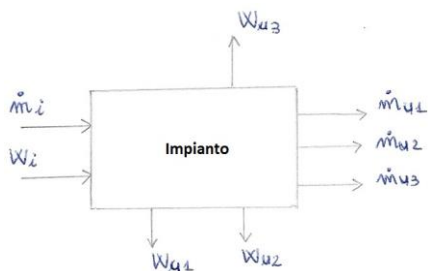
- **Motori elettrici**: i quali permettono di trasformare l'energia elettrica in meccanica con un rendimento molto alto. Dal funzionamento del motore si genera dell'attrito che a sua volta genera altra energia termica a bassa temperatura → Questo utilizzo converte l'energia utilizzata in energia termica a bassa temperatura;
- **Corpi illuminanti**: per ottenere illuminazione, sotto forma di energia elettromagnetica che a sua volta genera energia termica a bassa temperatura → Anche questo utilizzo converte l'energia utilizzata in energia termica a bassa temperatura;
- **Corpi che scaldano elettricamente** (stufa elettrica) per ottenere energia termica. Ha un rendimento molto basso rispetto ad una conversione diretta. Da considerare "criminale" in quanto se l'energia termica venisse

IMPIANTI TERMODINAMICI

All'interno di questi impianti avvengono due trasformazioni energetiche:

- ❖ Energia chimica → energia termica dei fumi: parte dell'impianto in cui avviene la reazione di combustione, all'interno della camera di combustione (parte comune a qualsiasi tipo di impianto).
- ❖ Energia termica dei fumi → energia termica dell'acqua: in questa parte non avviene mai una commistione di fumi e acqua, ossia i fumi non entrano mai a contatto con l'acqua, per scaldarla (parte tipica solo degli impianti termodinamici).

Dal punto di vista macroenergetico, bisogna immaginare l'impianto come se fosse una scatola chiusa, in cui entrano massa (portata di massa, ovvero quantità di massa nell'unità di tempo quindi kg /s) ed energia (potenza, ovvero energia nell'unità di tempo J/s, quindi watt), ed escono massa ed energia. Consideriamo sempre impianti che siano in condizione di *regime permanente*, ovvero in cui non vi siano accumuli → tutto ciò che entra esce.

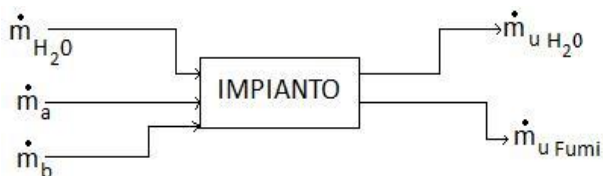


Il puntino sopra il componente indica che non si tratta più di una massa semplice, ma di una portata di massa.

Dal momento che sia in entrata che in uscita abbiamo lo stesso tipo di fattori, massa ed energia, vediamo cosa succede e come si comportano ognuna di esse.

La MASSA:

All'interno dell'impianto vengono immesse delle masse di materiali vari (principalmente acqua, aria e combustibili). Una volta sfruttate, esse andranno a costituire le masse uscenti che, per l'ipotesi di regime permanente, saranno equivalenti a quelle iniziali, in termini di quantità. Quando consideriamo le masse nei nostri impianti, ognuna di esse viene considerata come un'unica portata di massa, ovvero non interessa fare un'ulteriore divisione della massa presa in considerazione in base all'utilità → la portata di massa entrante dell'aria si combina con la portata di massa entrante del combustibile (tramite combustione) generando la portata di massa uscente dei fumi (equivalente alla somma delle due precedenti); questa portata di massa uscente dei fumi, la consideriamo come un unico elemento, indipendentemente dal fatto che una parte possa essere riutilizzata (parte utile) ed una invece no (parte inutile, dispersa).



- La portata di massa è espressa in kg/s.
- Per fumi, uscenti dalla combustione di a e b si intende $CO_2 + H_2O + O_2 + N_2$;

\dot{m}_{H_2O} = portata di massa H_2O	$\dot{m}_{u H_2O}$ = portata di massa H_2O in uscita
\dot{m}_a = portata di massa aria	$\dot{m}_{u Fumi}$ = portata di massa dei fumi in uscita
\dot{m}_b = portata di massa combustibile	

Per l'ipotesi di regime permanente:

$$\begin{cases} \dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_{u H_2O} \\ \dot{m}_a + \dot{m}_b = \dot{m}_{u Fumi} \end{cases}$$

L'ENERGIA – bilanciamento energetico:

Dal punto di vista energetico, nell'impianto viene immessa una potenza sotto forma di energia chimica, ed essendo una potenza possiamo esprimerla in Watt. Anche in questo caso, per la legge di conservazione di energia e supponendo di trovarci in condizioni di regime permanente, avremo una potenza uscente che sarà equivalente alla **potenza spesa W_s** (immessa). A differenza della massa uscente, la potenza uscente non conviene considerarla come un'unica componente, bisogna dividerla e considerarla come un insieme di diversi tipi di potenza sotto forma di energia:

- **Potenza utile W_u** (quella utile che viene utilizzata per il riscaldamento dell'acqua);

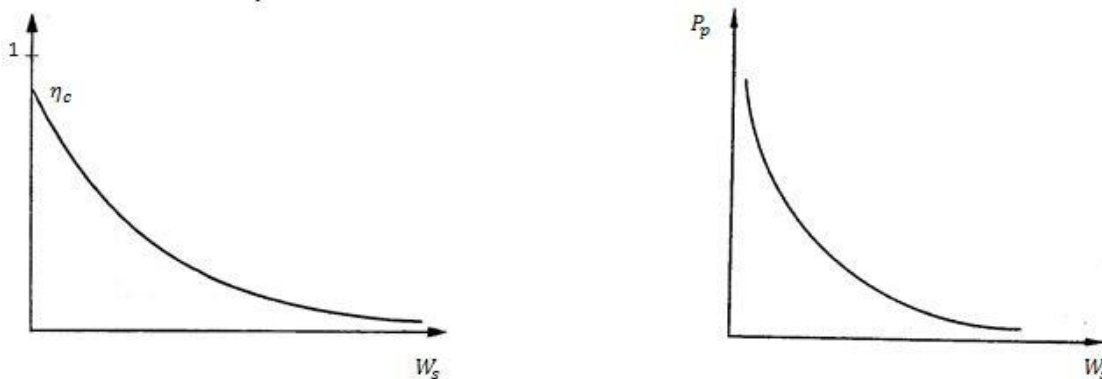
In una caldaia da riscaldamento, i fumi escono tra i 120 e i 200 °C, con una P_{cam} tra il 5% e il 10%. In un generatore di vapore saturo, i fumi escono tra i 200 e i 230 °C, con una P_{cam} di circa il 10%. In un generatore di vapore surriscaldato i fumi escono tra i 300 e i 350 °C, con una P_{cam} di circa il 17%. Tuttavia, in quest'ultimo caso si ovvia alla massiccia P_{cam} utilizzando appositi recuperatori che rendono riutilizzabili i fumi caldi, abbassando al P_{cam} al 5%.

Essendo molto bassa, P_p , tendenzialmente si trascura. Esprimendo tutto in funzione di η_u e trascurando P_p otteniamo η_c , ossia il rendimento di combustione. Esso è definito come:

$$\eta_c = 1 - P_{cam}$$

$$\eta_u = 1 - P_{cam} - P_p \rightarrow \eta_u = \eta_c - P_p$$

η_u e η_c sono indici diversi. η_u indica quanto fluido riesco a scaldare utilizzando W_s , tenendo conto, tuttavia, del mancato isolamento delle tubature e dell'impianto in sé, ovvero della perdita alle pareti; in altre parole è un indicatore più preciso. η_c , invece, misura semplicemente l'entità dello scambio termico tra fumi e fluido termovettore. È meno coerente. Vediamo i grafici di η_c e P_p :

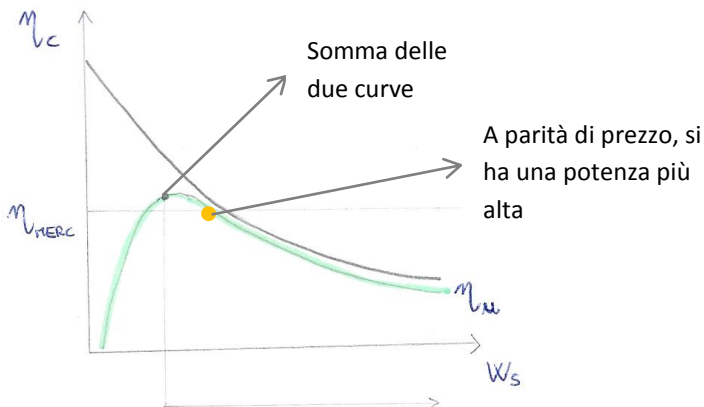


Il grafico η_c segue un determinato andamento:

1. All'aumentare della potenza spesa il rendimento di combustione diminuisce sempre;
2. Se la potenza spesa diventa molto alta (tende ad infinito), il rendimento di combustione diventa 0;
3. Se la potenza spesa è minima (tende a zero), il rendimento di combustione non sarà mai 1, in quanto i fumi sono comunque più caldi del fluido scaldato.

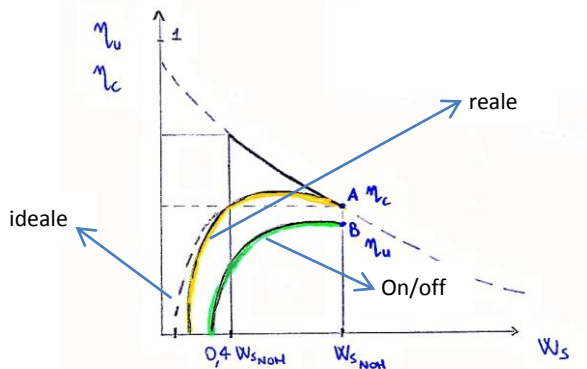
Il grafico P_p : qualunque sia la potenza spesa, l'acqua (nella caldaia) dev'essere sempre alla temperatura desiderata dall'utente (100° ad esempio), quindi la potenza che viene scambiata per ottenere e mantenere l'energia termica desiderata sarà una costante e la perdita alle pareti sarà $P_p = \frac{W_{pp}}{W_s} \rightarrow$ un'iperbole.

Poiché $\eta_u = \eta_c - P_p$, il grafico di η_u sarà la differenza dei due grafici precedenti, ossia:



Quindi il costruttore (di caldaie) dovrà prendere come punto di riferimento un valore di rendimento che possa essere appetibile sul mercato (η_{merc}), conforme al limite di legge e che abbia una potenza più alta di quanto imposto (idealmente parlando).

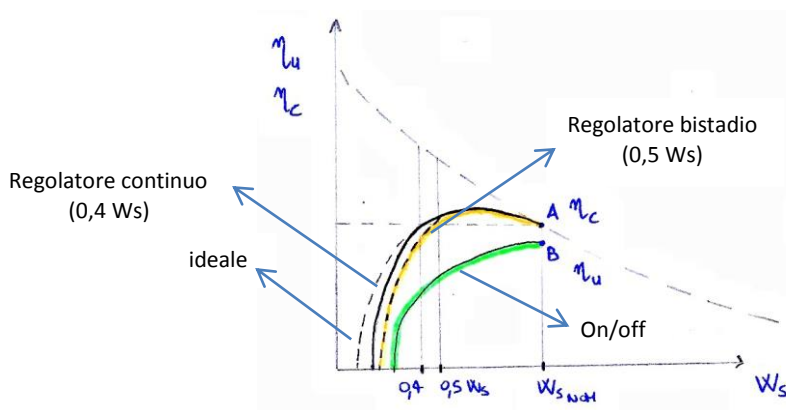
l'andamento dell'on/off. Il rendimento della combustione varia a seconda del comportamento, e quindi percentuale di potenza richiesta, del regolatore: partendo dal punto A (100% di potenza richiesta), il rendimento di combustione avrà un andamento crescente fino a raggiungere il 40%. Al di sotto del 40% avrà un andamento pressoché costante e di conseguenza, dal momento che il rendimento di combustione il rendimento non crescerà più, le prestazioni diminuiscono (si tratta di una diminuzione molto piccola ma che comunque incide sulle prestazioni, discostandole da quelle ideali).



È molto più costoso del precedente, pertanto chi l'utilizzatore deve, prima di comprarlo, valutare bene se è il caso di comprarlo, considerando:

1. Se economicamente ce lo si può permettere;
2. il costo si ammortizza lentamente, per cui è il caso di chiedersi "il mio impianto durerà almeno un periodo pari al tempo di ammortizzamento?";
3. il risparmio assoluto (ossia non %) deve essere maggiore del costo del regolatore, se no non c'è convenienza.

❖ **Regolatore bistadio:** è una via di mezzo tra i due precedenti. Tra il 50% e il 100% ha prestazioni pari al regolatore continuo, dal 50% in giù, invece, ha le prestazioni dell'on/off. Tuttavia presenta lo svantaggio che, come si vedrà nei grafici sotto, esso inizia a perdere rendimento (in proporzione alla potenza fornita) dal 50% in giù, a differenza del regolatore continuo che perde rendimento dal 40% in giù (quindi la curva tratto punto nel diagramma sarà leggermente più stretta (a dx) di quella del modulante).



POTENZA E PERDITA AL CAMINO

Potenza persa al camino (W_{cam}): è la quantità di energia termica che i fumi che escono dal camino non hanno ceduto. W_{cam} è propriamente calcolata con le seguenti formule:

1) in relazione alla portata di massa:

$$W_{cam} = \dot{m}_f * \bar{C}_{pf} * (T_f - T_0)$$

2) In relazione alla portata in volume:

$$W_{cam} = \dot{V}_f * \bar{C}_{vf} * (T_f - T_0)$$

Combustione

La combustione è una **reazione di ossidazione** di una sostanza combustibile. Tale reazione prevede che ci siano sempre due tipi di sostanze:

- ❖ il **combustibile**. È la sostanza che si ossida e, di fatto, “brucia”. Tendenzialmente sono quasi sempre C, H₂ e molecole formate da loro due (es. gli idrocarburi).
- ❖ il **comburente**. È la sostanza che ossida, ossia che “fa bruciare”, il combustibile. Noi consideriamo come comburente l'O₂ dell'aria.

Il PC è l'energia di attivazione della reazione di ossidazione per ogni molecola di combustibile. Se si considera il combustibile in termini di massa, non ci sono problemi perché, indipendentemente da temperatura e pressione, in ogni kg di combustibile, si ha sempre lo stesso numero di molecole e, di conseguenza, il PC è costante.

Se si considera il combustibile in termini di volume, allora sia la temperatura che la pressione hanno effetto sul numero di molecole presenti in ogni m³ di combustibile, e quindi sul PC. Per determinare tali impatti partiamo dalla relazione tra temperatura, pressione e volume dei gas perfetti:

$$p * V = R * T \rightarrow V = \frac{R * T}{p}$$

(R non ci interessa perché è una costante propria di ogni gas)

In relazione alla formula in funzione di V (quella sulla destra):

- se si raddoppia T e si mantiene costante la pressione, raddoppia anche V. Questo implica che con T doppio, il numero di molecole che prima stavano in un m³, ora stanno in 2 m³. Pertanto, in un m³ di combustibile, ora, avrò la metà delle molecole e di conseguenza la metà del PC → più bassa è la temperatura più molecole potranno essere contenute e, di conseguenza, maggiore sarà la quantità di molecole maggiore sarà il PC (e quindi energia).
- se si raddoppia la pressione e si mantiene T costante, allora V si dimezza. Questo implica che con pressione doppia, il numero di molecole che prima stavano in un m³, ora stanno in ½ m³. Pertanto, in un m³ di combustibile, ora, avrò il doppio delle molecole e di conseguenza il doppio del PC.

Riassumendo

- Se ↑ T, allora ↓ PC → T e PC sono inversamente proporzionali;
- Se ↑ p, allora ↑ PC → p e PC sono direttamente proporzionali.

Per evitare complicazioni, si farà d'ora in avanti riferimento ai m³ *normali* (m³_N), ossia ai m³ del combustibile a 1 bar di pressione e 0 °C (o 273,15 °K) di temperatura.

Vediamo le ossidazioni, e quindi combustioni, principali. Dal punto di vista degli elementi chimici che partecipano alla combustione, consideriamo solo carbonio e idrogeno, in quanto tutti i combustibili maggiormente utilizzati sono idrocarburi o contengono alte percentuali di questi due elementi.

Ossidazione del carbonio

Combustione “classica” del carbonio: $C + O_2 \rightarrow CO_2$

Ma anche la combustione che genera CO: $C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$

La seconda reazione non è benvenuta, essenzialmente per 2 motivi:

- CO è molto più velenoso di CO₂. Se CO si trova nell'aria per più dello 0,02%, quando la respiriamo, essa trasforma la nostra emoglobina in carbossiemoglobina, la quale non cattura l'ossigeno dell'aria, provocando così la morte;
- CO contiene meno energia di CO₂ in quanto: se si volesse ottenere CO₂ da CO si dovrebbe aggiungere $\frac{1}{2} O_2$, ma in questo verrebbe sprecata dell'energia di combustione in quanto non verrebbe sfruttata l'ossidazione fino in fondo.

Noi si parlerà esclusivamente della prima combustione.

Dove:

- “ A_t ” è l’aria teorica di cui si necessita. $A_t = 2O_2 + 2 * (3,76N_2) = 9,52 \text{ m}^3 / \text{m}_{CH_4}^3$.
- “ e ” è l’eccesso di aria, ossia la % di A_t in più che si aggiunge. Varia tra il 5% ÷ 20-40% (negli impianti moderni tra 5-10%). L’eccesso d’aria aumenta all’aumentare della difficoltà della combustione: il metano è un combustibile che “brucia bene”, è subito pronto per la combustione per cui non richiederà un elevato eccesso d’aria; se invece venisse usato un combustibile liquido, prima bisognerebbe farlo evaporare e poi reagire, si avrebbe bisogno di più ossigeno e quindi si aumenterebbe l’eccesso d’aria. L’eccesso d’aria è minimo con il metano e massimo con il carbone (ha la maggiore difficoltà di combustione).

Alla luce di ciò, la quantità di aria che servirà, sarà:

$$Aria\ necessaria = A_t + e * A_t = (1 + e) * A_t = n * A_t \rightarrow n = \text{indice d'aria}$$

Il valore di e dev’essere sufficientemente alto da consentire la completa combustione del metano, ma non dev’essere troppo alto altrimenti si otterrebbero troppi fumi e quindi vi sarebbe una maggiore perdita al camino.

Infatti, visto che la quantità di fumi per unità di volume di combustibile (\bar{V}_f , ovvero il numero di metri cubi ottenuti dalla combustione completa di un metro cubo di metano) deriva dalla parte destra della formula di combustione del metano, ossia:

$$\bar{V}_f = CO_2 + 2H_2O + 2 * (3,76N_2) + e * A_t$$

Se si aumenta e , allora aumenta anche \bar{V}_f . Ma, come visto precedentemente nella definizione di perdita al camino, se aumenta \bar{V}_f , allora aumenta anche P_{cam} . Riassumendo:

$$\uparrow e \text{ implica } \uparrow \bar{V}_f \text{ che implica } \uparrow P_{cam}$$

Esempio di calcolo con un eccesso d’aria del 10% (0,1 nella formula):

$$\bar{V}_f = CO_2 + 2H_2O + 2 * (3,76N_2) + e * A_t \rightarrow \bar{V}_f = 1m^3 + 2m^3 + 2 * (3,76 m^3) + 0,1 * 9,52 = 11,5 \text{ m}^3 / \text{m}_{CH_4}^3$$

Supponendo di avere un una capacità termica massica pari a : $\bar{C}_{pf} = 0,31 \frac{kCal}{m^3 * ^\circ C}$

$$\rightarrow P_{cam} = \frac{11,5 * 0,31 * (180 - 20)}{8600} \approx 7\%$$

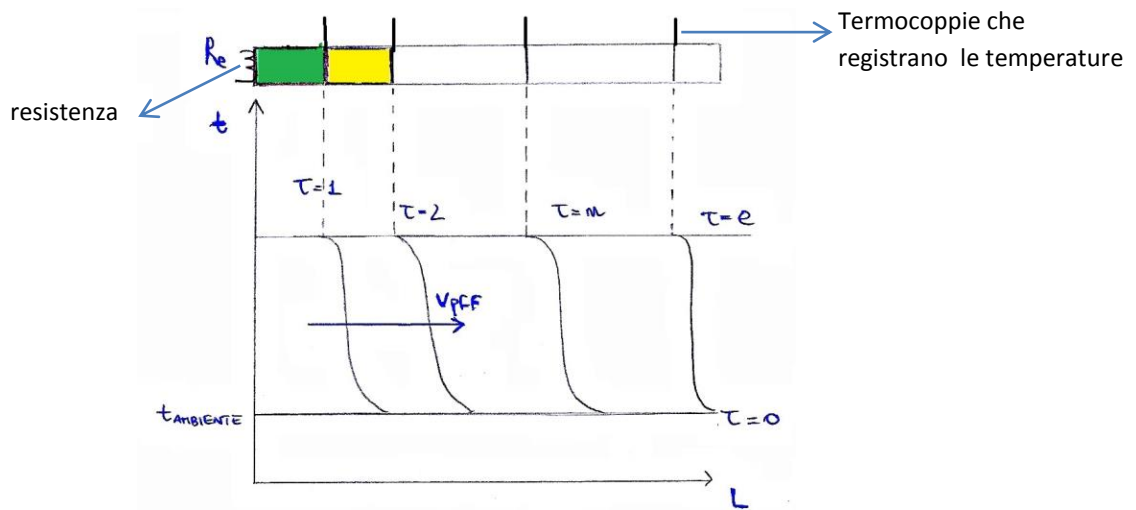
(in un impianto moderno, non sarebbe 180° ma 130°C → sarebbe un valore inferiore al 7%)

Per fare questa tipologia di calcoli, spesso è importante la % di CO₂ ; nei fumi viene misurata con strumenti che la separano dal vapore acqueo (la misurazione avviene quindi solo dopo la separazione) → fumi secchi, quindi CO₂ secca:

$$\% CO_{2\text{secca}} = \frac{1}{CO_2 + \cancel{2H_2O} + (2 * 3,76N_2) + e * A_t} = \frac{1}{1 + (2 * 3,76) + e * A_t}$$

Come avviene la combustione?

Si supponga di avere un contenitore cilindrico con una miscela di combustibile aeriforme connesso ad una resistenza elettrica, di avere un numero elevato di termocoppie che possano registrare le temperature nel tempo. Si supponga inoltre di essere a temperatura ambiente ($t_{ambiente}$ con un tempo $\tau=0$). Una volta innescata la reazione, tramite le termocoppie si possono osservare i valori e riportarli, nel seguente grafico, comprendendone l'andamento.



Durante il periodo di tempo $\tau=1$, si nota che in una zona/porzione del cilindro (zona verde) la temperatura aumenta fino a raggiungere una temperatura massima, questa zona è seguita da un'altra porzione del cilindro in cui la temperatura, dal valore massimo, scende nuovamente fino alla temperatura ambiente. La restante parte del cilindro è rimasta a temperatura ambiente.

Dopo il periodo di tempo $\tau=2$, il volume della parte del cilindro interessata dalla reazione si è raddoppiato (parte verde + parte gialla) e sarà seguito a sua volta dalla parte del cilindro che non è interessata dalla reazione, che sarà diminuita rispetto a $\tau=1$.

- Zona in cui è avvenuta la reazione (temperatura massima)
- Zona in cui avviene la reazione → **FRONTE DI FIAMMA**: è dove realmente avviene la combustione/reazione (parte della fiamma con colore più intenso, il cuore della fiamma)
- Zona non interessata dalla reazione.

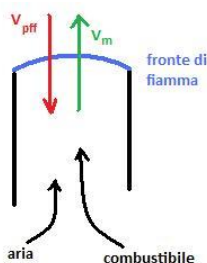
Per analizzare la propagazione della fiamma, bisogna introdurre due fenomeni fisici:

- a) v_m = velocità di propagazione del combustibile
- b) v_{pff} = Velocità di propagazione del fronte di fiamma: la reazione avviene in una zona molto piccola che si sposta, a velocità costante, in un fluido (combustibile nel cilindro) fermo nel tempo. Tale velocità dipende da due fattori:
 - Il tipo di combustibile (metano, idrogeno, gpl, ecc.: ad esempio l'idrogeno propaga la fiamma sei volte tanto rispetto al metano → $v_{pff} CH_4 = 0,5 \text{ m/s}$; $v_{pff} H = 3 \text{ m/s}$);
 - Dal tipo di fiamma: se laminare o turbolenta, a seconda del tipo varia la superficie del fronte di fiamma.

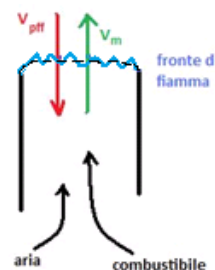
Come si nota dal grafico (fiamma laminare), le due velocità hanno direzione opposta e questo implica che per avere un fiamma stabile, le due velocità dovranno equivalersi: $v_m = v_{pff}$ (ovvero: la velocità con cui la fiamma va verso la miscela è uguale alla velocità della miscela che va verso la fiamma).

Si immagini venga considerato un condotto (tubo del gas) al cui termine viene fatto bruciare un combustibile, e si veda come varia la fiamma (in condizioni di stabilità), a seconda del tipo: se laminare o turbolenta.

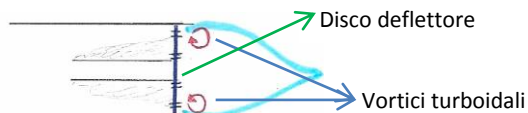
Fiamma laminare



Fiamma turbolenta



accendere la fiamma. Tuttavia, esso, essendo posizionato in mezzo alla fiamma, impedisce alla fiamma di propagarsi in modo ottimale. Pertanto, attualmente si usa un disco deflettore (disco di metallo con delle fessure attraverso cui passa la miscela), posizionato all'uscita del carburante, ossia prima della fiamma. Tale disco costituisce un ostacolo fluidodinamico per il flusso del combustibile, esso crea dei vortici turboidali che generano un microritorno di gas caldi: i vortici, tramite il loro moto circolare recuperano i gas già combusti (e quindi caldi) e se li portano indietro, "accendendo" il combustibile appena arrivato.



Riassumendo:

Fiamme premiscelate:

- distacco → limitare portata
- ritorno → quencing

Fiamme di diffusione:

- distacco → disco deflettore
- NON vi è ritorno

I bruciatori

Sono sistemi che preparano e gestiscono la combustione di combustibili liquidi, gassosi o solidi polverizzati (carbone macinato in particelle da 0,2 a 1 mm). I bruciatori permettono che la combustione avvenga senza il bisogno di sostenere meccanicamente il combustibile che, proprio per natura del proprio stato fisico (peso/densità/dimensioni), "galleggia" nell'aria indipendentemente dal fatto che sia gassoso, liquido o solido polverizzato (se liquido, viene trattato in modo tale da renderlo approssimabile a quello gassoso; se solido si comporta vagamente come quello liquido). Se la pezzatura del combustibile solido è grossa (5-10 cm), non si è in grado di farlo galleggiare nell'aria, e dal momento che, per bruciare, deve rimanere in camera di combustione per periodi molto più lunghi (30 min, non pochi secondi come il gas), bisogna sostenere meccanicamente il combustibile. In questo caso vengono utilizzate delle *griglie di combustione*, e non si parlerà più di bruciatori.

Classificazione dei bruciatori – i bruciatori possono essere classificati per:

- 1) Tecnologia:
 - Bruciatori per fiamme premiscelate o parzialmente premiscelate;
 - Bruciatori per fiamme di diffusione;
- 2) Tipo di combustibile:
 - Combustibile gassoso: bruciatori per fiamme premiscelate (tutti quelli di piccola dimensione per potenze fino a 40KW) oppure bruciatori per fiamme di diffusione (generano potenze da 20 KW a 100 MW).
 - Combustibile liquido: bruciatori per fiamme premiscelate (ormai non più usati) oppure bruciatori per fiamme di diffusione (generano una potenza tra i 20 e i 30 KW);
 - Combustibile solido polverizzato: bruciatori solo per fiamme di diffusione (in genere hanno grandi potenze);
- 3) Numero di carrozzerie:
 - Bruciatori monoblocco: tutti i componenti del bruciatore sono in un'unica carrozzeria (blocco)
 - Bruciatori non monoblocco: i componenti sono disposti in più carrozzerie/blocchi.

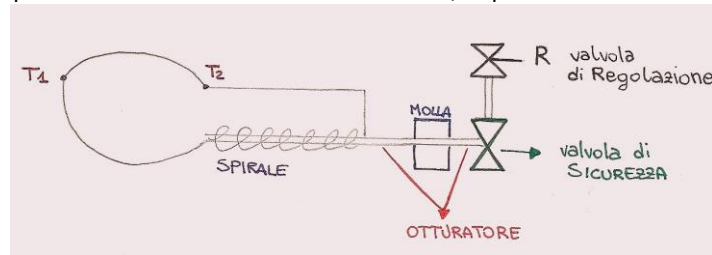
Funzioni del bruciatore

L'impianto utente necessita di avere una certa potenza, una combustione ad alto rendimento, una combustione a basso impatto ambientale, e una combustione che non sia soggetta ad esplosione o distacco.

Per tali motivi, il bruciatore deve avere delle funzioni che garantiscano:

- **Regolazione della portata di combustione**, affinché si possa regolare la portata a seconda della potenza richiesta;
 - **Regolazione della portata d'aria**, per ottimizzare la combustione (rendimento alto) e per gestire i fumi e le perdite al camino, ovvero un basso impatto ambientale (se l'aria è troppa, aumenta la perdita al camino; se invece vi è poca aria, i fumi sono più densi e quindi più inquinanti);
 - **Sistema di accensione della fiamma**;
 - **Sistema di stabilizzazione della fiamma**, affinché non sia soggetta ritorno/distacco;
- } Gestione della combustione

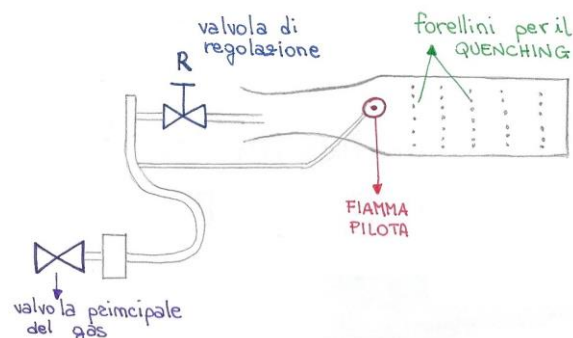
nel circuito, $i > 0$. Nel circuito della termocoppia è inserita una spirale al centro della quale si trova un'astina di materiale sensibile all'azione magnetica. All'interno di tale spirale, se percorsa da corrente, si genera un campo elettromagnetico. Quest'astina è collegata ad una valvola di sicurezza tramite un otturatore passante per una molla che tiene chiusa la valvola, impedendo il flusso di combustibile.



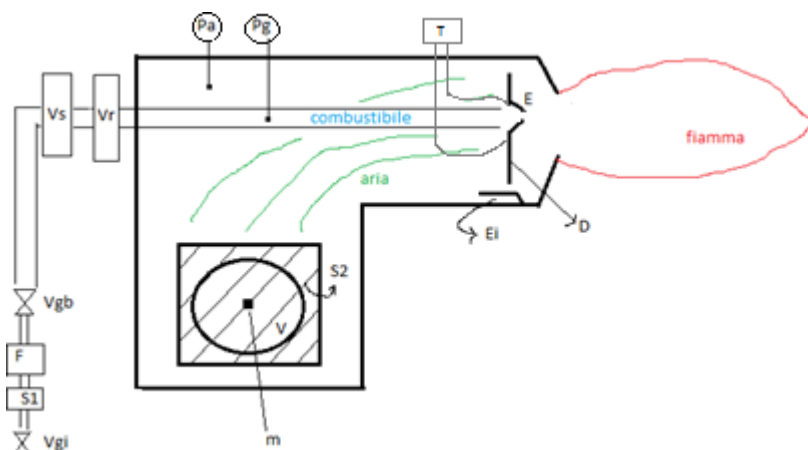
Nel momento in cui passa corrente nel circuito, il campo elettromagnetico che viene generato “tira” l’otturatore vincendo la resistenza della molla, aprendo così la valvola e liberando il passaggio del combustibile (attraverso la valvola) → se la valvola di regolazione è aperta e la fiamma è accesa, il sistema apre la valvola di sicurezza e il bruciatore funziona. Se la fiamma si spegne, nel giro di 2-4 secondi si spegne la fiamma, di conseguenza la T_1 scende e la corrente smetterà di passare nel circuito. Come non passa più corrente, il campo elettromagnetico svanisce e l’otturatore, tramite la molla, ritornerà nella sua posizione originale chiudendo la valvola di sicurezza (se la valvola di sicurezza è chiusa, non viene fatto passare il gas).

➤ Funzioni del bruciatore nel caso venga inserito in una caldaia piccola ad aria, ovvero in uno **scaldabagno**: il concetto è lo stesso, ma vi sono delle differenze:

- **Bruciatori di tipo B** (non più in commercio in Italia, ma i più utilizzati al giorno d’oggi).
 - **Regolazione portata di combustibile**: non sarà più manuale, ma avverrà tramite una valvola automatica (sistema di regolazione legato alla temperatura o portata dell’acqua dello scaldabagno), e tramite una valvola di sicurezza (a differenza di prima, il sensore T_1 non viene posizionato vicino alla fiamma principale, ma vicino a una fiamma piccola, ovvero la fiamma pilota);
 - **Sistema di accensione della fiamma**: avviene tramite la fiamma pilota, una fiamma piccola che rimane sempre accesa, anche se la valvola di regolazione è chiusa, e permette l’accensione automatica del bruciatore quando viene erogato il combustibile. Questi bruciatori devono avere un punto sempre caldo per garantire il funzionamento, la fiamma pilota appunto, che è collegata e alimentata da un tubicino indipendente dalla valvola di regolazione del bruciatore ma dipendente solo dalla valvola principale del gas. La fiamma pilota, una volta accesa, rimane accesa anche se il bruciatore è spento;



- **Sistema di stabilizzazione della fiamma**: non è soggetto a distacco/ritorno di fiamma. Nel bruciatore sono presenti numerosi forellini per garantire il quenching;
- **Sistema di controllo di ottimizzazione della combustione**: assente;
- **Sistema di controllo della sicurezza della combustione**: la fiamma pilota tuttavia è pericolosa se non affiancata da un adeguato sistema di sicurezza. È presente una termocoppia, a fianco della fiamma pilota, in grado di intervenire sul sistema che controlla la valvola principale. Se la fiamma pilota si spegne, la termocoppia dà un comando alla valvola principale di chiudersi, interrompendo il flusso di gas.

Bruciatore a gas per fiamme di diffusione (monoblocco) o bruciatore ad aria soffiata

Tutti i bruciatori a gas, producono fiamme non luminose. Questi tipi di bruciatori, sono dotati di:

- ❖ **Vgi**: *valvola generale dell'impianto (manuale)*, messa fuori dalla centrale termica (locale caldaia) per poter intervenire in caso di necessità o pericolo;
- ❖ **S1**: *stabilizzatore di pressione*, serve a tagliare i picchi di pressione verso l'alto, ovvero i picchi positivi di pressione; evita che la pressione salga troppo, ma non interviene per i cali di pressione rispetto alla pressione standard;
- ❖ **F**: *filtro*, usato per eliminare eventuali granellini di impurità (sabbia, ossido, residui di saldature, ruggine). Poiché è presente l'elettrodo di ionizzazione, la presenza di impurità nella carrozzeria potrebbe causare dei danni;
- ❖ **Vgb**: *valvola generale del bruciatore (manuale)*;
- ❖ **Vs**: *valvola automatica di sicurezza*. Posizioni possibili: tutta aperta oppure tutta chiusa. È in funzione dell'elettrodo di ionizzazione;
- ❖ **Vr**: *valvola automatica di regolazione*, regola l'entrata di combustibile necessario. A seconda della tipologia di regolazione assume posizioni diverse: se la regolazione è "on-off", la valvola può essere o aperta o chiusa; se la regolazione è "bistadio" può essere tutta aperta, semiaperta (ovvero aperta per una portata pari a metà di quella massima), o chiusa; se la regolazione è "modulante", a seconda della necessità di potenza, può essere regolabile in una posizione qualsiasi tra il 40% ed il 100% di apertura, mentre per potenze sotto il 40% può essere aperta al 40% oppure chiusa;
- ❖ **m**: *motore elettrico*, per il funzionamento del ventilatore;
- ❖ **V**: *ventilatore*, si tratta di un bruciatore ad aria soffiata e non più aspirata;
- ❖ **S2**: *serranda di regolazione (manuale o motorizzata)*, regola la quantità d'aria che entra nel bruciatore. In caso di bruciatore "on-off" assume la posizione tutta aperta se on, tutta chiusa se off; in caso di bruciatore modulante anche la serranda modula la sua posizione e quindi la quantità d'aria;
- ❖ **Pa**: *pressostato per la pressione dell'aria*, interviene in caso di bassa pressione dell'aria. Esso il blocca il bruciatore, lo spegne. Il bruciatore non può ripartire senza l'intervento manuale del manutentore (perché si parte dal presupposto che se cala la pressione d'aria, allora vi è un guasto);
- ❖ **Pg**: *pressostato per la pressione del gas*, interviene quando la pressione del gas è bassa, in tal caso spegne il bruciatore e lo lascia in una condizione di stand-by: il bruciatore è spento ma è pronto per ripartire senza alcun intervento manuale (perché si parte dal presupposto che la rete regoli la pressione);
- ❖ **D**: *disco deflettore del gas*, si trova al fondo del condotto del gas;
- ❖ **E**: *elettrodi di accensione(due)*, sono collegati al trasformatore e generano la scintilla per l'accensione;
- ❖ **T**: *trasformatore*;
- ❖ **Ei**: *elettrodo di ionizzazione*, si trova nella zona fiamma.

Funzioni del bruciatore:

- Regolazione della portata di combustione: assicurata dalla valvola **Vr**;
- Regolazione della portata d'aria: **V + S2**;
- Accensione della fiamma: **T + E**;
- Stabilizzazione della fiamma: **D** (perché non c'è il problema del ritorno di fiamma);
- Controllo ottimizzazione della combustione: assicurato dal complesso valvola **S1 + Pg + Pa**;
- Sicurezza della combustione: assicurato dal complesso **Ei + Vs + F**.

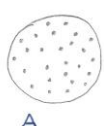
La nebbia viene creata da un procedimento meccanico, e per tal motivo si chiama **nebulizzazione meccanica** del combustibile. La nebulizzazione è ottimale se il combustibile è pressurizzato ad una certa atmosfera → il tronco di cono permette il fenomeno della “caduta di pressione”: per il gasolio, ad esempio, dev'essere tra i 10 i 12 bar; per le nafta, tra i 20 e i 35 bar. L'ugello, inoltre, svolge anche la funzione di definire la portata di massa del combustibile (come accadeva nei bruciatori a gas). Il foro di uscita dell'ugello ha una forma conica e non cilindrica poiché un angolo di uscita maggiore permette al combustibile di avere sì un flusso più breve, ma un angolo maggiore, occupando meglio lo spazio → a parità di portata, più stretto è l'angolo di uscita del foro, più ciò che esce uscirà con angolo stretto e flusso più lungo; più largo è l'angolo di uscita del foro, più ciò che esce uscirà con angolo largo e flusso più corto.



Tuttavia, la combustione dei combustibili liquidi non è totalmente aeriforme in quanto la goccia di combustibile evapora a strati, come la cipolla (prima evapora, poi brucia). Pertanto, a causa della struttura della camera di combustione, si formano delle micro particelle solide (fuliggine) che bruciando emettono nel campo del visibile. Di conseguenza, a meno che la combustione non avvenga in un tubo dove le gocce di combustibile bruciano tutte subito e non a cipolla come accade normalmente, un combustibile liquido genera fiamme luminose.

L'ugello è identificato da una serie di informazioni - nomenclatura dell'ugello:

- un numero: indica la *portata*, in molti bruciatori è ancora espressa in galloni/h (1 gallone = 4,5 litri), in altri è espressa in kg/h. Un ugello ha una determinata portata, fissa (es. 2,5): questo sistema risulta molto comodo per il sistema on/off, buono per il bistadio (in questo caso ci saranno 2 ugelli: tutti e due chiusi = 0% di portata; uno chiuso e l'altro aperto = 50% di portata; tutti e due aperti = 100% di portata), ma è scomodo per il sistema modulante (pertanto l'ugello per sistemi modulanti è più complesso). [Per i bruciatori a portata variabile, hanno la possibilità che il combustibile possa parzialmente tornare indietro → la portata di combustibile del foro sarà tanto più bassa quanto sarà più alta quella che torna indietro].
- una lettera: (es: A) indica la *distribuzione delle goccioline di liquido nella sezione della nebbia* uscente dall'ugello (ugello vuoto, pieno, universale, semivuoto, pieno speciale). A seconda della distribuzione delle goccioline cambia il lavoro del bruciatore.



Sezione A: uno cono pieno, le goccioline si dispongono in maniera uniforme nella nebbia. Sezione B: cono vuoto/senza goccia al centro → le gocce si distribuiscono sull'esterno perché così evaporano prima; quelle al centro, quando la nebbia entra a contatto con l'aria, sono le ultime ad evaporare in quanto “protette” da quelle esterne.

- un angolo alfa: è l'*angolo di uscita* (i più usati sono 45°, 60° e 75°). Esso governa la forma della nebbia in uscita. Se α è piccolo, la nebbia sarà allungata, se è grande, avrà una forma più tozza;
- Lettera o Nome: identifica l'azienda produttrice.

Tale nebulizzazione avviene solo per effetto meccanico, tuttavia vi è un altro tipo di nebulizzazione: **nebulizzazione di tipo fluido-dinamico (mediante fluido ausiliario)**. I sistemi che sfruttano questa nebulizzazione possono essere usati in sostituzione o implementazione di quella meccanica, anche se nella realtà vengono utilizzati pochissimo per la combustione del gasolio. I più comuni consistono nella:

- nebulizzazione con vapore acqueo ad alta pressione: essa prevede l'iniezione di un getto di vapore acqueo ad alta pressione nel combustibile. Quando i componenti di questa miscela, combustibile liquido e vapore, escono dall'ugello ed entrano in camera di combustione, assumono comportamenti diversi: il liquido si comporterà esattamente come prima; il vapore invece, a causa della caduta di pressione (passa bruscamente da una condizione di alta pressione, ad esempio 30 bar, ad una di pressione ambiente, 1 bar), aumenta il proprio volume di n volte (per la legge dei gas perfetti, $p \times V = R \times T$, aumenta il volume in misura proporzionale alla diminuzione di pressione, ovvero di 30 volte in questo esempio). L'aumento di volume del vapore, comprime ulteriormente il combustibile che si frammenta ancora più facilmente in tante goccioline → si ottiene così una miglior combustione.
- nebulizzazione con aggiunta di acqua liquida: una pompa porta l'acqua ad una pressione di 20 bar e, tramite un emulsionatore, si ottiene un'emulsione di acqua liquida e di nafta (intima commistione di due fluidi che non sono miscibili l'uno nell'altro). L'acqua liquida in micro goccioline evapora di colpo quando entra in camera di combustione ed il suo volume aumenta di 700-800 volte (non più per la legge dei gas perfetti, ma per la transizione di stato di fase), ottenendo lo stesso effetto del vapore acqueo, ma migliore.

Componenti del bruciatore a combustibile liquido:

- ❖ **Serbatoio**
- ❖ **B** (solo nel caso della nafta): *preriscaldatore* per ridurre la viscosità della nafta. La nafta passa da una temperatura di 20-30°C nel serbatoio, ad una di 100-130°C.
- ❖ **P**: *pompa coassiale* (è sullo stesso asse del ventilatore) di aspirazione del combustibile;
- ❖ **m**: *motore* elettrico, per il funzionamento del ventilatore;
- ❖ **V**: *ventilatore*;
- ❖ **S2**: *serranda di regolazione (manuale o motorizzata)*;
- ❖ **Pa**: *pressostato per la pressione dell'aria*, raramente presente. Il pressostato sul combustibile non è presente in quanto essendo la pressione di mandata regolata da un motore, o il motore funziona (e la pressione è giusta) o è guasto (e non c'è pressione);
- ❖ **R**: (nel caso del gasolio) *resistenza* elettrica che scalda il combustibile prima della combustione per ottimizzare la pressione;
- ❖ **Ugello**;
- ❖ **D**: *disco deflettore del gas*, si trova al fondo del condotto del gas;
- ❖ **E**: *elettrodi di accensione*, sono collegati al trasformatore e generano la scintilla per l'accensione;
- ❖ **T**: *trasformatore*;
- ❖ **F**: *fotoresistenza*.

Funzioni del bruciatore:

- Regolazione della portata di combustione: assicurata dalla pompa **P**;
- Preparazione del combustibile: **ugello**;
- Regolazione della portata d'aria: **V + S2**;
- Accensione della fiamma: **T + E**;
- Stabilizzazione della fiamma: **D**;
- Controllo ottimizzazione della combustione;
- Sicurezza della combustione: assicurata da **F** (o fotocellula UV).

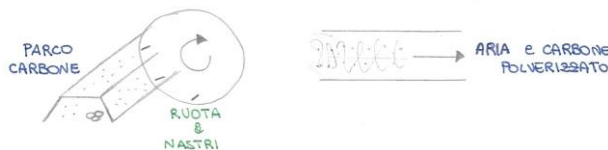
Oltre a quelle descritte, le particolarità dei bruciatori per combustibile liquido sono che:

- il tempo di prelavaggio è minore, perché minori sono i rischi;
- il tempo permesso per accertarsi della presenza della fiamma è più lungo, sia perché il combustibile liquido si accende più lentamente, sia perché anche se entra un po' più di combustibile liquido non succede granché (a differenza della probabile esplosione in caso di eccesso di gas combustibile).

Bruciatori per combustibili solidi polverizzati (0,1 - 0,8 mm)

Sono dei bruciatori utilizzati per grandi potenze, sono molto simili a quelli visti precedentemente (macchine molto simili, ma normalmente non sono monoblocco, ma presentano più carrozzerie, es. ventilatore da una parte, camera di combustione dell'altra). In questi impianti, il combustibile solido deve essere ridotto in polvere (granellini che devono galleggiare ed essere trasportati nell'aria) per poter bruciare. La combustione avviene in due fasi: prima in fase aeriforme per 10-15 secondi e poi in fase solida, dove il combustibile brucia a strati per periodi molto più lunghi (ogni granellino deve subire il fenomeno del cracking).

Filiera del carbone polverizzato: il carbone giunge nella centrale (in pezzatura grossa), viene accumulato all'aperto nel "parco carbone", si tratta di mucchi a sezione trapezoidali. Questi mucchi sono annessi ad ruota che tira su il carbone, lo porta ai nastri trasportatori che destinano, a loro volta, il carbone ai mulini di macinazione. Si ottiene così il carbone polverizzato. Il carbone polverizzato è a sua volta trasportato in un tubo con l'ausilio di un flusso d'aria calda (detta *aria primaria*) e tracce di metano (utili anche per facilitare l'innesco della combustione) alla camera di combustione.

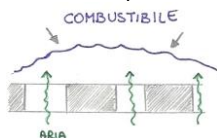


La camera di combustione in cui si sviluppa la fiamma presenta delle bocchette da cui entra altra aria: l'aria *secondaria*, che funge da comburente (insieme alla primaria) per la reazione di combustione del combustibile, e l'aria *terziaria* che serve da comburente per bruciare eventuali incombusti → se l'aria non venisse distribuita in questo modo, il carbone non brucerebbe in maniera ottimale.

Bruciatori per combustibili solidi in grossa pezzatura (1 – 10 cm)

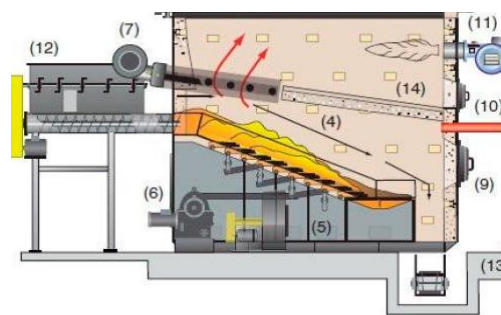
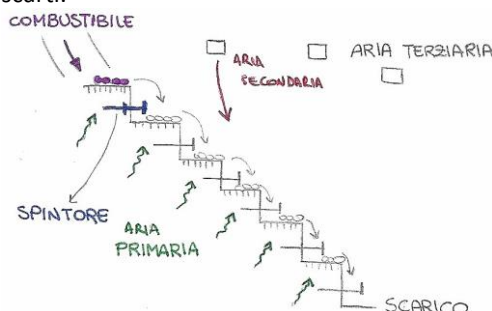
Sono dei sistemi di combustione che prevedono il sorreggimento del combustibile tramite una griglia solida → *sistemi a griglia* (la griglia migliora la combustione perché, oltre a sostenere il combustibile, permette anche che l'ossigeno arrivi da ogni direzione e non solo dall'alto). Questi sistemi, nati per la combustione del carbone in grossa pezzatura, vengono usati oggi per la combustione dei rifiuti solidi urbani (RSU) e del cippato di legno (il carbone in grossa pezzatura si preferisce macinarlo in pezzi più piccoli). Esistono diversi tipi di griglie:

- **Griglie fisse:** le più antiche tra i sistemi a griglia, ma non più utilizzate;

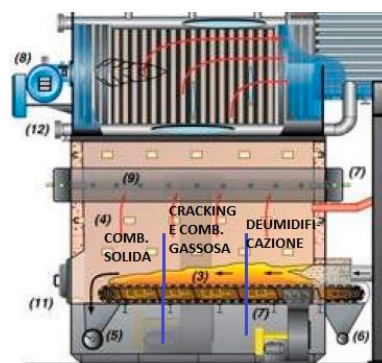
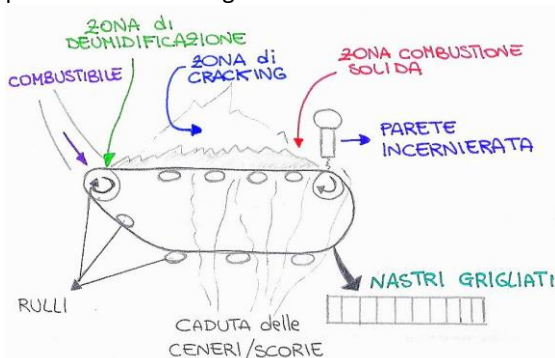


- **Griglie mobili,** che si suddividono a loro volta in due tipi:

- ❖ **Griglia a gradini:** è formata da gradini microforati (da cui passa l'aria primaria) su cui è adagiato il combustibile. Esso viene messo sul primo gradino e man mano che ne viene aggiunto, il combustibile scende lungo i vari gradini bruciando (il rotolamento del carbone ne migliora la combustione perché cambia sempre la parte esposta alla combustione). La combustione è resa possibile da un bruciatore, posto, di solito, nella parte superiore della camera di combustione, che scalda l'ambiente, permettendo al combustibile di bruciare. Sono previste bocchette sulla parete della camera per consentire l'accesso dell'aria secondaria e di eventualmente l'aria terziaria. La velocità di combustione dipende da quanto combustibile viene immesso e con che frequenza. Per velocizzare il tutto, alcune griglie presentano un sistema di spintori nella parte verticale del gradino, che se azionato spinge il combustibile sul gradino successivo. Al fondo è previsto il punto di raccolta degli scarti.



- ❖ **Griglia mobile:** consiste in un "cingolato" rotante (nastri grigliati e rulli che fanno ruotare e tengono in tensione i nastri) su cui viene adagiato il combustibile. Man mano che la griglia si muove, il combustibile subisce un certo processo. All'inizio viene deumidificato; nella parte centrale della griglia avviene il cracking e la combustione della parte gassosa liberata; infine, nella parte finale avviene la combustione solida della quantità rimasta dal cracking. Al fondo della griglia si trova di norma una parete incernierata che lascia tra essa e la griglia uno spazio sufficientemente piccolo da consentire il passaggio solo alle scorie e non al combustibile che deve finire di bruciare. La combustione è resa possibile da un bruciatore, posto, di solito, nella parte superiore della camera di combustione, che scalda l'ambiente, permettendo al combustibile di bruciare. Al fondo si trova il punto di raccolta degli scarti.



Dove:

- T_c è la temperatura isoterma critica, al di sopra della quale non può esserci acqua liquida. Ogni sostanza al di sopra di T_c diventa gas. Alla sinistra del punto di massimo, la curva rappresenta il luogo dei punti dove inizia l'evaporazione del liquido per pressioni crescenti. Infatti, se l'acqua fosse stata a 2 bar, la temperatura di transizione di fase sarebbe stata maggiore dei 100°C a cui bolle trovandosi ad una pressione di 1 bar (se fosse a 0,5 bar, ebullirebbe ad una temperatura inferiore a 100°C). Quindi, a sinistra di T_c , la curva congiunge tutti i possibili estremi di sinistra della riga arancione, a seconda della pressione considerata. Alla destra di T_c , la curva rappresenta il luogo dei punti dove il tutto il liquido diventa vapore per pressioni decrescenti. Quindi, a destra di T_c , la linea congiunge tutti i possibili estremi di destra della riga arancione, a seconda della pressione considerata.
- La riga viola/arancione corrisponde alla temperatura di **transizione di fase**. Si noti che l'acqua passa da liquido a vapore, mantenendo la stessa temperatura. Questo perché è una trasformazione isoterma (temperatura costante durante la transizione). All'estremo di sinistra della riga abbiamo l'1% circa di vapore e il 99% circa di liquido. Man mano che ci spostiamo verso destra, la % di vapore aumenta e quella di liquido diminuisce fino ad arrivare all'estremo di destra dove avremo il 100% di vapore. Solo quando avremo tutto vapore inizierà a salire nuovamente la temperatura.
- L'**entropia (S)** [un modo per misurare l'ordine di un sistema, espressa in kJ/(kg*K)] è il rapporto tra la quantità infinitesima di energia termica scambiata e la temperatura a cui si trova il fluido mentre scambia energia termica. L'entropia aumenta con il decadimento dell'energia termica.

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

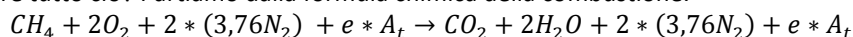
La legge dei gas perfetti dice che se si ha un volume costante, all'aumentare della temperatura, aumenta la pressione, perché le molecole si agitano e si scontrano fra di loro generando urti. Nel caso di una miscela di due gas (azoto e ossigeno) l'effetto di pressione totale sarà la somma dei singoli effetti dei due elementi, i quali agiscono come se l'altro elemento non ci fosse: le molecole di azoto "spingono" e quelle di ossigeno danno, anche loro, un contributo → i due contributi si sommano → pressione dell'azoto + pressione dell'ossigeno = pressione totale.

La pressione di ogni singolo gas (pressione parziale), che compone una miscela, è uguale alla pressione totale, moltiplicata per la concentrazione in volume (c%) del gas. Quindi per sapere la pressione parziale del vapore acqueo a pressione ambiente (1 bar): $p_{H_2O} = 1 * C_{H_2O} \%$.

Per quanto detto finora, si evince che l'acqua contenuta nei fumi non condensa a 100 gradi, ma condensa ad una temperatura più bassa rispetto a quella a cui condenserebbe se fosse a 1 bar, poiché ha una pressione più bassa → la condensazione avviene a circa 60-70 gradi.

Come già accennato, si ottiene rendimento maggiore se si condensa il vapore acqueo frutto del processo di combustione. L'obiettivo, pertanto, è quello di tirar fuori la maggior energia di condensazione dal vapore acqueo; in altri termini, bisogna recuperare l'energia termica che il vapore contiene per rimanere allo stato di vapore. Ora, guardando la curva a destra di T_c , si osserva che scendendo di pressione, la **temperatura di rugiada T_r** , definita come la temperatura a cui si forma la prima goccia di acqua liquida dalla condensazione del vapore, si abbassa. T_r ha un andamento decrescente perché man mano che si formano le gocce di acqua liquida, la concentrazione di vapore acqueo nei fumi diminuisce. Diminuendo la concentrazione, diminuisce anche la pressione parziale, e diminuendo la pressione diminuisce a sua volta la temperatura. Poiché, più la temperatura è bassa, maggiore è l'energia che si riesce a ricavare, risulta ovvio che l'obiettivo è quello di condensare alla temperatura più bassa possibile → normalmente si raffreddano i fumi fino ad una temperatura di 30°C, ricavando così una buona quantità di energia di condensazione.

Come si può ottenere tutto ciò? Partiamo dalla formula chimica della combustione.



Considerando costante la pressione dei fumi, più si aggiunge eccesso d'aria, minore sarà la concentrazione del vapore acqueo nei fumi e, di conseguenza, minore sarà la pressione parziale del vapore acqueo nei fumi. Se la pressione è minore, la temperatura di rugiada sarà più bassa e così si riuscirà a tirar fuori molta più energia dal vapore acqueo.

1. Gas di città o gas manifatturato;
2. Gas naturale (metano) e simili. Per “simili” s’intende che i vari gas naturali (le cui composizioni specifiche dipendono dal particolare giacimento da cui vengono estratti) sono intercambiabili. In questa famiglia rientra anche la miscela aria-propano che è intercambiabile con il gas naturale;
3. GPL. Il GPL è una miscela di propano e butano. Indipendentemente dalla loro concentrazione, tutti i GPL sono intercambiabili.

Gas di città (o gas manifatturato)

È un gas ottenuto dall’ossidazione parziale di altri combustibili solidi o liquidi (di solito nafta, legna, e carbone, in genere antracite o lignite) e usualmente raccolto in appositi contenitori, detti *gasometri* → metodo per gassificare combustibili liquidi o solidi e, successivamente, distribuirli come combustibili gassosi. In pratica si ottiene facendo reagire uno dei suddetti combustibili con il 20-30% dell’aria necessaria ad una combustione completa.

Ha una composizione del tipo:

CO₂	4-6%
C_nH_m	0,1-1%
CH₄	26-30%
CO	3-13%
H₂	20-35%
O₂	1-7%
N₂	17-28%
S	0,001-0,1 ppm (parti per milione)

È stato il gas più diffuso per le utenze civili (sistemi di cottura e riscaldamento) fino a 35 anni fa. È altamente inquinante, a causa dell’elevata presenza di CO.

L’idrogeno e l’ossigeno ovviamente si trovavano sotto forma di H₂O, molto importante perché garantiva la tenuta delle giunzioni in canapa da cui era costituita la tubazione attraverso cui scorreva. Le tubazioni erano in ghisa e non venivano saldate, come quelle in acciaio, ma giuntate come in figura.

La distribuzione avveniva con le seguenti caratteristiche:

- PCS: 4200 – 4500 kCal/m³_N;
- PCI: 3800 – 4100 kCal/m³_N;
- Pressione di distribuzione: 800 Pa;
- Densità: 0,6 – 0.86 kg/m³_N;
- H₂O contenuta: 8 g/m³_N.



Gas naturale

È essenzialmente metano, ma in realtà ha composizione:

CO₂	0 - 0,5 %
C_nH_m	0 - 1,5 %
CH₄	97 - 99 %
H₂O	Tracce
N₂	0,4 - 0,6 %
S	Assente

Poiché non c’è S, il gas naturale è inodore. Pertanto, è necessario aggiungere agenti odorizzanti per rilevare un’eventuale fuga.

Ha le seguenti caratteristiche:

- PCS: 9600 kCal/m³_N;
- PCI: 8600 kCal/m³_N;
- Pressione di distribuzione: 2200 Pa. La pressione non può scendere al di sotto di tale valore perché, se così fosse, entrerebbe dell’aria nelle tubazioni impedendo l’accensione. Per questo motivo, in caso di calo di pressione, esso è sostituibile dalla miscela aria-propano;
- Densità: 0,7 kg/m³_N. Essendo meno denso dell’aria, l’eventuale fuga va verso l’alto.

Premessa a Carnot

Fino alla fine del 1700 non esistevano cicli termodinamici, i primi sono nati con la macchina a vapore. Carnot capì che il passaggio da energia termica ad energia meccanica poteva essere formalizzato: teorizzò l'uso dei motori a vapore introducendo i concetti di entropia, i principi termodinamici e il principio di conservazione dell'energia. Prendiamo un condotto di lunghezza L e di sezioni S1 e S2.



Poiché in un qualsiasi sistema, l'energia totale si conserva:

$$En. globale S1 = En. globale S2$$

Il che equivale a dire:

$$dQ + dl = di + dE_{cin} + dE_{grav} + dE_{random}$$

Dove:

- dQ è la quantità di calore scambiata con l'esterno;
- dl è il lavoro scambiato con l'esterno. Il lavoro c'è solo se il fluido esercita una pressione tale sulle pareti da smuoverle (è ciò che genera il moto della turbina) $\rightarrow dl = V * dp$ (volume per variazione di pressione);
- di è l'entalpia. L'entalpia è la quantità di energia di un sistema termodinamico a pressione ed entropia costanti $\rightarrow di = (c_v * dT) + (V * dp)$
- dE_{cin} è l'energia cinetica che dipende dalla velocità del fluido;
- dE_{grav} è l'energia gravitazionale;
- dE_{random} è qualunque altra forma di energia rilevabile nel fluido.

Il complesso $di + dE_{cin} + dE_{grav} + dE_{random}$ è l'energia totale contenuta nel fluido. Nei nostri impianti, tutte le dE sono trascurabili, per cui la seconda formula diventa:

$$dQ + dl = di$$

Integrando lungo la lunghezza L del condotto, otteniamo:

$$\int_0^L dQ + \int_0^L dl = \int_0^L di$$

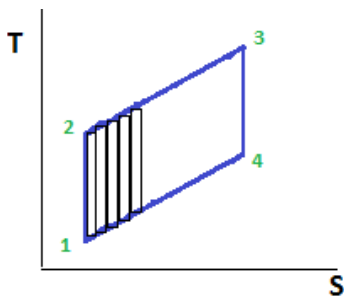
In un ciclo chiuso (non più aperto come un condotto), dove la posizione d'inizio in del condotto coincide con la fine fin , l'integrale diventa:

$$\oint_{in}^{fin} dQ + \oint_{in}^{fin} dl = \oint_{in}^{fin} di$$

Ma poiché $i_{in} = i_{fin}$, allora $i_{in} - i_{fin} = 0 \rightarrow \int_{in}^{fin} di = 0$. Sostituendo e portando a destra: $\oint dQ = - \oint dl \rightarrow$

$$\left| \oint dQ \right| = \left| \oint dl \right|$$

Il che equivale a dire che la quantità di energia termica in valore assoluto corrisponde alla quantità di lavoro, anch'essa in valore assoluto.

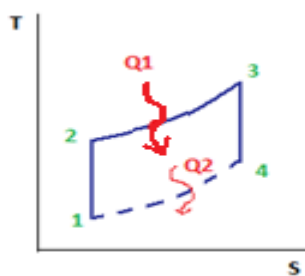


$$\eta_{generico} = 1 - \frac{T_2^* \text{ media integrale}}{T_1^* \text{ media integrale}}$$

Verranno affrontati ora i principali cicli utilizzati per convertire l'energia termica in energia meccanica o elettrica in grande quantità. I due cicli più utilizzati sono il ciclo Joule e il ciclo Rankine, entrambi con rendimenti molto bassi, il Joule ha circa il 40% e il Rankine poco più del 40%. La tendenza moderna è quella di utilizzare i due cicli in maniera combinata (cicli combinati: Joule + Rankine) ottenendo quindi rendimenti intorno al 57-58%. Ad essi si affianca un'altra soluzione, la cogenerazione: essa utilizza l'energia che normalmente verrebbe dispersa dai cicli precedenti (il 60%) per ottenere energia meccanica o elettrica, ma anche energia termica recuperata, rendendola riutilizzabile.

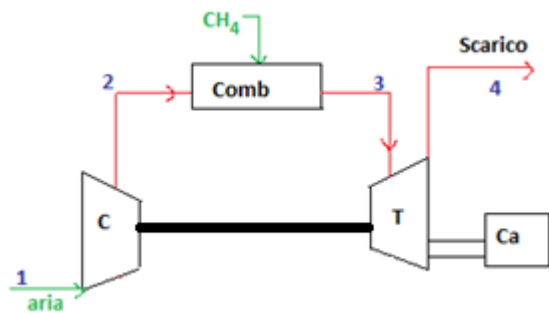
Ciclo Joule

Il ciclo Joule è ottenibile SOLO con combustibile gassoso → ciclo a gas. In tale ciclo, i fumi provenienti dalla combustione (fumi puliti e non ad altissima pressione, solo qualche bar) sono usati direttamente nel ciclo, senza bisogno che scambino l'energia termica che contengono con un fluido termovettore come l'acqua.



- Tratto 1-2: compressione isoentropica
- Tratto 2-3: fornitura di calore Q1 a pressione costante (pressione relativamente bassa)
- Tratto 3-4: espansione isoentropica
- Tratto 4-1: sottrazione di calore Q2 a pressione costante

Ciclo di funzionamento: vi è un albero su cui sono montati un compressore ed una turbina. L'aria, nel punto 1, è in condizioni ambiente; si fornisce, con il compressore, lavoro meccanico all'aria per farla arrivare a 7-10 bar (punto 2). Dopodiché, tramite fornitura di combustibile, avviene la combustione; la fornitura di calore Q1 fa arrivare al punto 3, dove si formano i fumi. A questo punto i fumi vanno in turbina e si espandono fino alla pressione ambiente (punto 4). Il ciclo Joule è un ciclo semiaperto, in quanto dopo l'espansione, i fumi non vengono raffreddati internamente allo stabilimento, ma il raffreddamento avviene all'esterno, fuori dai camini, a spese dell'ambiente.

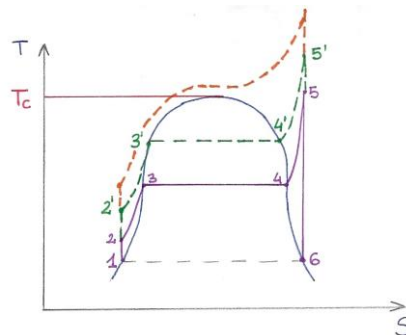


- C è il compressore;
- Comb è il combustore (camera di combustione) in cui avviene la combustione, immettendo il metano, a pressione costante;
- T è la turbina dove avviene l'espansione
- Ca è il carico che, ad esempio, converte il lavoro meccanico in energia elettrica (in questo caso si parla di *alternatore*).

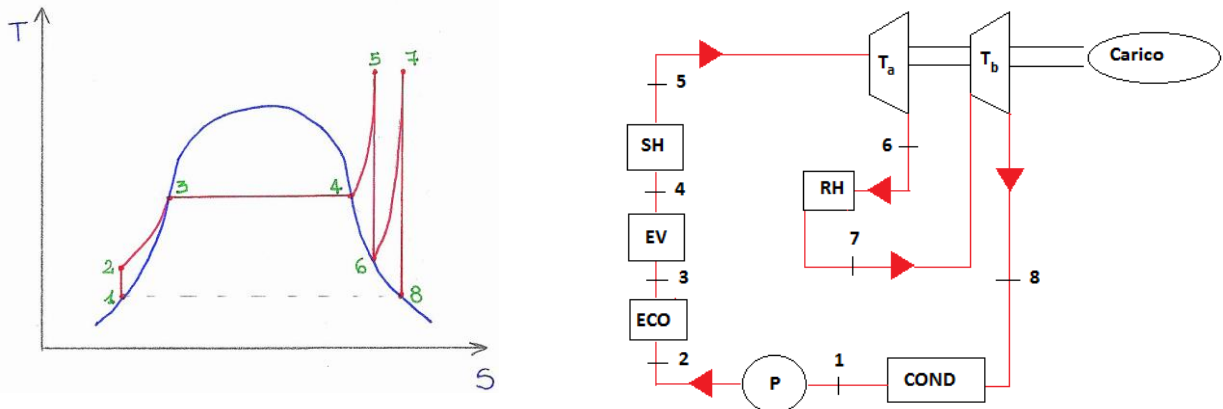
La temperatura al punto 3 (T_3) è la temperatura più alta del ciclo (1300°C) ed è quella a cui i fumi entrano nella turbina, ed essendo così alta può danneggiarne il funzionamento (a causa della dilatazione termica del metallo da cui la turbina è composta). Infatti le palette della turbina girano ad alta velocità (circa 300 giri al minuto) e non devono toccare l'involucro di contenimento, in modo tale da avere uno spazio sufficiente per assorbire la dilatazione e continuare a girare. Per risolvere il problema, al posto di costruirla in super leghe non sensibili alla dilatazione termica ma molto costose e delicate, si è pensato a dei fori alla base delle pale attraverso cui passa aria fredda che non permette alle palette di dilatarsi/deformarsi. La temperatura al punto 4 (T_4), temperatura di scarico dei fumi, va oltre



soluzione, pur essendo quella più usata attualmente, ha lo stesso problema di quella precedente: limiti dei materiali, in quanto il problema non ricadrebbe più solo turbina, ma anche su tutte le tubazioni in quanto saranno presenti fumi a pressione più alta.



- **Utilizzare un ciclo più complesso.** Tale ciclo, anziché avere una sola fase di espansione, ne ha una seconda di seguito alla prima. La prima espansione viene interrotta prima che si raggiungano basse pressioni, viene nuovamente fornita energia termica (calore) e successivamente avverrà la seconda espansione, questa volta, fino a bassa pressione. Questa tipologia di ciclo possiede una temperatura media, a cui viene fornita energia termica, più alta e per questo motivo avrà rendimenti migliori. A sinistra il ciclo, a destra il relativo impianto:



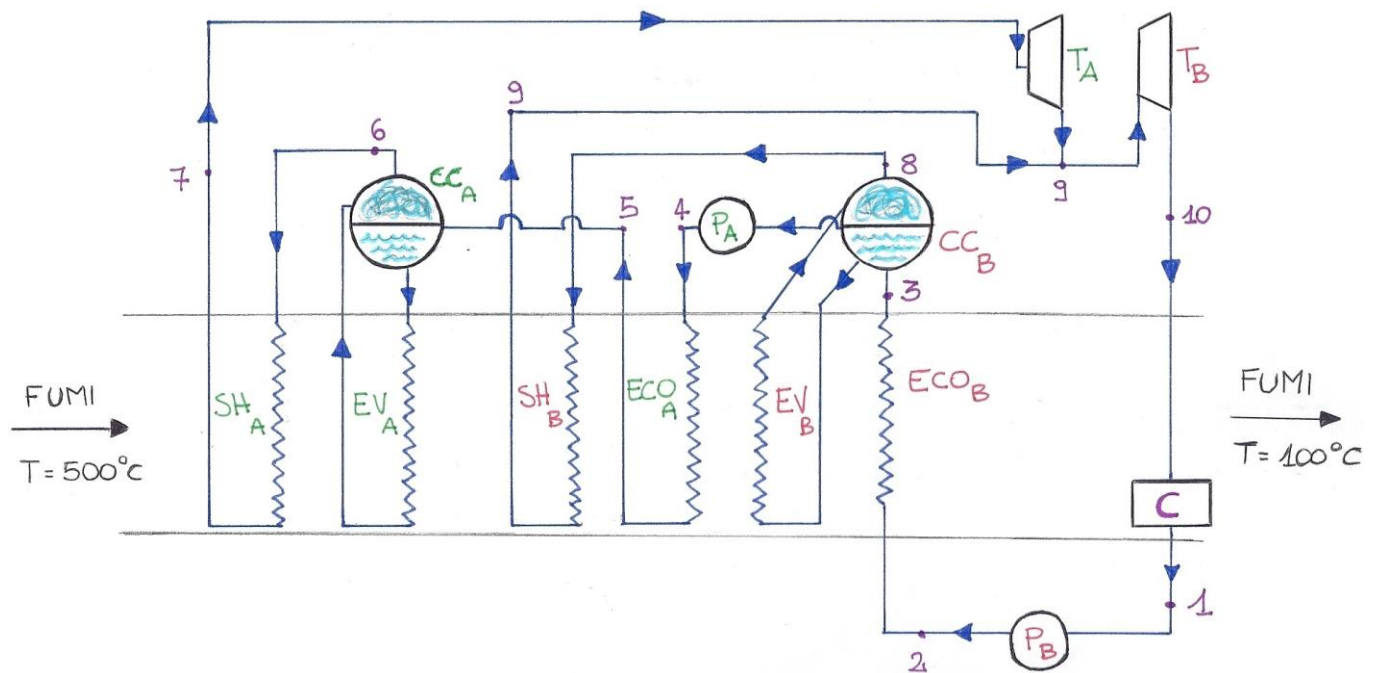
Dove:

- **P:** sistema di pompaggio dell'acqua liquida che entra a $p_1=0,04$ bar ed esce a $p_2= 100-250$ bar. [Con questi valori, i materiali subiscono il fenomeno delle scorrimento, e per evitare ciò vengono usati materiali che limitano tale fenomeno, tuttavia sono molto costosi];
- **ECO:** economizzatore che riscalda il liquido dalla temperatura T_2 a $T_3 \rightarrow$ fase di riscaldamento;
- **EV:** evaporatore che fa evaporare tutto il liquido (transizione di fase a temperatura costante, $T_3=T_4$) \rightarrow fase di evaporazione;
- **SH:** surriscaldatore (SH= super heater) che surriscalda il vapore che esce da EV \rightarrow da T_4 a T_5 ;
- **Ta:** turbina di alta pressione in cui fluisce il vapore e che ne provoca l'espansione fino al punto 6 (50-60 bar);
- **RH:** risurriscaldatore (RH= re-heater) che surriscalda nuovamente il vapore espanso fino alle condizioni del punto 7;
- **Tb:** turbina di bassa pressione, in cui fluisce il vapore risurriscaldato e che ne provoca l'espansione alla temperatura minima possibile e, di conseguenza, alla pressione minima possibile \rightarrow condizioni del punto 8 (le due turbine sono collocate sullo stesso albero);
- **COND:** condensatore che raffredda il vapore e rimette in circolo il liquido ottenuto. Il condensatore può essere ad aria o ad acqua. La soluzione migliore sarebbe il condensatore ad acqua perché maggiore è il suo potere raffreddante, ma questo implica la vicinanza dell'impianto ad un corso d'acqua. Per cui si possono usare anche quelli ad aria, che sono di 2 tipi:
 - Con ventilatori elettrici;
 - Con torri di evaporazione che sfruttano i moti dell'aria (l'acqua si condensa e l'aria, per effetto camino, sale verso l'alto) anziché ventilatori elettrici (camini enormi).

Dove:

- **1-2**: compressione a bassa pressione (P_B) del fluido (acqua) condensata al punto 1, fino alla pressione del punto P_2 . La massa che circola nell'impianto fin a questo punto, sarà detta la massa totale
 $\rightarrow P_2 \equiv P_B$; massa = m_{TOT} ;
- **2-3**: riscaldamento acqua liquida con massa = m_{TOT} ;
- **3**: la massa totale di liquido si divide in due parti: una parte diventa la massa destinata al ciclo di alta pressione (m_A) e l'altra diventa la massa destinata al ciclo di bassa pressione (m_B) $\rightarrow m_{TOT} = m_A + m_B$;
- **3-4**: sistema di pompaggio, che fa passare dalla bassa pressione all'alta pressione $\rightarrow P_4 = P_A$;
- **4-5**: riscaldamento dell'acqua liquida per la massa di alta pressione \rightarrow massa = m_A ;
- **5-6**: evaporazione della massa di liquido ad alta pressione \rightarrow evaporazione m_A ;
- **6-7**: surriscaldamento del vapore della massa ad alta pressione \rightarrow surriscaldamento m_A ;
- **7-9**: espansione nella turbina ad alta pressione \rightarrow espansione Turb_A ;
- **3-8**: evaporazione della massa di liquido a bassa pressione \rightarrow evaporazione m_B ;
- **8-9**: surriscaldamento del vapore della massa a bassa pressione \rightarrow evaporazione m_B ;
- **9**: punto cruciale dell'impianto, dove si uniscono i due cicli: le condizioni termodinamiche (pressione e temperatura) tra m_A dopo l'espansione ed m_B devono coincidere;
- **9-10**: espansione nella turbina a bassa pressione \rightarrow espansione Turb_B , $m_{TOT} = m_A + m_B$;
- **10-1**: condensazione $\rightarrow m_{TOT} = m_A + m_B$.

Lo scambiatore in realtà, è composto da due generatori di vapore collegati fra loro, i quali hanno il compito di fornire le portate in massa previste dal diagramma. Si tratta di generatori di vapore senza combustione (infatti non vi è il bruciatore), in quanto i fumi caldi arrivano direttamente dal bruciatore del turbogas. I fumi che escono dal turbogas entrano all'interno di un grosso involucro (30x50 metri circa) e lo attraversano; all'interno vi sono i due generatori di vapore:



Dove:

- ❖ **C**: condensatore;
- ❖ **P_A / P_B**: pompa di alta/bassa pressione;
- ❖ **ECO_A / ECO_B**: economizzatore ad alta/bassa pressione;
- ❖ **CC_A / CC_B**: corpo cilindrico di alta/bassa pressione (contenitore con la metà inferiore occupata dal liquido ad alta/bassa e quella superiore dal vapore ad alta/bassa pressione);
- ❖ **EV_A / EV_B**: evaporatore ad alta/bassa pressione;
- ❖ **SH_A / SH_B**: surriscaldatore ad alta/bassa pressione;
- ❖ **T_A / T_B**: turbina ad alta/bassa pressione;

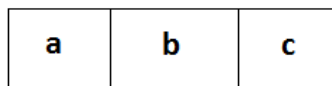
Lo scambio termico avviene con l'acqua che si trova intorno, anche se separata, ai tubi dove passano i fumi.

NB: in tutti i posti dove c'è scambio termico per convezione, si trovano tubi appesi, che permettono una lunghezza maggiore del circuito e di conseguenza una maggior superficie di scambio termico.

Circuito scaldato

Al suo interno si possono individuare tre zone:

- Nella parte a si trova il **liquido**;
- Nella parte b si trova il **vapor saturo**;
- Nella parte c si trova il **vapore surriscaldato**.



Per ogni soluzione impiantistica, il circuito scaldato è formato:

- dalla parte a, se è una *caldaia ad acqua calda*. Questo impianto genera una potenza da 10 kW a 1-2 MW;
- dalla parte a + b, di solito miscelati insieme, se è un *generatore di vapore a vapor saturo*. Questo impianto genera una potenza da 500 kW a 7-8 MW, a seconda delle dimensioni dell'impianto;
- dalla parte a + b + c, se è un *generatore di vapore a vapore surriscaldato*. Questo impianto genera una potenza da 50 a 800 MW.

Dal punto di vista dello scambio termico, ogni parte ha il suo *coefficiente di scambio termico* (h):

- $h_A = 1000 \div 2000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$
- $h_B = 5000 \div 20000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$
- $h_C = 100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$

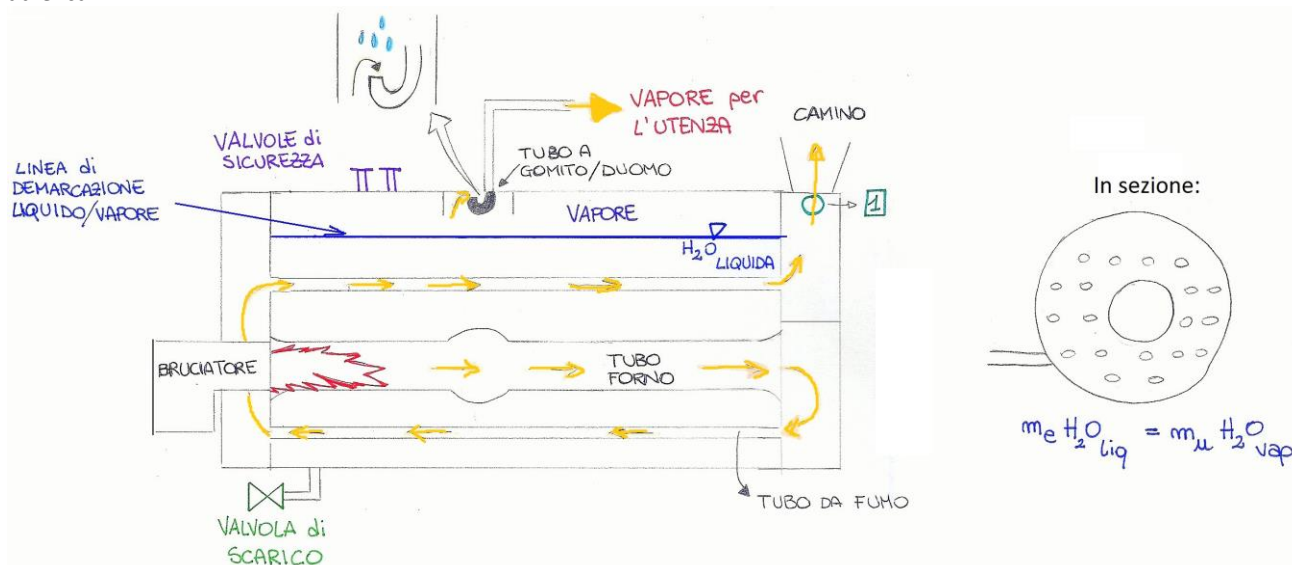
Generatori di vapore a vapor saturo (o a tubi di fumo)

Detti anche *generatore di vapore a tubi di fumo*, hanno il compito di produrre vapor saturo, quasi secco (ossia con poca acqua liquida). Sono impianti con bruciatori di combustibile liquido o gassoso, ma mai solido. Consistono di un cilindro di lamiera con diametro di 2,5 m e lunghezza 5 m. Al suo interno è presente un tubo da forno dello spessore di 30-40 cm collegato al bruciatore e da tanti tubi di diametri variabili tra 5 e 10 cm, i tubi da fumo. Tutti i tubi si trovano immersi in acqua liquida, quindi si trovano al di sotto della linea di demarcazione liquido-vapore.

A tali dimensioni corrisponde una potenza generata di 7-8 MW. Per aumentarla si può:

- aumentare la lunghezza, anche se per lunghezze maggiori di 5 m si creano scompensi di temperatura lungo il tubo;
- aumentare il diametro, anche se aumenta la forza che sfonderebbe l'involucro, visto che la forza F è data dalla formula $F = p \cdot \phi$. La p massima consentita è 7-8 bar.

Mentre per aumentare il coefficiente di scambio termico h , si usano tubolature che forzano i fumi ad assumere moto ad elica.

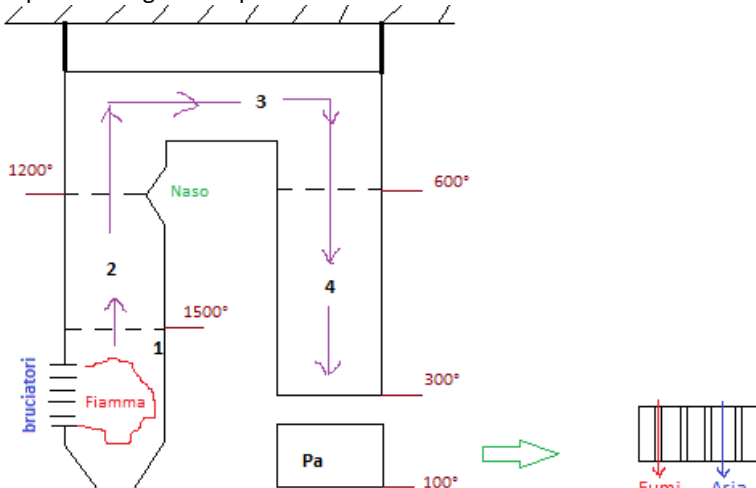


Generatori di vapore a vapore surriscaldato (o a tubi d'acqua)

Sono noti anche come *generatori di vapore a tubi d'acqua*, perché nei tubi non circolano i fumi ma acqua. Sviluppano potenze tra i 50 e gli 800 MW e gestiscono pressioni tra i 20-30 e i 250 bar. Possono essere tradizionali oppure a recupero (tipici negli impianti a ciclo combinato). Si tratta di un involucro contenente sia le strutture per il circuito lato fumi che per quello lato acqua.

Circuito lato fumi

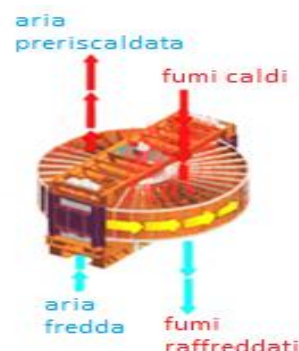
Il circuito dei fumi, non è costituito da pareti individuabili come lamiere, ma è costituito da un involucro dove tutto intorno alle pareti vi sono tubi in cui passa l'acqua → la struttura è una serie di tubi collegati fra loro. I numeri nel grafico corrispondono agli stessi presenti nel "circuito scaldante".



- Zona 1: si sviluppa la combustione, e la temperatura è costante a 1500°C;
- Zona 2: in cui avviene l'ultimo 1-2% della combustione (non vi è più fiamma), e dal momento che non vi è più generazione di energia termica, la temperatura scende a 1200°C. È presente il *naso del generatore di vapore*, attraverso il quale si convogliano meglio i fumi nelle zone successive, in cui scambieranno calore con i tubi compresenti;
- Zona 3: in cui i fumi si raffreddano fino ai 600°C;
- Zona 4: in cui i fumi si raffreddano fino ai 300°C;
- Preriscaldatore d'aria (Pa): in cui i fumi escono a 100°C. Il Δ di 200°C è quello destinato al preriscaldamento dell'aria utilizzata in camera di combustione (aria preriscaldata → miglior combustione).

Esistono due tipi di preriscaldatori d'aria:

- **Ljungstrom**: è quello più raffinato. Consiste in un grosso cilindro rotante (diametro 3-4 m, alto 2-3 m), diviso a metà longitudinalmente e a spicchi radiali formati da lamierini ondulati (sono i corpi che si scaldano e raffreddano a seconda che siano a contatto con fumi o aria). Esso ruotando intorno al proprio asse, si lascia attraversare dai fumi, che si raffreddano, e dall'aria che si scalda. Si tratta di un sistema che in mezzo giro si scalda poiché a contatto con i fumi, e nell'altro mezzo giro si raffredda, poiché a contatto con l'aria. La rotazione è molto lenta per limitare al minimo il passaggio di fumi nella zona d'aria e l'aria nella zona dei fumi, perché se così fosse, vi sarebbero problemi.
- **Tipologia meno raffinata**: costituito da una batteria di tubi (vedi disegno generatore); all'interno dei tubi passa l'aria, mentre all'esterno dei tubi passano i fumi; il motivo per cui i fumi passano all'esterno dei tubi viene spiegato dal fatto che risulta più facile pulire i tubi esternamente, piuttosto che pulirli internamente.



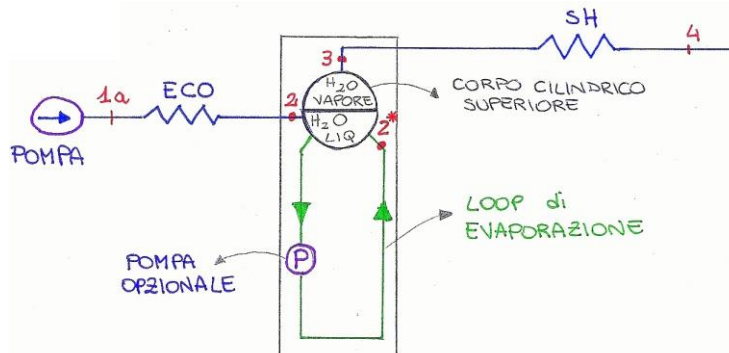
100 (h=100 per vapore surriscaldato) e, per quanto descritto precedentemente, la temperatura T_{parete} salirebbe fino a temperature elevatissime, che causerebbero il cedimento del tubo stesso. Per cui, a parità di ϕ e di T_{fluido} , se h è minore, allora la temperatura della parete sarà maggiore.

Per evitare il cedimento del tubo:

- O ci si accontenta di far evaporare l'acqua in percentuali non superiori al 10-15%
- Oppure, anziché usare tubi in acciaio al carbonio che reggono fino ai 300-400°C, si utilizzano dei tubi in acciaio inossidabile che sopportano temperature fino ai 750°C. Quest'ultimi però sono molto più costosi.

Integrazione circuito fumi e circuito acqua – Ciclo di funzionamento e impianto

Dal momento che non si può far evaporare l'acqua tutto in un solo ciclo (per i motivi sopra citati), attraverso un corpo cilindrico superiore, vengono usati più cicli con due tipi diversi di circolazione dell'acqua: naturale ed assistita (con ulteriore pompa).

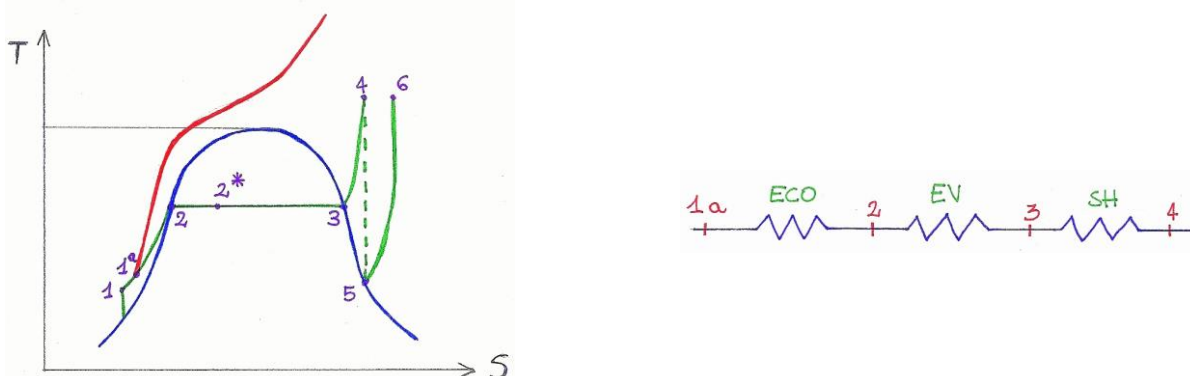


L'acqua viene spinta attraverso una pompa nell'economizzatore (ECO) che la scalda fino alla condizione 2. L'acqua arriva all'evaporatore (EV), attraversando il corpo cilindrico superiore. Quest'ultimo contiene nella sua parte inferiore acqua liquida e nella parte superiore vapore acqueo. Il corpo cilindrico superiore permette di separare l'acqua liquida dal vapore, e del vapore solo il 10-15% viene mandato al surriscaldatore (SH) (per le motivazioni precedentemente trattate): punto 2*. L'acqua liquida rimanente viene fatta mischiare con l'acqua liquida "nuova" (quella arrivata successivamente) e attraverso delle tubazioni, viene mandata alla base dell'impianto e successivamente fatta risalire. Una volta risalita l'acqua si troverà nuovamente in condizioni 2* e il 10-15% del vapore verrà fatto passare, mentre la restante parte non ancora evaporata si miscierà nuovamente, ripetendo il ciclo.

→ Questo sistema è l'evaporatore tradizionale a circolazione naturale, e questo sistema si definisce "Loop di evaporazione": l'acqua liquida fa più cicli per evaporare, e viene preso solo il 10-15% di vapore ad ogni ciclo.

Un impianto analogo a questo, per facilitare la circolazione, è quello che prevede una pompa di circolazione, e quindi si ottiene in questo modo una circolazione assistita.

Tuttavia questo metodo non lo si può realizzare per gli impianti ipercritici, che saranno caratterizzati dal seguente impianto:



In qualsiasi tipo di impianto e condizione, i tubi sottoposti a maggiore stress, causa pressione elevata, sono quelli del surriscaldatore SH. Per questo motivo vengono costruiti con acciaio inossidabile e con piccole dimensioni (solitamente diametro 4cm e spessore 0,5 cm) per riuscire a sostenere la pressione (se non fossero così piccoli scoppierebbero); inoltre vengono progettati per un funzionamento a durata, solitamente 50000 ore.

Caldaie ad acqua calda

Impianti che presentano la temperatura dell'acqua minore di 100°C, ed una pressione che varia tra 1 bar (pressione ambiente) e 4 bar (oltre 1 bar viene detta pressione idrostatica). Generano potenze dai 10 kW fino ai 500 kW, per le utenze più grosse raggiungono anche i 2-3 MW, ma le più utilizzate sono quelle che vanno tra i 50 e i 300 kW. Sono impianti usati tipicamente usati per il riscaldamento domestico e si dividono in due macro categorie:

- 1) A condensazione: prevedono la condensazione dei fumi;
- 2) Senza condensazione: non prevedono la condensazione dei fumi.

Sono caldaie molto simili ai generatori di vapore a tubi di fumi. Si suddividono ulteriormente in due categorie:

- Caldaie in acciaio: introdotte a partire dagli anni '60, resistono di meno nel tempo e costano di meno rispetto a quelle in ghisa. Si tratta di pezzi monoblocco;
- Caldaie in ghisa: sono ancora in commercio, fino agli anni '60 erano fatte solo in ghisa. Resistono di più nel tempo e costano di più. Sono costituite da tanti blocchi/pezzi che possono essere facilmente essere smontati e sostituiti.

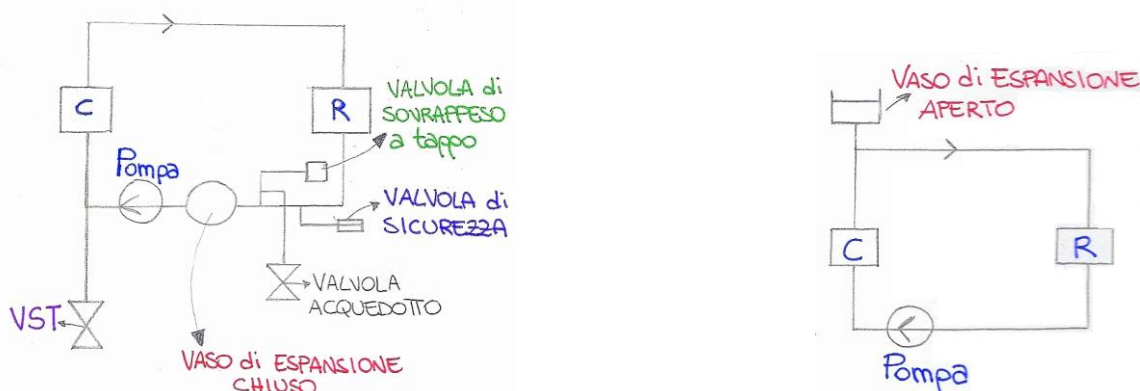
Problema della sicurezza nelle caldaie ad acqua

Il problema della sicurezza è dettato dall'espansione del volume del fluido che, a causa dell'aumento di temperatura e pressione, si dilata. Tale espansione provoca delle pressioni altissime sui tubi che contengono il fluido, rischiando di provocare un'esplosione e rottura dei tubi. Per questo motivo in questo tipo di impianti bisogna creare dei sistemi di compensazione, per regolare la pressione dovuta alla dilatazione del liquido → Negli impianti moderni è presente un vaso di espansione chiuso che possiede una membrana, che viene deformata in caso di necessità: il vaso è diviso in due parti dalla membrana, da una parte abbiamo l'acqua liquida e dall'altra un gas (N₂). All'aumentare del volume dell'acqua, la membrana compensa comprimendo il gas.

A questo sistema di sicurezza, inoltre, devono essere aggiunte due valvole:

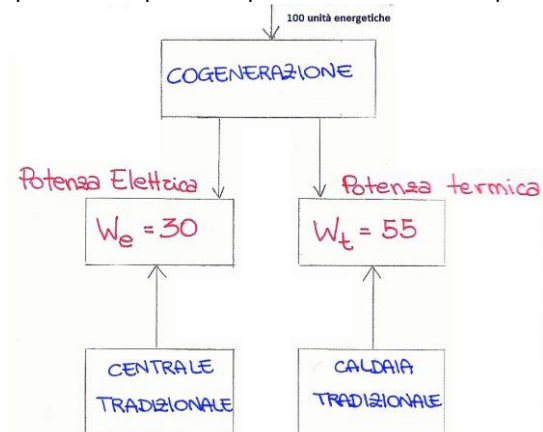
- 1) Valvola di sovrappeso a tappo, che viene posizionata al difuori del vaso di espansione, per evitare che lo possa influenzare;
- 2) Valvola di Scarico Termico (VST), che normalmente si trova nella condizione di chiusura: quando l'acqua arriva a 90°C, prima che intervenga il sistema di sicurezza, questa valvola si apre e l'acqua a 90°C scende in fognatura, abbassando così la temperatura generale del sistema poiché viene immessa nell'impianto nuova acqua fredda proveniente dall'acquedotto.

Per il combustibile solido questo chiaramente non funziona. La legge italiana infatti non permette di utilizzare vasi di espansione chiusi, ma solo vasi di espansione aperti che entrano direttamente in contatto l'atmosfera esterna, scongiurando possibili esplosioni.



In alcuni impianti inoltre sono presenti i turbolatori: si tratta di un'elica posta all'interno del tubo dei fumi che permette di aumentare il coefficiente di scambio. Questa strumenti funzionano bene per combustibili gassosi, per il petrolio più o meno, mentre per le naftè è prevista una pulizia mensile.

Ipotesi - Per produrre potenza elettrica W_e e potenza termica W_t , vi sono due modi:



- Se viene utilizzata una centrale tradizionale, con un rendimento $\eta = 42\%$, per produrre 30 quando viene speso?

$$W_e = \frac{30}{0,42} = 71,4 \text{ unità energetiche}$$
- Se si vuole produrre energia termica con una caldaia tradizionale, con $\eta = 95\%$, quanta energia si spende?

$$W_t = \frac{55}{0,95} = 58 \text{ unità energetiche}$$

Quindi se combino i due cicli e sommo le energie spese, per produrre 30 unità di energia elettrica e 55 di energia termica, vengono spese 129 unità. Con la cogenerazione invece ne vengono spese 100 totali per la produzione di queste due energie, motivo per cui la cogenerazione risulta molto più vantaggiosa/conveniente. Per cui il risparmio sarà dato da: $R = \frac{129-100}{129} = 22,5\%$.

In questi impianti spesso si parla di Risparmio di Energia Primaria (PES). Per definirlo bisogna prima definire il rendimento totale della cogenerazione:

$$\eta_{cog} = \frac{\text{Energia elettrica cogenerata} + \text{energia termica cogenerata}}{\text{portata di combustibile}} = \frac{E_{cog} + Q_{cog}}{\dot{m}_b \cdot H_i}$$

dove $E_{cog} + Q_{cog}$ rappresentano l'effetto utile.

Viene definito il risparmio in termini di energia chimica la differenza che c'è tra:

$$\Delta \dot{m}_b \cdot H_i = \left(\frac{E_{cog}}{\eta_{et}} + \frac{Q_{cog}}{\eta_{tt}} \right) - \dot{m}_b \cdot H_i$$

$$\rightarrow PES = \frac{\Delta \dot{m}_b \cdot H_i}{\left(\frac{E_{cog}}{\eta_{et}} + \frac{Q_{cog}}{\eta_{tt}} \right)} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{E_{cog}}{\eta_{et} \cdot (\dot{m}_b \cdot H_i)} + \frac{Q_{cog}}{\eta_{tt} \cdot (\dot{m}_b \cdot H_i)} \right)}$$

Esprimendo il tutto con i valori precedenti: $\rightarrow PES = 1 - \frac{1}{\left(\frac{30}{0,42 \cdot 100} + \frac{55}{0,95 \cdot 100} \right)} = 22,5\%$.

La cogenerazione viene assimilata a fonti di energia rinnovabili perché permette di ottenere un risparmio energetico, ovvero sfrutta meno energia, in particolare di tipo fossile.

Solitamente un Impianto a cogenerazione è composto da:

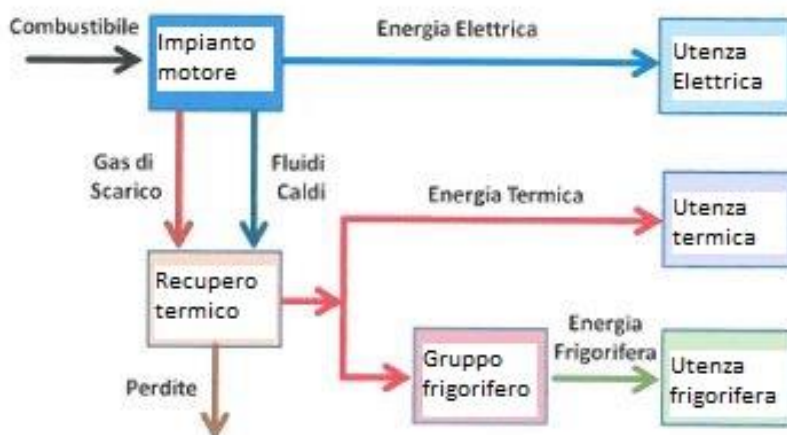
- Motore primo, i quale a sua volta si può distinguere in:
 - Motori che vengono appositamente costruiti per sfruttare la cogenerazione (motori industriali);
 - Motori a combustione interna, specialmente quello automobilistico, che risultano adatti ad essere trasformati in sistemi di cogenerazione (per potenze più basse).
 - Impianti a turbogas: sono gli impianti che hanno in massimo rendimento, prossimo al 90%. Presentano una serie vantaggi: basso costo per unità di potenza installata, elevata prontezza alle variazioni di carico, flessibilità a carichi parziali, bassi costi di manutenzione e avviamento anche in assenza di energia elettrica. Ma anche degli svantaggi: elevati costi di gestione perché utilizzano combustibili pregiati e il rendimento si riduce molto con carichi parziali.
- Generatore elettrico;
- Impianto motore;
- Recuperatori di calore. Esistono diverse tipologie di recupero e utilizzazioni:

La trigenerazione: è un particolare campo dei sistemi di cogenerazione che, oltre a produrre energia elettrica, in consente di utilizzare l'energia termica recuperata dalla trasformazione termodinamica, non solo per scaldare, ma anche per produrre energia frigorifera, ovvero acqua refrigerata per il condizionamento o per i processi industriali, fino alla temperatura di -60 °C → Energia trigenerazione = E elettrica + E termica per scaldare + E termica per raffreddare.

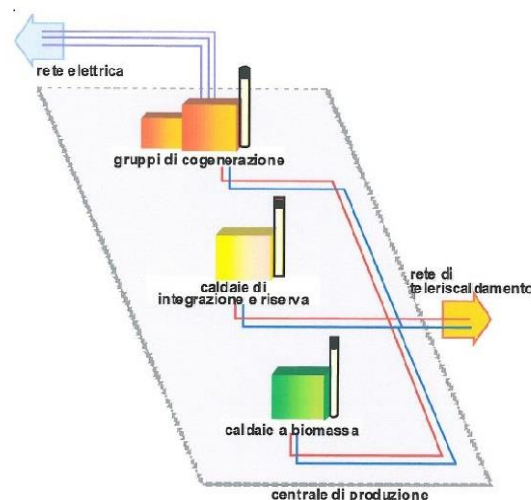
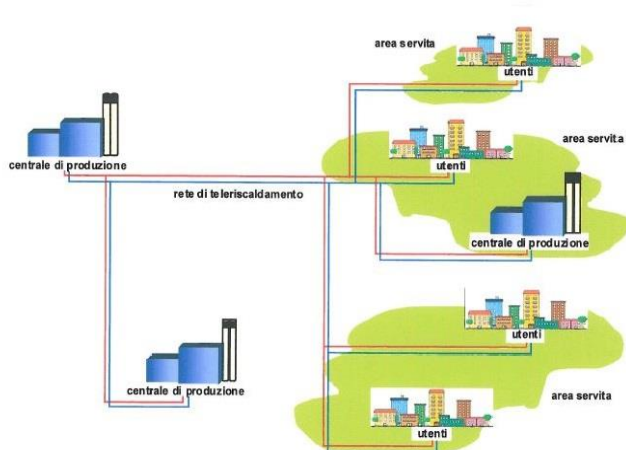
Esistono due tipi di cicli frigoriferi: i cicli frigoriferi inversi (con compressore) e i cicli frigoriferi ad assorbimento (non utilizzano un compressore ma una pompa ed energia termica).

Questo sistema non può essere usato per impianti a termosifone, ma per impianti di condizionamento che sono in grado di gestire sia acqua calda che fredda.

Schema di trigenerazione:



Il teleriscaldamento: è un sistema che, sfruttando gli impianti di produzione e di cogenerazione, permette di produrre e distribuire energia termica a varie tipologie di utenze: principalmente residenziale (60%), terziario (35%) ed industriale (5%). Inoltre esso permette di avere le centrali di produzione di fluidi caldi, centrali di grandi dimensioni, non necessariamente vicine alle utenze in quanto sono collegate da tubi sotterranei. Ciò permette la costruzione di impianti periferici di grandi dimensioni, e quindi con rendimenti maggiori, e una migliore gestione dal punto degli impatti ambientali, poiché l'inquinamento non avviene al di fuori dei centri abitati. Chiaramente, per poter sfruttare il teleriscaldamento, bisogna essere predisposti di riscaldamento centralizzati (in caso di condomini residenziali) e dell'allacciamento alla rete.



Convenienza e rendimento di un impianto

Per il calcolo della convenienza di un impianto, si utilizzano dei criteri di valutazione economica che prendono in considerazione il tasso di rendimento interno (dell'investimento, ovvero quanto l'investimento rende in funzione dei risparmi) e lo confrontano con il costo del denaro in banca, ovvero l'interesse bancario, oppure con il tasso di rendimento di investimenti di altro tipo.

J = tempo di rientro dell'investimento, che chiaramente non può essere superiore alla vita dell'impianto;

I = investimento;

R = risparmio annuo;

$$\rightarrow J = \frac{I}{R}$$

Questo sarebbe il tempo di rientro dell'investimento se non vi fosse il problema degli investimenti composti, ovvero se non ci fosse la variazione negli anni. Per calcolare propriamente il tempo di rientro dell'investimento bisogna modificare la formula precedente con:

- n = numero di anni che si tengono in esame, che dovrà essere più basso del numero di anni di vita dell'impianto, e correlati al fatto che l'impianto sia funzionante;
- i = tasso di rendimento interno;

$$\rightarrow J = \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n}$$

Inoltre il risparmio R bisogna considerarlo, non solo in termini di gasolio, benzina, ecc, ma anche come risparmio in termini energetici (E) meno l'extra costo di manutenzione (M)

$$\rightarrow R = E - M = (C_e - C_e') - (C_m' - C_m)$$

La prima parentesi rappresenta il valore che viene risparmiato usando meno combustibile, mentre la seconda il valore che viene speso ogni anno in più per la manutenzione. Tutto questo sarebbe valido se ci muovessimo in un contesto di costi complessivi costanti, ma in realtà vi è un incremento del costo reale del carburante, che non ha lo stesso incremento dell'inflazione, ovvero l'incremento del costo reale del carburante è più alto dell'inflazione. Se il costo del carburante aumenta, anche il rendimento dell'investimento aumenta perché, a parità di ogni altra considerazione, aumenta la quantità risparmiata per l'acquisto di un combustibile più caro (in altre parole: se in questo momento si risparmia 10 quando il combustibile costa 1, se il combustibile sale a 2 aumenta di conseguenza anche il risparmio. Si ricorda che si sta considerando il costo dell'investimento dell'impianto, non il costo di funzionamento dell'impianto).

→ Bisogna considerare i': $i' = (1+r) \cdot (1+i) - 1$ se $i' > i$ allora il risparmio aumenta.

Inoltre l'incremento del costo della manutenzione rispetto all'inflazione è diverso all'incremento del costo del carburante rispetto all'inflazione. Per cui bisogna utilizzare:

- r = incremento in più rispetto all'inflazione del costo del carburante;
- r_m = incremento in più rispetto all'inflazione del costo della manutenzione;

$$\rightarrow r' = \frac{(E+M)r - Mr_m}{E}$$

In questo modo si tiene conto sia del Δ del costo del carburante, sia del costo della manutenzione:

$$\rightarrow i' = (1+r') \cdot (1+i) - 1$$

ESEMPIO: Si suppone di investire 1000 euro, il risparmio per ogni 1000 euro investito è sul carburante di 230 euro, l'extra costo di manutenzione è di 25 euro, considerando un orizzonte temporale di 8 anni; l'incremento del costo del carburante rispetto l'inflazione è del 3%, mentre l'incremento del costo della manutenzione rispetto l'inflazione è del 7%.

I = 1000€; E = 230€; M = 25€; n = 8; r = 3%; r_m = 7%.

$$r' = \frac{(230-25) \cdot 0,03 - 25 \cdot 0,07}{230} = 2,57\%$$

$$R = 230 - 25 = 205 \quad J = 1000/205 = 4,88$$

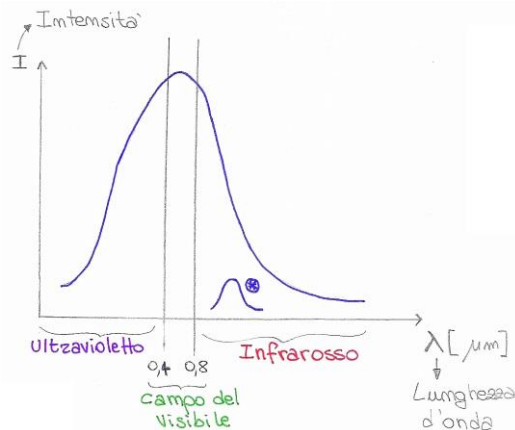
Noto J, bisogna trovare i, quindi si guarda la tabella sulle dispense, guardare la riga degli anni ed estrapolare il valore in percentuale. → i=13%.

$$\rightarrow i' = (1,0257) \cdot (1,13) - 1 = 15,95\%$$

Conclusione: se il denaro in banca costa meno del 15,95%, si può sostenere l'investimento (supponendo che la banca dia i soldi per effettuare tale investimento).

Concetti e approfondimenti:

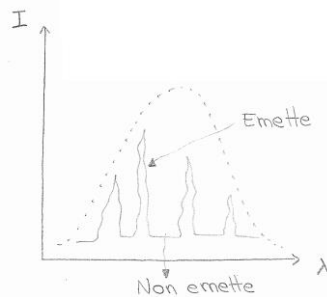
Qualsiasi corpo a temperatura superiore a 0° Kelvin, (-273,15°C) emette una radiazione elettromagnetica per effetto termico (più è caldo, più emette) → spettro di emissione dei corpi solidi:



Un corpo solido non emette energia uguale a tutte le lunghezze d’onda, ma presenta un picco e poi scende. La luce solare ha il picco del campo del visibile (tra 0,4 e 0,8 micron).

Ma se un corpo solido si trova ad alta temperatura, il suo spettro di emissione cambia: è molto più basso (emette molto di meno) ed è tutto spostato verso le lunghezze d’onda infrarosso (asterisco nel disegno).

I gas invece non emettono in modo continuo, ma emettono in alcune lunghezze d’onda e in altre no → si tratta di uno spettro di emissione a righe/bande. Inoltre, per le lunghezze d’onda dove il gas non emette radiazioni elettromagnetiche, allora non ne assorbe, è come se il gas non ci fosse.



EFFETTO SERRA: il grosso della radiazione solare arriva direttamente sulla Terra perché ha un lunghezza d’onda che l’atmosfera (gas) non assorbe. La Terra è un corpo solido che assorbe tali radiazioni e le riemette però con una diversa lunghezza d’onda (essendo un corpo ad alta temperatura, avrà, come spettro di emissione, quello con l’asterisco nel grafico precedente). Tali emissioni della Terra vengono assorbite dall’atmosfera che, a sua volta, le riemette verso la Terra. Più la Terra manda verso l’atmosfera, più quest’ultima si scalda e rimanda verso la Terra, aumentandone la temperatura globale.

Tuttavia vi è una parte di radiazioni che l’atmosfera non emette verso la Terra, ma all’esterno verso lo spazio tramite la finestra atmosferica (si tratta di un “buco” causato dal vapore acqueo che non riflette e quindi lascia passare lunghezze d’onda che vanno dai 9 agli 11 micron). L’incremento dell’effetto serra dovuto all’immissione di metano, CO₂, gas di impianti petroliferi, va ad assorbire anche le lunghezze d’onda che normalmente passano attraverso la finestra atmosferica. In altre parole è come se la “tappassero” → aumenta la quantità che torna indietro e quindi aumenta anche la temperatura terrestre.

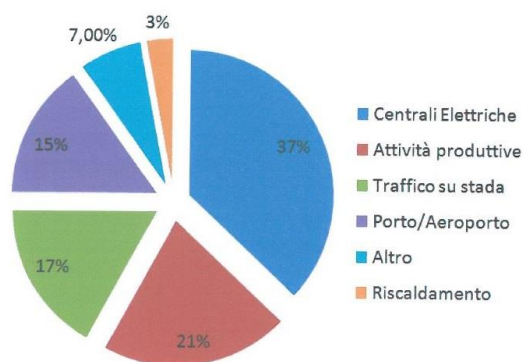
L’ozono (O₃) è distribuito nella parte alta dell’atmosfera, i gas frigoriferi hanno la capacità di attaccare l’ozono e trasformarlo in ossigeno, ma se manca l’ozono, che serve ad assorbire certi tipi di radiazioni ultraviolette, possono nascere fenomeni cancerogeni gravi per la popolazione della Terra.

- Sostanza: se si tratta di sostanza velenosa; il concetto di veleno è collegato alla dose: sono sostanze velenose quelle che assunte in piccolissime dosi generano danni molto gravi;
- Forma: le polveri che presentano una forma allungata, filiforme, sono più facilmente inglobabili dal nostro organismo e sono molto più pericolose rispetto a quelle tonde in quanto alterano/danneggiano maggiormente le funzioni dell'organismo.

Le patologie legate all'inquinamento da polveri sottili sono l'asma, le affezioni cardiopolmonari e la diminuzione delle funzionalità polmonari. La mortalità indotta dalle polveri sottili è stimata dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) allo 0,5% dei decessi annuali.

Le emissioni delle polveri sottili possono vengono ridotte tramite i *filtri antiparticolato*: essi riducono del 95-99% le emissioni in massa delle particelle, del 90-95% le emissioni in numero del particolato e tali riduzioni interessano tutto lo spettro dei diametri delle particelle.

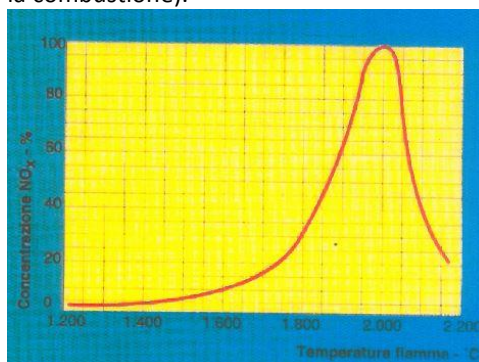
Principali generatori di particelle:



Ossidi di azoto - NO_x

Ne esistono di tre tipi:

- NO_x prompt: è legato all'eccesso d'aria, tuttavia rimane incontrollabile e viene prodotto in piccolissime quantità;
- NO_x fuel: si tratta di azoto legato organicamente con il combustibile, es: gasolio olio combustibile carbone. Anche su questa tipologia risulta impossibile intervenire;
- Nox thermal: sono legati alla concentrazione dell'ossigeno durante la combustione e dal tempo di permanenza dell'aria ad una temperatura di fiamma superiore ai 1200°C. Si ottengono abbattimenti di tali emissioni fino al 60-70% abbassando la temperatura della fiamma o diminuendo la % di ossigeno (in percentuali sempre da garantire la combustione).



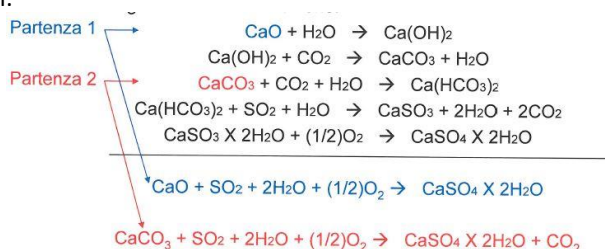
Sistemi per diminuire emissioni di NO_x:

1. Ricircolazione dei fumi (gas mixing): la circolazione di fumi consiste nel diluire l'aria comburente con i gas in uscita dalla caldaia; così facendo si abbassa la pressione parziale dell'ossigeno, riducendo la velocità di combustione e si aumenta la concentrazione di gas inseriti, diminuendo la temperatura di fiamma. → Si prendono gas di scarico che sono caldi, li si miscela con l'aria di combustione prima di mandarla in combustione, ma la % di ossigeno diminuisce;
2. Mild combustion (tecnica di combustione dolce): consiste nel far ricircolare una parte dei prodotti della combustione per reintrodurli nella zona di fiamma. Il risultato è un processo di combustione senza fiamma, o meglio senza fiamma visibile, in quanto la reazione di combustione avviene comunque, ma partendo da temperature già elevate. Tutto ciò comporta degli effetti benefici sulla formazione di inquinanti, specialmente degli NO_x grazie all'abbattimento dei picchi di temperatura tipici della combustione

consistono nel fare interagire l'anidride solforica o solforosa con composti di calcio (calce spenta, calcare, calce idratata) dando così luogo a fanghi acidi di zolfo (il prodotto finale di questa reazione è gesso). Nella maggior parte dei processi è prevista la scarica controllata dei fanghi o delle polveri.

I processi di desolfurazione si distinguono in:

- Processi ad umido ("Wet scrubbing"): sono i sistemi più utilizzati e i più efficienti, possono asportare oltre il 90% degli SO₂ degli esausti. In questi processi il gas attraversa un separatore ad umido con una miscela acquosa di calce e/o calcare con l'aggiunta di solfito e solfato (gesso) di calcio (entrambi in forma idrata). L'anidride solforosa presente nei gas reagisce e forma a sua volta in solfito e solfato (gesso) di calcio che vengono riciclati.



Tuttavia, i processi di desolfurazione ad umido hanno il problema principale della possibile formazione di incrostazioni e di ostruzioni degli ugelli nella torre di reazione. Inoltre tale sistema comporta anche rischi di inquinamento del suolo e richiede ampie ed attrezzate superfici di stoccaggio.

- Processi a secco ("Dry scrubbing"): riguarda la desolfurazione dei fumi. Anch'essa utilizza la calce che viene spruzzata per formare gesso dagli SO₂ dei gas di scarico. In questo modo non si ha mai condensazione: le particelle iniettate solidificano e vengono rimosse mediante un sistema di rimozione del particolato (filtri a manica solitamente). Le particelle raccolte vengono poi riciclate. Il materiale di scarto è allo stato secco pulviroloso e perciò più facilmente smaltibile rispetto al residuo dei sistemi ad umido. L'efficienza di tali sistemi è però inferiore di quella dei sistemi ad umido, vengono asportati percentuali inferiori dell'80%, infatti l'applicazione risulta vantaggiosa soltanto nel caso di utilizzo di combustibili a ridotto tenore di zolfo.

Energie rinnovabili

Delle fonti rinnovabili, l'unica non legata al sole è la geotermia, in quanto dipende solo dal nucleo terrestre. Verranno trattate ora le tipologie di energia rinnovabile.

Energia IDROELETTRICA

Si tratta di uno dei più antichi metodi di produzione dell'energia, si tratta dell'utilizzo dell'energia dell'acqua come forza motrice. Consiste in un primo passaggio in cui l'energia contenuta in un flusso d'acqua viene convertita in energia meccanica di una turbina. Questo può avvenire a seconda di due fattori: salto (a seconda del salto abbiamo quantità diverse di energia potenziale contenuta nell'acqua) e portata (volume del flusso d'acqua). L'energia idroelettrica si ottiene da fonti che possono avere un salto elevato e una portata/flusso di piccole dimensioni, oppure da fonti che presentano un salto piccolo ed una portata elevata.

Prima di essere energia idroelettrica si trattava di energia idromeccanica che, tramite i mulini, veniva prodotta e destinata a macchinari per la macinazione oppure trasferita a dei macchinari (per farli partire). Con lo sviluppo dell'energia elettrica, a questi sistemi furono collegati degli alternatori, che non sono altro che i sistemi utilizzati oggi. In Italia fino agli anni 50 era molto utilizzata, poi vi fu un calo e negli ultimi 15 anni si sta cercando di spingere nuovamente in questa direzione. Il settore idroelettrico genera, in Italia, circa il 15 % dell'energia elettrica totale.

In Italia sono presenti prevalentemente impianti a bassa portata ed alto salto (a causa della presenza delle Alpi) → si tratta di impianti che sfruttano l'energia potenziale dei corsi d'acqua, la convertono in energia cinetica che a sua volta viene convertita in energia meccanica alla turbina. Nel caso di grandi portate e piccoli salti: l'energia potenziale diventa energia meccanica alla turbina (le turbine di questi impianti, dal punto di vista dei principi fisico, sono uguali alle eliche delle navi ma con procedimento opposto).

Salto: quando la risorsa più importante è il salto idraulico (differenza di quota dei flussi). Può variare da qualche metro a 1500 m. Esso può essere:

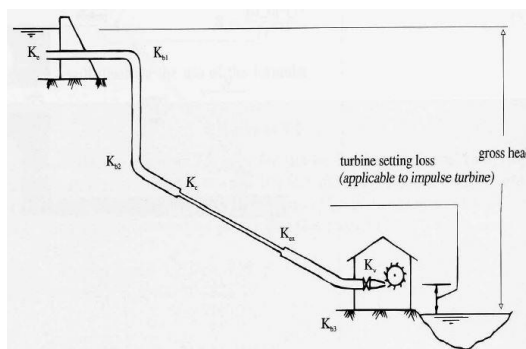
- Salto lordo o geodetico (H_{lordo}): è la differenza di quota tra la superficie liquida all'estremità del rigurgito di ritenuta a monte della presa e la superficie liquida nella sezione del corso d'acqua dove ha luogo la restituzione. Per i piccoli salti (< 10 m) può ridursi significativamente al variare della portata (andamento stagionale) → quando il salto è molto piccolo, ciò che conta per la produzione di energia è la portata d'acqua; quando invece il salto è molto elevato, ciò che conta per la produzione di energia è il salto stesso;
- Salto utile netto o salto motore (H_{net}): salto effettivamente utilizzato dalle turbine al netto delle perdite di carico nelle opere di presa e di trasporto (canali, condotte) → è quello tra il punto in cui viene prelevata l'acqua e il livello della superficie a cui viene restituita (livello del fiume/lago/mare);
- Salto legale o di concessione: differenze di quota (in metri) tra i due peli liberi dei canali a monte e a valle del meccanismo motore.

Per effettuare stime sulla potenza installabile e sulla producibilità è necessario calcolare il salto netto. Si devono valutare le perdite, che possono essere:

- Distribuite H_{cp} : per attrito nelle condotte in pressione;
- Concentrate H_{con} : dovute alle curve delle tubature, ai cambiamenti improvvisi di sezione (allargamenti o restringimenti dei tubi), valvole (ovvero all'ugello che porta acqua alla turbina) etc. si tratta di perdite di velocità o pressione dell'acqua che si convertono in piccole quantità di calore;
- Relative alle opere di presa e derivazione: $H_{\text{der}} + H_{\text{gr}}$;
- Turbine setting losses: perdite di settaggio della turbina H_{tsl} .

$$\rightarrow H_{\text{net}} = H_{\text{lordo}} - (H_{\text{cp}} + H_{\text{con}} + H_{\text{der}} + H_{\text{gr}} + H_{\text{tsl}})$$

La perdita di carico (k, anziché H):



IMPIANTI IDROELETTRICI:

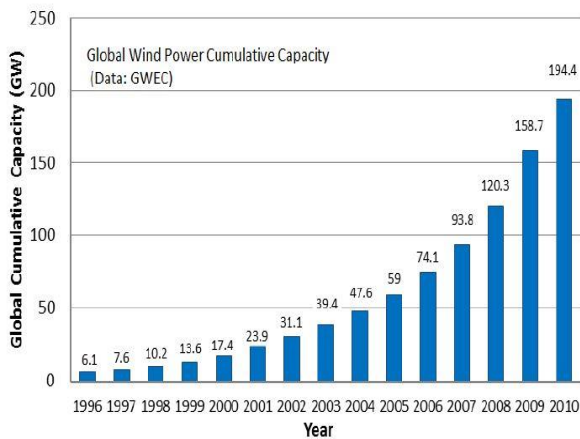
- Impianti ad acqua fluente: in questi impianti non vi è nessuna capacità di regolazione degli afflussi d'acqua. La portata sfruttata coincide con quella disponibile nel corso d'acqua, fino al limite consentito dalle opere di derivazione. Il corso d'acqua viene fatto passare all'interno del nostro sistema senza turbare la portata del flusso. Essendo completamente dipendenti dalla portata del flusso naturale, se c'è tanta acqua si riesce a raccogliere molta energia, se poca se ne raccoglie poca;
- Impianti a deflusso regolato: si tratta di impianti che presentano invasi alla presa del corso d'acqua allo scopo di adottare la portata utilizzata dalla centrale rispetto a quella del flusso naturale in un certo arco di tempo; ovvero permettono di regolare la portata in base alle necessità. Si dividono in:
 - Impianti a bacino: si hanno modeste quantità d'invaso. La portata viene regolata su base per lo più giornaliera o settimanale;
 - Impianti a serbatoio: impianti muniti di capacità d'invaso tali da consentire il trasferimento stagionale di volumi idrici e quindi della relativa produzione. Permettono di immagazzinare l'acqua e poi regolarne il flusso a seconda della necessità e delle condizioni meteorologiche. Sono le classiche dighe di montagna;
 - Impianti di accumulazione mediante pompaggio: sono impianti che prevedono due serbatoi alle estremità. Uno a monte e l'altro a valle. Di giorno permettono di sfruttare il salto del flusso d'acqua come un normale impianto, la notte invece, riportano l'acqua nel bacino a monte (sistema inverso) per poi poterla riutilizzare nei giorni successivi (l'energia utilizzata viene acquistata durante la notte, si tratta di energia a basso costo proveniente principalmente dagli esuberi delle centrali nucleari francesi → comprando, sfruttano energia a basso costo per produrne una di maggior pregio (anche se in quantità minori a causa delle perdite del ciclo) che viene fornita/venduta nelle ore di massime richieste).

Esistono diverse tipologie di turbine che vengono sfruttate negli impianti idroelettrici, il cui utilizzo varia in base al salto e alla portata del corso d'acqua. Le più comuni sono:

Turbina		Salto (metri)	Portata (m ³ /s)	Potenza (kW)	η _{max}	Cut-off (in %)
Pelton	<ul style="list-style-type: none"> 1 getto 2 getti 4 getti 	50-750	0.05-4	fino a 10 MW	0.85	20-10
Spiral Francis (con voluta a spirale)	otto modelli con differenti velocità specifiche	5-170	0.2-20	fino a 10 MW	0.90	40-50
Open-flume Francis (senza voluta a spirale)	<ul style="list-style-type: none"> F92 F97 	1-10	1.5-30	fino a 2 MW	0.85	40-45
Turbine assiali tubolari (TAT)	<ul style="list-style-type: none"> doppia reg. semplice reg. 	2-25	1.5-150	fino a 10 MW	0.85	20-30
Turbine a Bulbo (PIT)	<ul style="list-style-type: none"> doppia reg. semplice reg. (girante) semplice reg. (distributore) 	1.5-8	3.5-120	fino a 4 MW	0.89	30-80
Turbine ad "S"	<ul style="list-style-type: none"> doppia reg. semplice reg. (girante) semplice reg. (distributore) 	4-15	5-100	fino a 15 MW	0.92	30-80

Energia EOLICA

Si tratta di un settore che nell'ultima decade ha subito l'incremento maggiore rispetto a tutte le altre tipologie di energia, tanto a livello mondiale quanto a livello di singoli continenti.



Un generatore eolico è un apparato che trasforma l'energia cinetica del vento in energia elettrica, ovvero consiste nell'intercettazione dei venti tramite delle pale collegate ad una turbina (come i vecchi mulini a vento). I normali generatori eolici ad asse orizzontale di potenza superiore al MW hanno un'efficienza del 40-50%, ma i piccoli generatori ad asse verticale (adatti per essere installati sul tetto di un edificio) non superano il 30%. Dal punto di vista energetico italiano, il settore eolico copre circa il 4% della produzione totale dell'energia elettrica.

In generale, i generatori eolici funzionano per velocità del vento superiori a 4-5 m/s e hanno una durata di circa 15-20 anni (i costi dell'investimento si recuperano in circa 8 mesi). Inoltre maggiore è l'altezza dal suolo delle pale, maggiore risulta la velocità del vento e dunque, a parità di altri fattori, l'energia prodotta. Chiaramente il vento non è un elemento fisso e costante, ma vi sono zone in cui vi è maggiore possibilità che si manifesti, zone in cui possa avere un comportamento abbastanza costante. Tali zone però dovrebbero presentare un vento che non sia né troppo debole, né troppo forte. Gli impianti eolici dovrebbero essere installati in luoghi in cui vi sia un flusso di vento non turbolento, non disturbato (da case o foreste, quindi in zone pianeggianti e prive di ostacoli) e sia il più possibile costante durante l'anno. Le turbine eoliche non vengono mai installate singolarmente, ma in gruppo. Vengono costruiti così i parchi

- ad asse verticale: esistono da secoli, ma oggi trovano applicazione soprattutto in zone urbanizzate di tipo residenziale o industriale. Vengono utilizzate meno nelle zone aperte perché, non utilizzando un’alta torre, non si avvantaggiano della maggior velocità del vento che si incontra ad altezze dal suolo più elevate. Questa tipologia di torre presenta dei vantaggi: non necessita di una torre e non necessita del controllo di imbardata. Tuttavia hanno anche svantaggi: hanno una bassa efficienza, sfruttando basse velocità del vento hanno basse potenze, hanno bisogno di un sistema di avvio (il vento essendo poco veloce, non è sufficiente per azionarle) e richiedono cavi di tesaggio.

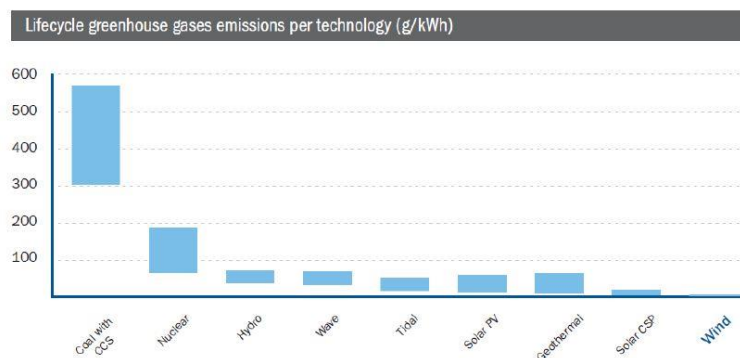


A livello di disponibilità economica, “conviene” mettere un impianto grande rispetto a due piccoli, perché avrebbe un’efficienza maggiore. Indicativamente, una turbina da 2 MW costa intorno ad un milione e mezzo di euro.

Agli impianti eolici sono associati dei problemi ambientali che tuttavia sono inferiori rispetto a quanto vengono stimati:

- Il rumore: il rumore in genere non è udibile ad una distanza superiore ai 300m ed è dello stesso ordine di grandezza del rumore di fondo (alberi);
- Hanno effetti sui prezzi del terreno? Secondo il report statunitense del dipartimento di energia, stilato nel 2009, non sono presenti prove statistiche che valorizzino la tesi secondo cui gli impianti/progetti eolici cambino il valore del terreno;
- Impattano la fauna volante? Pare che la mortalità annua degli uccelli, dovuta agli impianti eolici, non superi i 30000 esemplari l’anno. Mentre il tasso degli uccelli uccisi dagli edifici/costruzioni/finestre sia pari a 550 milioni di esemplari l’anno.
- Danneggiano l’impatto visivo/panoramico, ma portano dei benefici alle comunità locali? Innanzi tutto offrono posti di lavoro per la manutenzione delle turbine, possono essere affittati i terreni destinati ad ospitare i parchi eolici e le tasse locali e regionali possono migliorare i servizi.

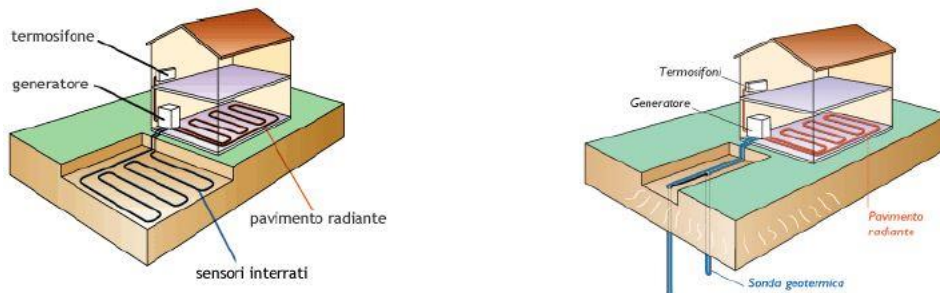
Inoltre le emissioni di CO₂ da impianti eolici, sono le più basse di tutto il settore energetico:



- Uso diretto - sfrutta lo scambio termico diretto con l'aria. L'aria di rinnovo viene prelevata dall'esterno e inviata all'interno di condotti orizzontali interrati ad una profondità di 1-2 metri:
 - In inverno si ha il pre-riscaldamento dell'aria di rinnovo: se fuori ci fosse una temperatura di -10°C , gli impianti di riscaldamento dovrebbero scaldare da -10°C a 20°C . Preriscaldando l'aria, la si porta a 10°C e quindi gli impianti devono spendere meno energia per portarla a 20°C → risparmio economico;
 - In estate si ha l'immissione diretta in ambiente o il pre-raffreddamento dell'aria di rinnovo che verrà mandata nelle macchine frigorifere. Vigge lo stesso concetto usato d'inverno ma al contrario. Gli apparecchi devono raffreddare l'aria dai $30-35^{\circ}\text{C}$ a $18-20^{\circ}\text{C}$. Preraffreddando l'aria con il passaggio nel terreno (che chiaramente d'estate sarà più freddo dell'aria esterna) le macchine dovranno spendere meno energia perché l'aria esterna sarà a temperature inferiori a $30-35^{\circ}\text{C}$;
- Uso indiretto – sfrutta lo scambio termico indiretto attraverso una pompa di calore. La pompa di calore utilizza come sorgente termica il terreno anziché l'aria esterna, ha il compito di innalzare la temperatura di una massa di fluido spendendo energia elettrica. A seconda della stagione in cui ci si trova, il funzionamento della pompa cambia: di inverno lavora esattamente come detto finora, in estate invece usa un ciclo frigorifero inverso. In questa maniera si ottengono temperature maggiori in inverno e minori in estate, con conseguenti migliori efficienze della macchina. Questo ciclo con la pompa di calore, dal punto di vista dell'utenza, risultano molto vantaggiosi ed efficienti perché spendono un'unità per il funzionamento della pompa e riescono a ricavare 3-6 unità di energia (varia a seconda dell'impianto).

Tipologia di circuiti per lo scambio termico con fonte geotermica a bassa entalpia:

- Circuito aperto: sono impianti che utilizzano l'acqua della falda come fluido, con remissione dell'acqua nella falda stessa o in fognatura dopo l'utilizzo;
- Circuito chiuso: sono impianti accoppiati con il terreno attraverso un sistema di tubazioni estese in orizzontale, verticali o a spirali al cui interno scorre il fluido termovettore.



La geotermia ha un contributo energetico molto basso, in quanto quella a bassa entalpia ha bassi rendimenti e quella a grande entalpia è troppo costosa e non è stata ancora del tutto esplorata.

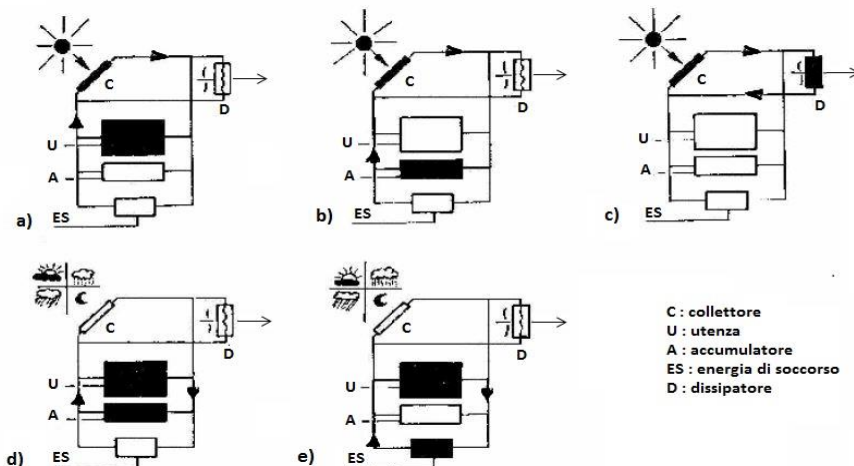
Energia SOLARE

È lo sfruttamento dell'energia elettromagnetica che arriva sulla Terra da parte del Sole, tramite i raggi solari. Si divide, a sua volta, in:

- ❖ **Solare termico** in cui si trasforma energia elettromagnetica in energia termica. Esso si divide in:
 - Solare termico a basse temperature; si tratta dei classici pannelli solari;
 - Solare concentrato/ solare termodinamico (alte temperature): non vengono più utilizzati dei pannelli piani, ma vengono usati degli specchi parabolici molto estesi che concentrano l'energia elettromagnetica in alcuni punti. In questi punti sono presenti strumenti che permettono di ottenere vapore a circa 500°C . questi specchi sostituiscono i generatori di vapori tradizionali, sfruttando proprio la concentrazione dell'energia elettromagnetica che generano riflettendo i raggi solari.
- ❖ **Solare fotovoltaico**: è una forma di solare in cui si converte energia elettromagnetica proveniente dal Sole in energia elettrica, ma con un rendimento molto basso, pari al 15%. Nelle giornate molto soleggiate si riesce anche ad ottenere il 30%, ma facendo la media con i rendimenti delle giornate poco soleggiate e con i rendimenti durante la notte, si ottiene appunto solo il 15%.

- A letto di pietre (per sistemi ad aria) – Vantaggi: nessun problema di isolamento e congelamento, semplicità costruttiva, grande superficie di scambio. Svantaggi: ridotto calore specifico (1/4 dell'acqua), grande volume, necessità di filtrazione dell'aria, scambiatori supplementari nel caso di produzione di acqua calda;
- A sostanze chimiche.
- Per durata:
 - Giornaliero;
 - Stagionale: l'energia solare viene accumulata nei mesi estivi e utilizzata nei mesi invernali (ciò è possibile solo dove la differenza di temperatura tra inverno ed estate è bassa). Può essere integrato da un sistema a pompa di calore per evitare temperature e dispersioni troppo alte.

5 tipi di funzionamento diverso dell'impianto solare:



- a) L'energia che arriva viene subito utilizzata;
- b) Tutta l'energia che arriva viene accumulata;
- c) L'energia che arriva non può essere usata o accumulata → viene dissipata sotto forma di energia elettrica;
- d) Ricevendo poca energia solare, si sfrutta esclusivamente quella precedentemente accumulata;
- e) Non arrivando molta energia, quel poco che arriva viene utilizzata direttamente e per soddisfare il fabbisogno energetico vengono utilizzati gli impianti ausiliari, come la caldaia tradizionale.

Come visto dall'esempio di funzionamento e), vi sono casi in cui il solare non è sufficiente per soddisfare la richiesta di energia. Per questo motivo, l'impianto solare viene utilizzato solo per il preriscaldamento dell'acqua proveniente dalla rete e ad esso viene associato un impianto ausiliario, che può essere: una caldaia tradizionale, una resistenza elettrica (sconsigliabile in quanto consuma molta energia) o una pompa di calore.

Altri componenti dell'impianto solare sono la pompa (che provvede alla circolazione del fluido termovettore), il vaso di espansione, gli scambiatori (collegati direttamente al collettore) e valvole per garantirne l'efficienza e la sicurezza.

Impianti solari termici a basse temperature – Possono essere classificati in:

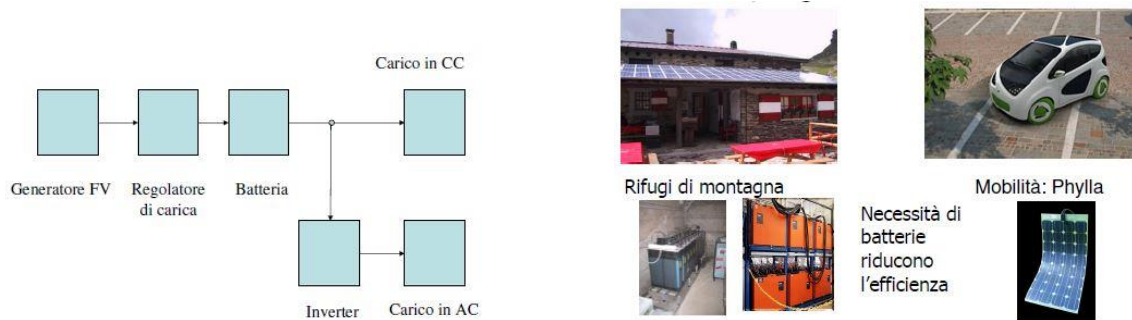
- Sistemi diretti (a circuito aperto): sono sistemi ad anello aperto in cui il fluido termovettore e quello utilizzato dall'utenza coincidono (ad es. sistemi di riscaldamento ad aria + collettori ad aria; oppure i sistemi ad acqua calda sanitaria (ACS) + collettori ad acqua). Presentano i vantaggi di essere più efficienti (temperatura media più bassa) e sono meno costosi. Gli svantaggi sono invece rappresentati dalla formazione di calcare e dalla possibilità di congelamento del fluido;
- Sistemi indiretti (a circuito chiuso) – A loro volta si distinguono per la tipologia di circolazione:
 - A circolazione naturale: utilizzati principalmente dalle piccole utenze e permettono l'autoregolazione e l'accumulo integrato (sul tetto);
 - A circolazione forzata (per grandi utenze): affinché possano funzionare correttamente devono avere uno scambiatore interno, uno scambiatore esterno (a piastre) e un vaso d'espansione.

Principali applicazioni del solare:

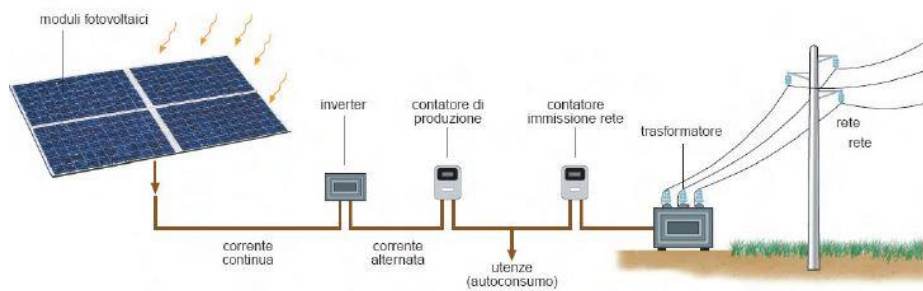
- Acqua calda sanitaria (ACS): il solare viene utilizzato per la necessità di coprire la discontinuità dell'offerta di energia e sfasamento domanda-offerta. Gli impianti per soddisfare questa necessità prevedono la presenza di un sistema di accumulo e di un sistema ausiliario (integrativo). Per le piccole utenze vengono appunto usati i sistemi a circuito aperto, per le grandi invece quelli a circuito chiuso. Questi sistemi garantiscono una buona copertura media annua, che si aggira intorno al 40-60%. Sono sistemi utilizzati per fornire ACS in: condomini, alberghi, scuole, ristoranti e mense, stabilimenti industriali, conventi e collegi, case di cura e ospedali;

I sistemi fotovoltaici possono essere:

- ❖ **Stand-alone:** sistemi indipendenti, non connessi alla rete. Vengono impiegati per alimentare una batteria tramite un regolatore di carica. Inoltre è anche prevista la presenza di un inverter che ha il compito di modificare la corrente, da continua ad alternata, o per cambiarne la tensione e frequenza a seconda della batteria da caricare;



- ❖ **Grid connected:** direttamente connessi alla rete → l'utenza è quindi collegata sia ai pannelli fotovoltaici sia alla rete elettrica. Se la produzione dell'impianto non è sufficiente per soddisfare il bisogno energetico, l'utenza si fornisce direttamente dalla rete. Se invece l'impianto, oltre a coprire il proprio fabbisogno energetico, produce un esubero di energia, vende quest'esubero immettendolo direttamente nella rete elettrica.



Da questi sistemi, in alcuni casi si è passati ai cosiddetti Building Integrated Photovoltaics (BIPV): si tratta di pannelli fotovoltaici direttamente inseriti nella struttura di edifici (possono costituire pareti/tetti).



I principali costruttori di componenti per i sistemi fotovoltaici sono aziende cinesi che però utilizzano delle tecnologie mediocri e ormai in fase di superamento (paradossalmente la Cina è il primo costruttore, ma uno scarso utilizzatore dei sistemi fotovoltaici). Inoltre il mercato è in mano alle celle di prima di generazione, che però risultano anche essere le più care, motivo per cui il fotovoltaico necessita di sussidi.