

# **Analisi Termodinamica e Termoeconomica di un Organic Rankine Cycle accoppiato a pompa borehole per applicazione geotermica a diversi tenori di $CO_2$**

Negli ultimi anni è diventato sempre più importante il problema dell'inquinamento e del riscaldamento globale, che ha imposto all'economia globale nuovi modelli energetici. Questi problemi sommati a questioni sempre più urgenti come la sicurezza degli approvvigionamenti energetici e la disponibilità di fonti fossili limitate nel tempo ha spostato l'attenzione internazionale sulle energie rinnovabili. Tra le varie fonti di energia rinnovabile è stata analizzata la geotermia, che ha raggiunto una buona maturità tecnologica. L'energia geotermica è una risorsa rinnovabile sostenibile, molto interessante in quanto non è ostacolata dai problemi comuni delle rinnovabili (come i sistemi ad energia solare, eolico e moto ondoso). Rispetto a queste ultime la risorsa è relativamente concentrata, la taglia degli impianti tipicamente spazia da 1 a 60 MWe, e non è soggetta a variabilità o periodi di disponibilità. Di conseguenza i Sistemi di Conversione dell'Energia Geotermica (GECS) raggiungono dei record significativi in termini di operabilità (spesso superiore a 7000 h/anno), e sono apprezzati come carichi stabili e continui sulla rete elettrica, che è sempre più variabile a causa dell'incremento rilevante di energia prodotta da rinnovabili.

In realtà solo un'attenta "coltivazione" della risorsa geotermica può garantire una considerevole durata di vita dei GECS; il problema della sostenibilità è principalmente legato al bilancio di acqua nel serbatoio, ai fenomeni di subsidenza e di micro-simicrità. Il bilancio acquifero è migliorato notevolmente negli anni grazie alla pratica della "condensate reinjection". Tuttavia problemi rilevanti sono dovuti agli effetti collaterali, come il rilascio di gas non condensabili (NCGs), che sono molto comuni nei serbatoi naturali, e l'emissione di  $CO_2$  (in media 122 g  $CO_2$ /kWh), con conseguente impatto ambientale.

## **Ciclo Rankine a vapore e a fluido organico**

È stata condotta un'attenta e dettagliata ricerca bibliografica che ha permesso di conoscere l'origine del primo ciclo Rankine e i suoi sviluppi. Il capitolo 2 fornisce informazioni utili per comprendere il ciclo Rankine a vapore e le sue varianti, mediante un'analisi termodinamica: ciclo a vapore surriscaldato, risurriscaldato, con rigenerazione, ciclo ORC e ciclo Kalina. In seguito sono stati analizzati i componenti del ciclo: scambiatori di calore, condensatore e turbomacchine. Ed infine sono state riportate alcune applicazioni dei cicli ORC: a biomasse, per applicazione geotermica, per il recupero del calore di scarto, per la conversione dell'energia termica degli oceani e per applicazione solare.

## **Scelta del fluido di lavoro**

La scelta del fluido di lavoro è molto importante poiché influenza sia la prestazione del ciclo ORC sia l'aspetto economico. Influisce sulla taglia dei componenti, sull'efficienza del ciclo, sugli aspetti di sicurezza e compatibilità ambientale, sulla stabilità e infine sulla scelta del tipo di espansore. Il tema della scelta del fluido di lavoro è stato affrontato in numerose pubblicazioni tramite l'applicazione di un metodo di "screening", utilizzato anche nel presente lavoro. Questo metodo consiste nel costruire un modello del ciclo, farlo "girare" con diversi fluidi ed infine effettuare un confronto tramite degli indicatori di performance. Nonostante le varie pubblicazioni sull'argomento non è possibile individuare un fluido "ottimo" per un generico ciclo ORC. Di conseguenza, nella scelta del fluido di lavoro si deve tenere in considerazione oltre agli indici di performance termodinamica, anche altri parametri quali: l'investimento economico, la massima pressione e temperatura sopportabile, l'impatto ambientale. Nella scelta del fluido di lavoro sono state valutate le proprietà fisiche e termodinamiche fra le quali: alta densità del vapore, alta conducibilità, temperatura e pressione di evaporazione, complessità molecolare.

## **ORC per applicazione geotermica**

Nel capitolo 4 è stata analizzata la geotermia; cos'è l'energia geotermica, quali sono i tipi di risorse geotermiche, come viene sfruttata la risorsa e quali sono le tecnologie per la conversione del geofluido in energia elettrica.

Infine è stata analizzata la geochimica, ovvero come la composizione chimica e lo stato fisico del fluido geotermico influenzano le tecnologie per la conversione energetica adottate: in particolare la geo-chimica e l'entalpia del serbatoio giocano il ruolo più importante e fanno da discriminante nella selezione di un tipo di ciclo piuttosto che un altro. La presenza di NCG, la corrosione, lo scaling, il pH ed altre proprietà del geofluido rende la scelta della tecnologia adatta alla risorsa in esame molto difficile. Questo perché il fluido geotermico estratto a bocca-pozzo non è semplicemente acqua, ma è una miscela di acqua, NCG ed altri elementi chimici (Si, Cl, Sb, Ca ed altri sotto forma di sali), che variano come composizione in base al serbatoio considerato.

## Implementazione del codice

L'obiettivo della tesi è quello di fornire una valutazione termodinamica e termoeconomica di un ciclo ORC al variare del fluido di lavoro ipotizzando che la sorgente sia composta da acqua pura o come miscela acqua e  $CO_2$  in percentuale variabile dall'0,51 al 3%. Gli NCG disciolti nel geofluido sono  $CO_2$ ,  $H_2S$ , silicati, solfati, cloruri, dove la percentuale di  $CO_2$  generalmente varia dal 95 al 99%. Quindi nella seguente tesi è stata considerata solo la  $CO_2$  disciolta nel fluido geotermico, variabile con la risorsa analizzata.

I dati della risorsa sono quelli dello stabilimento di Bagnore 3, in provincia di Grosseto. Il fluido geotermico in ingresso alla pompa borehole ha una portata di 122 kg/s, una pressione di 60 bar e una entalpia di 1200 kJ/kg. Il fluido geotermico presenta una portata di  $CO_2$  di 2,528 kg/s, che corrisponde a circa il 2% in massa. È stato analizzato un ciclo ORC con recuperatore di calore interno (IHE) operante in condizioni supercritiche, accoppiato a pompa borehole, inserita all'interno del pozzo, in modo che il fluido geotermico sia allo stato liquido sia durante lo scambio termico che alla re-iniezione, consentendo una temperatura di re-iniezione inferiore. Lo schema dell'impianto è riportato in Figura 42. Il vantaggio di un impianto binario rispetto ad uno a flash o a vapore secco è l'assenza di contatto del geofluido con l'atmosfera. Il fluido non è espanso, ma opera solo come caldaia esterna per alimentare il fluido di lavoro. Il geofluido viene pertanto completamente re-iniettato nel serbatoio geotermico dopo il raffreddamento. Questo comporta dei vantaggi ambientali notevoli, grazie all'assenza di emissioni, ed economici, non è necessario impiegare il processo AMIS, per il trattamento degli effluenti gassosi. Inoltre si è scelto di lavorare in condizioni supercritiche perché si hanno rendimenti migliori, a parità di caratteristiche della risorsa, rispetto ai cicli subcritici, come confermato da numerose pubblicazioni.

È stato fatto un programma su EES (Engineering Equation Solver) che permette di analizzare il ciclo da un punto di vista termodinamico, exergetico e termoeconomico al variare del fluido di lavoro e al variare della percentuale di  $CO_2$  disciolta nella risorsa. Inoltre è stata creata una procedura all'interno del programma che calcola le perdite di carico e le perdite termiche del fluido geotermico durante la risalita, note le caratteristiche geometriche e strutturali del pozzo di produzione. Si è ipotizzato un diametro del borehole di 324mm, la pompa è stata posizionata ad una profondità di 800m, il pozzo, partendo dalla bocca del pozzo, è rivestito per i primi 500 metri di acciaio inox (6,4 mm di spessore) e cemento (38 mm di spessore), per i successivi 300 metri solo con cemento. Nota la geometria è possibile calcolare il salto di pressione che deve garantire la pompa, come somma delle perdite di carico e della diminuzione di pressione durante la risalita del fluido geotermico dovuto al contributo geodetico. Si possono infine calcolare le perdite termiche durante la risalita che riducono la temperatura del geofluido in ingresso allo scambiatore HE.

Sono stati analizzati molti fluidi di lavoro di cui però sono stati riportati i risultati solo di quelli più performanti. Per approfondimenti sui parametri da ottimizzare, sulla descrizione del codice, sulle variabili dipendenti e indipendenti, sui limiti e controlli e sulla validazione del modello si rimanda al capitolo 5.

Per calcolare la solubilità della  $CO_2$  nel fluido geotermico è stato implementato in EES il modello proposto da Duan e Sun. Il modello si basa su una specifica teoria dell'interazione delle particelle per la fase liquida e una accurata equazione di stato per la fase vapore.

Nota la solubilità della  $CO_2$  nel fluido geotermico in ingresso allo scambiatore di calore HE è possibile calcolare la portata di  $CO_2$  che rimane in fase gassosa, e che è quindi necessario estrarre nella parte superiore dello scambiatore di calore. Le analisi condotte al variare della percentuale di  $CO_2$  nella risorsa hanno come dato fissato la portata di acqua e  $CO_2$  disciolta pari a 122kg/s, mentre la portata in fase gassosa cambia. L'obiettivo del sistema di estrazione è quello di portare la  $CO_2$  in fase liquida ad una densità leggermente superiore a quella dell'acqua, e re-iniettarla insieme al fluido geotermico nel pozzo di re-iniezione, in modo che venga

trasportata nel serbatoio. Lo schema del ciclo di re-iniezione è riportato in Figura 44, per i dettagli sulla profondità, sulla temperatura, sulla pressione di re-iniezione e sulle potenze in gioco si rimanda al paragrafo 5.5. È stato analizzato il ciclo ORC al variare della percentuale di  $CO_2$  dall'0,51 al 3%, per simulare differenti risorse. Sono stati scelti i precedenti valori come percentuale di  $CO_2$  perchè i serbatoi a liquido dominante generalmente presentano questo range come percentuale in massa di  $CO_2$  in fase liquida. Per tenere conto della presenza della  $CO_2$  nel programma di calcolo costruito nel software EES sono state incluse le librerie di REFPROP, che consentono di determinare le grandezze termodinamiche di interesse utilizzando varie equazioni (GERG-2008, AGA8 equation, Peng-Robinson).

### **Modellazione del fluido geotermico come acqua pura**

Inizialmente il geofluido è stato trattato come acqua pura. Sono state fatte delle analisi parametriche per refrigeranti e idrocarburi concentrandosi su quelli più performanti (n-butano, n-pentano, n-esano, isobutano, RC318 e R143a); andando ad individuare la temperatura in ingresso alla turbina T[5] e la pressione p[9] che danno il massimo rendimento del ciclo e di conseguenza la massima potenza prodotta, con i limiti riportati al paragrafo 5.3.3. Il fluido rimane in fase liquida fino al pozzo di re-iniezione grazie all'aumento di pressione dato dalla pompa borehole. Dai risultati presentati nel paragrafo 5.6 si vede come gli idrocarburi presentano prestazioni migliori rispetto ai fluidi frigoriferi e questo perché hanno una temperatura massima di esercizio superiore, che meglio si adatta alle sorgenti a medio alta entalpia. Il massimo rendimento di primo e secondo principio, e la massima potenza prodotta si ottengono con l'n-pentano, rispettivamente  $\eta_{dir}=24,7$ ,  $\eta_{ex}=66,79$ ,  $W_{net}=19,582$ . Per tutte le considerazioni riguardante i profili di scambio termico allo scambiatore di calore HE e IHE (calcolati mediante il programma costruito su EES), e le grandezze del ciclo si rimanda al paragrafo 5.6.

### **Modellazione del fluido geotermico come acqua e $CO_2$**

In seguito è stata effettuata un'analisi termodinamica, exergetica e termoeconomica del ciclo ORC considerando una percentuale di  $CO_2$  disciolta nella risorsa dello 0,51%, 1%, 2% e 3% a parità di temperatura di re-iniezione T[4]=130°C e a parità di calore scambiato nello scambiatore di calore HE, per tutti i fluidi di lavoro selezionati. Le grandezze caratteristiche del ciclo ORC, i profili di scambio termico per il fluido geotermico e per quello di lavoro negli scambiatori di calore HE e IHE, e come variano le prestazioni al variare della temperatura massima del ciclo sono riportate nel capitolo 5 e in appendice.

### **Confronto adimensionale**

Per valutare l'errore che si commette modellando il fluido geotermico come acqua o come una miscela di acqua e  $CO_2$ , sono state adimensionalizzate le grandezze in uscita dal ciclo ORC. In particolare al numeratore è stato preso il valore della grandezza, ad esempio il rendimento, della miscela acqua e  $CO_2$ , mentre al denominatore il valore del geofluido come acqua. In questo modo è possibile rappresentare i valori delle grandezze che esprimono le performance dell'impianto ORC in percentuale rispetto al caso dell'acqua. Nel paragrafo 5.11 sono riportati i grafici del rendimento di primo principio e dell'errore relativo che si commette a modellare il fluido geotermico come acqua invece che come miscela di acqua e  $CO_2$ . L'errore relativo viene definito nel seguente modo: al numeratore c'è la differenza tra il valore della grandezza in esame del geofluido come acqua e quello della miscela acqua e  $CO_2$ , al denominatore il valore della grandezza del geofluido modellato come acqua. I parametri analizzati sono: rendimento di primo e secondo principio, potenza netta, portata in massa di fluido organico, rendimento scambiatore di calore HE e IHE, potenza termica relativa, potenza prodotta della turbina e potenza assorbita dalla pompa di alimento. In seguito sono riportati i grafici a torta che riportano distruzione e perdita di exergia nel ciclo ORC per il caso di acqua pura e come varia la distruzione di exergia nello scambiatore di calore HE e nel condensatore, che sono i componenti più critici.

### **Analisi Termoeconomica**

Nel capitolo 6 sono state descritte le funzioni di costo utilizzate nell'analisi termoeconomica per ricavare i costi globali ( $Z_{tot}^{CI} + Z_{tot}^{OM}$ ) del sistema ORC, per stimare il costo dell'energia elettrica prodotta. Per calcolare il costo

dei vari componenti del ciclo ORC è stato impiegato il metodo descritto da Turton [61]. Il costo di ciascun componente viene determinato partendo inizialmente dal costo della “configurazione di base”, il quale viene corretto moltiplicandolo per alcuni fattori correttivi che tengono conto: del tipo di componente considerato, della pressione operativa e del materiale con cui viene realizzato.

Per valutare le prestazioni del ciclo ORC sono stati utilizzati alcuni parametri definiti per ogni componente del ciclo: il fattore exergoeconomico, l'incremento relativo di costo, l'efficienza exergetica e il costo della distruzione di exergia. Mentre come parametro di confronto tra i vari cicli che operano con fluido organici differenti è stato preso il costo del kWh elettrico prodotto. Nel paragrafo 6.4 si riportano le analisi termoeconomiche per alcuni fluidi analizzati, i parametri termoeconomici prestazionali del ciclo e l'andamento del Net Present Value con o senza tasso di inflazione, considerando il geofluido come acqua pura o come una miscela di acqua e  $CO_2$ . I valori del costo della distruzione di exergia, del costo di capitale, del fattore exergoeconomico e dell'efficienza exergetica per i componenti del ciclo ORC variano con il fluido di lavoro. Tuttavia nel caso di geofluido modellato come una miscela di acqua e  $CO_2$  ritroviamo lo stesso andamento qualitativo dei parametri precedentemente elencati. I valori sono ovviamente differenti ma si possono estendere le considerazioni già fatte alla fine dei paragrafi 6.4.1 e 6.4.2. In conclusione il costo del kWh prodotto dal ciclo ORC è minore usando come fluido organico n-esano. Mentre le prestazioni termoeconomiche peggiorano all'aumentare della percentuale di  $CO_2$ , aumenta il TCI e diminuisce il NPV.

## Progettazione pompa borehole

Dopo aver analizzato il ciclo ORC è stato fatto un dimensionamento della pompa borehole. In questo lavoro è stato utilizzato il metodo dei coefficienti adimensionali, è un metodo monodimensionale che consente un primo dimensionamento delle pompe centrifughe, con buona prevedibilità delle prestazioni. In base ai dati della prevalenza richiesta all'interno del pozzo di produzione e essendo il diametro massimo della girante e del successivo diffusore fissati è stata scelta di dimensionare una pompa multistadio. Il diametro del pozzo di risalita ha un valore noto poiché le trivelle utilizzate per la perforazione del pozzo hanno delle dimensioni standard. Nota la prevalenza che deve garantire la pompa come somma di un contributo geodetico e delle perdite di carico è stata trovata la prevalenza del singolo stadio e il numero di stadi. Tutte le caratteristiche della pompa borehole, i triangoli di velocità e la geometria sono riportati nelle tabelle 83 e 84 riportate alla fine del capitolo 7.

## Cicli a $CO_2$ supercritici

Nell'ultimo capitolo sono stati analizzati i cicli Brayton supercritici a  $CO_2$  ( $S-CO_2$ ), perchè recentemente stanno guadagnando una certa attenzione per applicazioni ad alta temperatura. Tra i vari layout dei cicli  $S-CO_2$ , riportati in Figura 154 e 155, sono stati esaminati il ciclo a precompressione e quello a ricompressione che come riportato nella Figura 153 danno i migliori rendimenti, rispettivamente per i cicli a singolo flusso e a doppio flusso, e sono stati confrontati con il ciclo ORC classico rigenerato. Il fluido geotermico è stato modellato come acqua pura con le stesse caratteristiche della risorsa del paragrafo 5.6. Per i tre layout è stata condotta un'analisi termodinamica e termoeconomica con fluido di lavoro  $CO_2$ . Nel capitolo 8 sono riportati i layout dei cicli, i cicli nel diagramma T-s, le grandezze caratteristiche, l'analisi termoeconomica ed i profili di scambio termico negli scambiatori di calore. Dalla Tabella 93 si vede come con una temperatura di re-iniezione fissata a  $130^\circ C$  il massimo rendimento si ottiene con il ciclo a precompressione grazie alla minore potenza assorbita dai compressori. Facendo variare la temperatura di re-iniezione tra  $130^\circ C$  e  $190^\circ C$  il massimo rendimento, superiore al caso precedente Tabella 94, si ottiene sempre con il ciclo a precompressione, mentre il ciclo a ricompressione da migliori rendimenti nel range  $190-200^\circ C$ . Tuttavia i rendimenti sono decisamente inferiori rispetto al ciclo ORC operante con idrocarburi.

## Conclusioni

La novità della tesi rispetto alla letteratura riguarda: sia l'introduzione di una pompa borehole all'interno del pozzo di produzione, con l'obiettivo di pressurizzare il geofluido, consentendo una temperatura di re-iniezione inferiore; sia l'investigazione di come variano le prestazioni ed i parametri ottimizzanti il ciclo ORC considerando

il fluido geotermico come una miscela di acqua e  $CO_2$  (poichè in letteratura il geofluido viene modellato semplicemente come acqua concentrandosi esclusivamente sull'impianto). Dalle analisi mostrate nel capitolo 5 si nota come al variare della percentuale di  $CO_2$  nel fluido geotermico cambiano quasi tutte le grandezze termodinamiche ed i parametri prestazionali di interesse. Si modifica la pressione e la temperatura massima del ciclo, il rendimento, la potenza netta prodotta, il calore scambiato negli scambiatori di calore, con variazioni diverse in base al tipo di fluido organico e alla percentuale di  $CO_2$  presente nella risorsa. Inoltre la potenza richiesta dalla pompa borehole aumenta con la percentuale di  $CO_2$  disciolta nella risorsa a causa dell'aumento delle perdite di carico, si modifica di conseguenza la progettazione della pompa, affrontata al capitolo 7. La temperatura del fluido geotermico in ingresso allo scambiatore di calore HE diminuisce con la percentuale di  $CO_2$ , ed a parità di calore scambiato nello scambiatore HE, anche la temperatura di re-iniezione diminuisce. Il rendimento dello scambiatore HE tende ad aumentare con la percentuale di  $CO_2$ , a causa della riduzione della pressione massima di ciclo. La potenza prodotta dalla turbina e quella assorbita dalla pompa di alimento aumentano entrambe all'aumentare della percentuale di  $CO_2$  disciolta nella risorsa perché la temperatura in ingresso alla turbina T[5] diminuisce e quindi aumenta la portata di fluido organico nel ciclo ORC. All'aumentare della percentuale di  $CO_2$  si riduce la temperatura massima in ingresso alla turbina e si ha un maggior recupero di calore nello scambiatore IHE perché le pressioni del ciclo di alta e di bassa si avvicinano e così i valori dell'entalpia. Dai risultati precedenti è evidente che non è possibile modellare il fluido geotermico come acqua pura se nella risorsa è presente  $CO_2$ , altrimenti si commettono errori rilevanti nel dimensionamento dell'impianto e nella stima delle sue performance. I migliori rendimenti si ottengono con gli idrocarburi (n-butano, n-pentano, n-esano ed isobutano) i peggiori con i refrigeranti (RC318, R143a e gli altri analizzati in precedenza). Il fluido migliore risulta essere l'n-pentano, in termini di rendimento di primo principio, seguito dall'n-esano e l'n-butano. Tuttavia nella scelta del fluido migliore per l'impianto ORC in esame è necessario considerare anche la pressione massima di esercizio p[9], il calore scambiato nello scambiatore di calore IHE ed al condensatore, la potenza assorbita dalla pompa, quella prodotta dalla turbina e la portata di fluido organico. In base alle precedenti considerazioni e includendo anche l'aspetto economico, il fluido migliore per il ciclo ORC in esame, note le caratteristiche della risorsa, è l'n-esano. Questo perché la pressione p[9] è di poco superiore ai 30 bar, la potenza prodotta dalla turbina e quella assorbita dalla pompa sono le minori tra i fluidi analizzati, quindi dimensioni e costi dei componenti sono minori. La portata di fluido ORC è tra le più basse così come le dimensioni dello scambiatore di calore IHE. In termini di errori relativi tra il caso di geofluido come acqua o come miscela acqua e  $CO_2$ , le minori variazioni si ottengono con n-pentano ed n-esano. Nel capitolo 6 è stata fatta una analisi termoeconomica degli impianti studiati al capitolo precedente. Non sono stati analizzati tutti i fluidi organici, ma il fluido migliore e quello peggiore, rispettivamente n-esano ed RC318. Inoltre è stato analizzato il fluido geotermico come acqua pura e come miscela acqua e  $CO_2$  allo 0,51% e 3% in massa, le percentuali dell'1 e 2% non sono state riportate per non appesantire troppo il lavoro, e perché davano risultati intermedi. Inoltre si vede come gli idrocarburi danno delle performance migliori non solo da un punto di vista termodinamico, ma anche economico rispetto ai refrigeranti. Considerando il geofluido come acqua o come una miscela acqua e  $CO_2$ , le variazioni in termini di TCI e costo kWh prodotto non cambiano drasticamente. L'andamento qualitativo dei parametri usati come confronto è lo stesso, mentre i valori numerici subiscono delle variazioni relativamente contenute. Infine nel capitolo 8 sono stati analizzati i cicli Brayton S- $CO_2$ . Dalla analisi effettuate si vede come il rendimento dei tre cicli è nettamente inferiore rispetto agli idrocarburi, anche nelle condizioni ottimizzanti il ciclo con temperatura di re-iniezione variabile.

In conclusione i risultati ottenuti sono interessanti. Il ciclo supercritico ORC accoppiato a pompa borehole è una valida alternativa al ciclo a flash singolo attualmente presente nell'impianto di Bagnore 3. Le performance termodinamiche ed exergoeconomiche sono significative. Inoltre l'implementazione del modello di solubilità e l'analisi sul fluido geotermico come miscela acqua e  $CO_2$  evidenzia come non sia possibile modellare la risorsa semplicemente come acqua pura, a meno di non commettere errori rilevanti nella stima delle performance dell'impianto.